



Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées

# Caractérisation multiéchelle du lœss de Hesbaye (Belgique) par une approche couplée géologique et géotechnique

Thèse de doctorat présentée  
en vue de l'obtention du grade  
de Docteur en Sciences de l'Ingénieur, par

Simon DELVOIE

Octobre 2017

## Jury

Frédéric NGUYEN	Professeur	Université de Liège, président
Frédéric COLLIN	Chargé de Cours	Université de Liège, promoteur
Robert CHARLIER	Professeur	Université de Liège, co-promoteur
Frédéric BOULVAIN	Professeur	Université de Liège
Pierre BREUL	Professeur	Université Clermont Auvergne
Stéphane PIRSON	Géologue senior	Service public de Wallonie
Christian TREVE	Géologue senior	CFE









## Résumé

Une analyse approfondie du limon éolien (lœss) est réalisée. Elle se base sur une approche originale couplant les aspects liés à la géologie, à ceux en rapport avec les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Cette approche est réalisée au moyen d'une analyse expérimentale multiéchelle, où l'essai de pénétration statique joue un rôle prépondérant. Cette approche est appliquée à l'étude du lœss rencontré en Hesbaye (Belgique), au sein de laquelle le site de la carrière de Romont (Ében-Émael, Belgique) fait l'objet d'une étude plus complète et détaillée.

D'un point de vue stratigraphique, une coupe géologique continue sur près de 18 km, réalisée le long du tronçon de la ligne TGV, entre Liège et Waremme, souligne que l'épaisseur de la couche limoneuse est très variable et peut atteindre localement 20 m. La séquence lœssique est étudiée de manière plus détaillée sur trois sites hesbignons (Remicourt, Romont et Rocourt) au moyen d'une campagne d'essais de pénétration statique (CPT). L'analyse de la résistance au cône du CPT révèle qu'il est possible de définir quatre marqueurs stratigraphiques au sein de la séquence lœssique régionale : la limite de décarbonatation superficielle, la transition entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous-jacents, le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle au sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Les caractéristiques physiques, géochimiques et microstructurales déterminées en laboratoire sur des échantillons issus de ces marqueurs stratigraphiques, permettent de mieux comprendre les variations du comportement mécanique mesuré in situ. La porosité, la densité et la proportion d'argile semblent être trois paramètres clés pouvant expliquer les variations de la résistance au cône du CPT observées.

Une analyse comparative des propriétés géomécaniques a également été menée, soit entre les données issues du CPT elles-mêmes, soit entre les résultats acquis par le CPT d'une part, et les essais en laboratoire d'autre part. Cette analyse comporte quatre points : (i) l'analyse comparative des résultats obtenus par les différents types de pointes (M1, M2 et E) du CPT, indique que la résistance au cône est peu influencée par le choix du type de pointe, dans un matériau limoneux. (ii) Les diagrammes de classification des sols basés sur les données du CPT confirment la relative hétérogénéité du matériau limoneux étudié. (iii) La relation empirique reliant le module œdométrique à la résistance au cône du CPT, au moyen d'un coefficient  $\alpha$  dépendant du type de sol, est vérifiée pour le matériau limoneux étudié. (iv) une approche semi-empirique basée sur la théorie du calcul de la capacité portante des fondations est développée pour estimer simultanément la cohésion et l'angle de frottement apparents moyens du limon.

Les résultats de cette thèse peuvent être utilisés pour des applications concrètes et originales : (i) le CPT apparaît être un outil d'investigation intéressant pour l'archéologie préventive en contexte lœssique. (ii) Grâce à une analyse approfondie, le site de Romont (Belgique) peut constituer un site intéressant où il est envisageable de tester ou de calibrer, dans un milieu limoneux naturel, divers capteurs ou divers essais en lien avec les propriétés géomécaniques, géochimiques ou structurales du matériau. (iii) La caractérisation détaillée du limon éolien apporte de nombreuses propriétés en lien avec les caractéristiques géomécaniques, physiques et géochimiques du matériau. Celles-ci peuvent être utilisées dans le cadre d'études en lien avec un matériau lœssique.

Mots clés : Limon, lœss, résistance au cône, essai de pénétration statique, Hesbaye



## Abstract

A thorough analysis is performed on aeolian silt (loess) deposits. The study is based on an original approach combining geological aspects with physical and mechanical properties of the material. This approach is realized by means of a multiscale experimental analysis in which cone penetration test plays a key role. The approach is applied to the study of loess deposits located in the Hesbaye region (Belgium), in which the site of the Romont quarry (Eben-Emael, Belgium) is the subject of a more comprehensive and a more detailed study.

About the stratigraphic aspects, a continuous geological cross-section performed along a 18 km long section of the high-speed railway between Liège and Waremme, underlines the variability of the thickness of the loess layer which can locally reach 20 m. The loess sequence is further investigated in three Hesbayan sites (Remicourt, Romont and Rocourt) with cone penetration test (CPT) campaign. The analysis of the cone resistance of the CPT reveals it is possible to define four stratigraphic markers within the regional loess sequence: the near surface decarbonation limit, the transition between the Nagelbeek Tongued Horizon and the underlying Hesbayan loess, the Humiferous Complex of Remicourt, and the Whitish horizon of Momalle on top of the Rocourt Pedocomplex. Physical, geochemical and microstructural characteristics determined from laboratory analyses on samples stratigraphically located around the stratigraphic markers, enable a better understanding of the observed variations of the in situ mechanical behaviour. Porosity, volumetric weight and clay content seem to be three major variables in the understanding of the observed variations of cone resistance.

A comparative analysis of geomechanical properties has also been conducted either from different data related to CPT or between CPT results and laboratory measurements. This study includes four items: (i) the comparative analysis of measurements achieved by different CPT cone types (M1, M2 and E), clearly indicates the cone type has negligible influence on the measured cone resistance for silty material. (ii) Soil behaviour type charts based on CPT data confirm the relative heterogeneity of the investigated silty material. (iii) The empirical relation between the oedometric modulus and the cone resistance of the CPT, including the  $\alpha$  factor depending on the soil type, is verified for the studied silty material. (iv) A semi-empirical approach based on the bearing capacity theory has been developed to estimate mean apparent cohesion and friction angle of the silt.

Finally, results of this PhD thesis may be used for specific and original applications: (i) CPT testing seems to be an interesting investigation technique for rescue archaeology in loess context. (ii) Thanks to the in-depth investigation, the Romont site (Belgium) may provide an interesting site wherein sensors or investigation tests related to geomechanical, physical or structural properties of the material may be tested or calibrated into a natural silty medium. (iii) The detailed characterisation of aeolian silt leads to numerous properties related to geomechanical, physical and geochemical aspects of the material. These data may be used in studies dealing with loess deposits.

key words: silt, loess, cone resistance, CPT, Hesbaye region



## Remerciements

*Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe de recherche de Géomécanique et géologie de l'ingénieur de l'Université de Liège, avec le soutien logistique et technique du Laboratoire de Géotechnologies, et avec le soutien financier de l'Université de Liège.*

*Mes premiers mots sont naturellement adressés à Monsieur F. Collin, Promoteur de cette thèse de doctorat, qui est à l'initiative de l'ébauche du projet de recherche développé dans ce travail. Je le remercie chaleureusement pour son soutien, ses conseils avisés et ses nombreuses contributions à ce travail.*

*Ma gratitude s'adresse également à Monsieur R. Charlier, Co-promoteur de cette thèse de doctorat, pour m'avoir permis de travailler sur des thématiques que j'affectionne particulièrement, et sans qui je n'aurais tout simplement pas fait partie de cette aventure au sein de l'équipe de recherche de Géomécanique et géologie de l'ingénieur.*

*Je remercie aussi Messieurs F. Nguyen (équipe de recherche de Géophysique appliquée, Université de Liège) et F. Boulvain (équipe de recherche de Pétrologie sédimentaire, Université de Liège), pour leur implication et pour les nombreux échanges enrichissants que nous avons eus tout au long de ce travail.*

*C'est avec un grand plaisir que je remercie Monsieur S. Pirson (Direction de l'Archéologie, Service public de Wallonie) avec qui j'ai eu l'honneur de collaborer. Son important soutien et sa disponibilité, ont permis de rehausser incontestablement la qualité de l'analyse de certains résultats développés dans ce travail, notamment en lien avec la stratigraphie de la séquence lœssique. Ses qualités scientifiques et humaines ont été un moteur m'aidant à mener à bien cette thèse de doctorat.*

*Je remercie Messieurs Ch. Treve (CFE) et P. Breul (Département Génie Civil, Université Clermont Auvergne) pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse de doctorat.*

*Ma gratitude s'adresse particulièrement à Messieurs A. Geurts, R. Vandezande et P. Illing, travaillant au sein du Laboratoire de Géotechnologies de l'Université de Liège, pour leur aide technique et pratique lors de l'acquisition des nombreuses données en lien avec la géotechnique, que ce soit en laboratoire ou sur le chantier. L'acquisition d'autant de résultats n'aurait pas été envisageable sans leur participation active.*

*Différents collaborateurs sont également intervenus pour diverses raisons et de manière plus ponctuelle au cours de cette thèse. Je les remercie pour leur intérêt porté à cette étude, leur disponibilité et leur contribution scientifique. Dès le début des recherches, Monsieur É. Juvigné a montré un grand intérêt envers l'approche originale utilisée pour caractériser la séquence lœssique. Il m'a fait découvrir le site de Romont qui, par la suite, est devenu le site d'étude principal de cette thèse. Monsieur J.-L. Pingot (Environmental Sciences, Université Catholique de Louvain) a mis à ma disposition toute son expérience sur la géologie de la Hesbaye, bien utile lors de l'étude à l'échelle régionale développée dans la thèse. Monsieur A. Demoulin (équipe de recherche en géographie physique et quaternaire, Université de Liège) a permis de*

## REMERCIEMENTS

*rehausser la qualité de l'interprétation des résultats issus de l'analyse à l'échelle régionale, en lien avec la géologie structurale. Messieurs P. van der Sloot et D. Bosquet (Direction de l'Archéologie, Service public de Wallonie), ainsi que Monsieur P. Spagna (Institut royal des Sciences naturelles de Belgique), m'ont apporté leur aide logistique, technique et scientifique en lien avec les études des sites de Remicourt, Romont et Rocourt. J'ai passé d'agréables moments en leur compagnie. Monsieur M. Evrard (équipe de recherche en Minerals Engineering and Recycling, Université de Liège) m'a apporté ses connaissances vis-à-vis des observations des lames minces au microscope polarisant.*

*Différents sites ont été étudiés dans le cadre de cette thèse. Leur investigation n'aurait pas été possible sans l'accord et parfois le soutien logistique de nombreuses personnes. Il me revient donc le plaisir de remercier la société Infrabel pour nous avoir gentiment autorisé la diffusion des résultats en lien avec la campagne géotechnique réalisée pour la construction de la ligne TGV Liège-Bruxelles. Je tiens également à remercier Messieurs Ph. Delporte, T.-M. Bolland, S. Wittemans et K. Meessen de la société CBR HeidelbergCement, pour nous avoir autorisé l'accès à la carrière de Romont et pour l'intérêt porté à notre étude, et ce dès la présentation du projet. Je tiens à souligner l'agréable accueil que l'ensemble du personnel de la carrière de Romont m'a réservé lors des nombreuses journées passées sur le site. Je remercie le Consortium Gritten, propriétaire de la sablière Gritten de Rocourt, et en particulier Messieurs Ch. Gritten et J. Pâque, pour l'accès au site d'étude et pour le soutien logistique apporté.*

*Une partie des résultats développés dans cette thèse a été obtenue grâce au travail minutieux de plusieurs personnes que je tiens également à remercier : Monsieur F. Michel et Mesdames V. Szepetiuk et F. Libiouille (Laboratoire des Matériaux de Construction, Université de Liège) pour les teneurs en matière organique et en carbonates ; Madame N. Fagel et Monsieur J. Otten (équipe de recherche en Argile, géochimie et environnement sédimentaires, Université de Liège) pour les analyses de diffractométrie des rayons X ; Monsieur B. Charlier (équipe de recherche de Pétrologie, géochimie endogènes et pétrophysique, Université de Liège) pour les données issues de la spectrométrie de fluorescence des rayons X ; Messieurs F. Boulvain et J.-P. Cullus (Laboratoire de Pétrologie sédimentaire, Université de Liège) pour la confection des lames minces ; Monsieur A. Dassargues et Madame I. Ruthy (équipe de recherche en Hydrogéologie et géologie de l'environnement, Université de Liège) pour la mise à disposition du DGPS indispensable à cette étude ; Monsieur J. Geens (Laboratoire Nanomaterials, Catalysis, Electrochemistry, Université de Liège) pour les mesures au porosimètre par intrusion de mercure ; Monsieur J.-M. Boeur (Laboratoire du Cebedeau) pour la détermination du carbone organique ; Monsieur J. Jansen (Geomil Equipment) pour le soutien technique concernant la pointe électrique utilisée pour l'essai de pénétration statique.*

*Durant cette thèse, j'ai également eu le plaisir d'encadrer deux étudiants, Monsieur J. Minani et Mademoiselle F. Boulouiz, qui m'ont fait l'honneur d'avoir choisi leur sujet de travail de fin d'étude en lien avec l'analyse du limon issu de la carrière de Romont. Les résultats qu'ils ont ainsi acquis m'ont été directement utiles.*

*Je salue chaleureusement bien évidemment les nombreux et nombreuses collègues que j'ai eu l'occasion de côtoyer quotidiennement au sein de l'équipe de recherche de Géomécanique et géologie de l'ingénieur de l'Université de Liège durant les cinq années qui m'ont été nécessaires pour mener à bien ce projet de thèse de doctorat, mais également plus largement durant les huit années passées au sein de*

*l'Unité de recherche en Urban and Environmental Engineering, et du Département ArGEnCo.*

*Je suis particulièrement reconnaissant envers ma famille et ma belle-famille pour m'avoir fait part, à de nombreuses reprises, de leur intérêt et leur curiosité vis-à-vis des recherches menées et des résultats obtenus. Leur soutien moral fut précieux dans les moments plus difficiles, durant lesquels elles ont fait preuve d'écoute et d'empathie.*

*Je ne peux terminer sans remercier ma chère épouse, Christelle, qui, à mes côtés depuis le début de cette aventure, m'a apporté soutien, écoute et réconfort ; valeurs indispensables pour me permettre de mener à bien ce travail. Sa curiosité et son enthousiasme m'ont été plus que bénéfiques. Puis, en cours de parcours, est venue s'ajouter une personne supplémentaire, ma fille, Aline, qui, grâce à ses rires et sa joyeuse insouciance enfantine m'ont apporté décontraction et motivation.*





# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>v</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>ix</b>
<b>Table des notations</b> .....	<b>xv</b>
<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
1. Contexte de l'étude .....	3
2. Objectifs .....	6
3. Organisation de la thèse .....	7
<b>Chapitre 2. L'essai de pénétration statique</b> .....	<b>9</b>
1. Introduction .....	11
2. Développements technologiques de l'essai CPT.....	11
2.1. La naissance de l'essai de pénétration .....	11
2.2. Des pointes mécaniques de plus en plus sophistiquées.....	13
2.3. L'arrivée de la pointe électrique .....	15
2.4. L'essai de pénétration statique offshore .....	16
3. Principes et fonctionnement .....	17
4. Principaux paramètres mesurés et calculés .....	18
5. Introduction à l'interprétation de l'essai de pénétration statique.....	21
5.1. Analyse stratigraphique .....	21
5.2. Classification des sols.....	25
5.3. Détermination de paramètres .....	33
6. Application aux fondations profondes .....	35
6.1. Les pieux .....	36
6.2. Mécanisme de transfert de la charge axiale .....	36
6.3. Détermination de la capacité portante d'un pieu à partir du CPT .....	37
6.3.1. Approches directes.....	38
6.3.2. Approches indirectes.....	42
7. Conclusions intermédiaires .....	50
<b>Chapitre 3. Étude à l'échelle régionale et suprarégionale</b> .....	<b>51</b>
1. Introduction .....	53
2. Le lœss (limon éolien).....	53
2.1. Qu'est ce que le lœss ? .....	53
2.2. Origine des glaciations .....	54
2.3. Cadre chronostratigraphique du Pléistocène supérieur .....	56
3. La couverture lœssique au-delà de la Belgique .....	58
3.1. Dans le monde .....	58

## TABLE DES MATIÈRES

3.2. En Eurasie.....	58
4. La couverture lœssique en Belgique .....	62
4.1. En Moyenne Belgique .....	62
4.2. Analyse approfondie en Hesbaye .....	63
4.2.1. Contexte géologique régional .....	64
4.2.2. Présentation de la campagne d’investigation .....	65
4.2.3. Résultats.....	65
5. La stratigraphie de la séquence lœssique .....	67
5.1. Description de la séquence lœssique de Belgique .....	67
5.2. Les corrélations stratigraphiques .....	73
5.2.1. Corrélations à l’échelle régionale.....	73
5.2.2. Corrélations aux échelles interrégionale et eurasiatique .....	73
6. Conclusions intermédiaires .....	78
<b>Chapitre 4. Étude à l’échelle locale.....</b>	<b>79</b>
1. Introduction.....	81
2. Démarche expérimentale suivie .....	82
3. Méthodes expérimentales principales .....	84
3.1. Essai de pénétration statique.....	84
3.2. Pénétromètre de poche.....	86
3.3. Tomographie de résistivité électrique.....	88
3.4. Forage.....	89
4. Étude du site de Remicourt .....	91
4.1. Présentation du site de Remicourt .....	91
4.2. Résultats .....	91
5. Étude détaillée du site de Romont.....	94
5.1. Contexte géologique du site de Romont .....	94
5.2. Présentation de la campagne expérimentale in situ .....	96
5.3. Résultats .....	97
5.3.1. Coupe géologique du front de taille .....	97
5.3.2. Tomographie de résistivité électrique .....	102
5.3.3. Essai de pénétration statique .....	103
5.3.4. Pénétromètre de poche.....	114
5.3.5. Forage .....	117
5.3.6. Synthèse.....	118
6. Étude du site de Rocourt .....	120
6.1. Contexte géologique du site de Rocourt.....	121
6.2. Présentation de la campagne expérimentale in situ .....	123
6.3. Résultats .....	124
6.3.1. Essai de pénétration statique .....	124
6.3.2. Pénétromètre de poche.....	128
6.3.3. Synthèse.....	132

7. Discussions.....	133
7.1. Définition des marqueurs stratigraphiques .....	133
7.2. Apports du pénétromètre de poche .....	135
7.3. Application à l'archéologie préventive.....	135
8. Conclusions intermédiaires .....	137
<b>Chapitre 5. Étude à l'échelle macroscopique.....</b>	<b>139</b>
1. Introduction.....	141
2. Démarche expérimentale suivie .....	142
3. Méthodes expérimentales principales .....	143
3.1. Préparation des échantillons .....	143
3.2. Essais de caractérisation physique.....	146
3.2.1. Analyse granulométrique .....	146
3.2.2. Limites d'Atterberg.....	147
3.2.3. Pycnomètre à gaz .....	149
3.3. Essais de caractérisation mécanique .....	149
3.3.1. Essai œdométrique .....	149
3.3.2. Essai triaxial.....	155
3.3.3. Essai de cisaillement direct.....	161
4. Classification des sols .....	163
4.1. Classification internationale des sols (USCS) .....	163
4.2. Comparaison avec la classification des sols au moyen de l'essai de pénétration statique .....	170
4.3. Synthèse intermédiaire .....	176
5. Caractéristiques de déformabilité.....	177
5.1. Résultats œdométriques.....	177
5.2. Comparaison avec l'essai de pénétration statique .....	182
5.3. Susceptibilité à l'effondrement.....	187
5.4. Synthèse intermédiaire .....	192
6. Caractéristiques de résistance mécanique .....	193
6.1. Résultats des essais triaxiaux et de cisaillement direct.....	193
6.2. Comparaison avec l'essai de pénétration statique .....	203
6.3. Synthèse intermédiaire .....	208
7. Conclusions intermédiaires .....	209
<b>Chapitre 6. Étude à l'échelle microscopique.....</b>	<b>211</b>
1. Introduction.....	213
2. Démarche expérimentale suivie .....	213
3. Méthodes expérimentales principales .....	215
3.1. Teneur en matière organique .....	215
3.1.1. Perte au feu .....	215
3.1.2. Oxydation par voie humide.....	217
3.2. Diffractométrie des rayons X.....	217
3.3. Spectrométrie de fluorescence des rayons X .....	218

## TABLE DES MATIÈRES

3.4. Teneur en carbonate.....	218
3.5. Porosimétrie par intrusion de mercure.....	218
3.6. Analyse pétrographique.....	219
4. Résultats.....	220
4.1. Géochimie.....	220
4.1.1. Minéralogie.....	220
4.1.2. Éléments majeurs.....	221
4.1.3. Teneur en matière organique.....	222
4.2. Microstructure.....	224
4.3. Observations pétrographiques.....	228
5. Discussions.....	233
5.1. Limite de décarbonatation superficielle.....	233
5.2. Base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek.....	234
5.3. Complexe Humifère de Remicourt.....	235
5.4. Sommet du Pédocomplexe de Rocourt.....	236
6. Conclusions intermédiaires.....	238
<b>Chapitre 7. Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>241</b>
1. Conclusions générales.....	243
1.1. Analyse stratigraphique.....	243
1.2. Analyse comparative des caractéristiques géomécaniques.....	244
2. Perspectives.....	245
2.1. Archéologie préventive.....	245
2.2. Géotechnique.....	246
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>251</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>273</b>
<b>Lexique.....</b>	<b>281</b>





## Table des notations

### Lettres grecques

Symbole	Unité	Signification
$\alpha_b$	-	Facteur d'installation empirique qui prend en compte l'influence d'installation du pieu dans le sol, d'après CSTC (2009)
$\alpha_s$	-	facteur d'installation empirique relatif à la couche de sol recoupée par un pieu et qui prend en compte d'une part la méthode d'installation du pieu et d'autre part sa rugosité
$\beta$	-	Facteur de forme lorsque la base du pieu n'est pas circulaire ou carrée, d'après CSTC (2009)
$\beta$	°	Angle de plastification dans le modèle de Janbu & Senneset (1974)
$\gamma_h$	N/m <sup>3</sup>	Poids volumique du sol
$\gamma_d$	N/m <sup>3</sup>	Poids volumique du sol sec
$\gamma_s$	N/m <sup>3</sup>	Poids volumique des grains
$\delta^{18}\text{O}$	-	Rapport isotopique de l'oxygène ( <sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O) d'un échantillon (eau, glace) comparé au rapport isotopique d'un standard (SMOW)
$\varepsilon_b$	-	Facteur s'appliquant aux argiles tertiaires qui prend en compte l'effet d'échelle sur le frottement en raison de la fissuration du sol, d'après CSTC (2009)
$\varepsilon_v$	%	Déformation verticale
$\eta$	Pa.s	Viscosité dynamique de la solution
$\eta_p$	-	Facteur empirique qui indique le rapport entre la résistance de frottement latéral local au CPT et la résistance au cône selon le type de sol, d'après CSTC (2009)
$\lambda$	-	Facteur de réduction qui prend en compte la décompression du sol autour du pieu, engendrée lors de son installation par la présence d'une base élargie, d'après CSTC (2009)
$v$	m/s	Vitesse de sédimentation de particules sphériques
$\rho_s, \rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	Masse volumique, respectivement des grains et de l'eau.
$\sigma$	Pa	Contrainte normale
$\sigma_h, \sigma'_h$	Pa	Contrainte horizontale (totale et effective)
$\sigma_{h0}, \sigma'_{h0}$	Pa	Contrainte horizontale initiale (totale et effective)
$\sigma'_p$	Pa	Contrainte de préconsolidation
$\sigma_v, \sigma'_v$	Pa	Contrainte verticale (totale et effective)
$\sigma_{v0}, \sigma'_{v0}$	Pa	Contrainte verticale initiale (totale et effective)
$\sigma_1, \sigma_3$	Pa	Contraintes axiale et de confinement dans le cas d'un essai triaxial ou d'un essai de cisaillement direct

## TABLES DES NOTATIONS

$\tau, \tau_f$	Pa	Contrainte de cisaillement et contrainte de cisaillement à la rupture
$\phi_u, \phi'$	°	Angle de frottement interne (apparent et effectif)
$\chi_s$	m	Périmètre du pieu, d'après CSTC (2009)
$\psi_s$	Pa	Pression limite à l'expansion d'une cavité sphérique
$\omega$	-	Facteur de conversion entre la résistance au cône mesurée par une pointe mécanique et par une pointe électrique

### Lettres latines

a	Pa	Coefficient d'attraction du sol (défini par Janbu & Senneiset (1974))
a	m <sup>2</sup>	Section du tube gradué amont d'un perméamètre à charge variable
A	-	Constante de gonflement, lors d'un essai œdométrique
A	m <sup>2</sup>	Section de l'échantillon
A	m <sup>2</sup>	Surface du plan de cisaillement en cours d'essai de cisaillement direct
A <sub>c</sub>	m <sup>2</sup>	Surface de la base du cône (typiquement, 10 cm <sup>2</sup> )
A <sub>b</sub>	m <sup>2</sup>	Surface de la base du pieu
A <sub>n</sub>	m <sup>2</sup>	Surface de la face arrière du cône, sur laquelle n'agit pas la pression interstitielle (u <sub>2</sub> )
A <sub>s</sub>	m <sup>2</sup>	Surface du manchon de frottement (typiquement, 150 cm <sup>2</sup> )
A <sub>s</sub>	m <sup>2</sup>	Surface totale des parois latérales du pieu situées dans le sol
B	m	Diamètre du pieu ou du cône du CPT, largeur d'une fondation superficielle
c	-	Exposant lié à la résistance au cône et à la contrainte verticale effective
c', c <sub>u</sub>	Pa	Cohésion du sol (effective ou apparente)
c <sub>C</sub> , c <sub>U</sub>	-	Coefficients, respectivement de courbure et d'uniformité d'une courbe granulométrique
c <sub>v</sub>	m <sup>2</sup> /s	Coefficient de consolidation verticale
C	-	Constante de compression, lors d'un essai œdométrique
C <sub>c</sub> , C <sub>s</sub>	-	Indice de compression et indice de gonflement, lors d'un essai œdométrique
C <sub>org</sub>	%	Carbone organique
d	m	Diamètre équivalent des particules
D	m	Profondeur de la base du pieu, de la pointe du CPT ou d'une fondation superficielle
D	m	Diamètre équivalent des pores
D <sub>50</sub>	m	Médiane d'une courbe granulométrique, qui équivaut au diamètre des particules correspondant à un passant cumulé de 50 %



$D_R$	-	Densité relative
$e$	-	Indice des vides = $V_v/V_s$
$E$	Pa	Module de Young
$E_{\text{œd}}$	Pa	Module œdométrique
$f_s$	Pa	Résistance de frottement latéral local
$F$	N	Force axiale
$F_b$	-	Coefficient de sécurité vis-à-vis de la force limite à la base d'un pieu
$F_{c,d}$	Pa	Valeur de calcul de la charge axiale en compression appliquée au pieu, d'après l'Eurocode 7.1
$F_r$	-	Rapport de frottement normalisé = $f_s/(q_t - \sigma_v)$
$F_s$	-	Coefficient de sécurité vis-à-vis de la force de frottement sur les parois latérales d'un pieu
$F_t$	-	Coefficient de sécurité vis-à-vis de la force limite totale d'un pieu
$g$	m/s <sup>2</sup>	Accélération de la pesanteur
$G_0$	Pa	Module de cisaillement à faibles déformations
$h$	m	Épaisseur d'une couche
$H_i, H_f$	m	Hauteur initiale et finale d'une éprouvette
$I_D$	-	Indice de densité
$I_P$	%	Indice de plasticité
$k$	m/s	Coefficient de perméabilité
$K_H$	-	Coefficient de correction de la résistance au cône, fonction de l'épaisseur de la couche et du diamètre du cône
$K_0$	-	Coefficient de poussée des terres au repos = $\sigma'_{h0}/\sigma'_{v0}$
$LI$	-	Indice de liquidité
$m_s$	kg	Masse du solide (des grains)
$m_v$	Pa <sup>-1</sup>	Coefficient de compressibilité
$M$	Pa	Module œdométrique
$n$	%	Porosité = $V_v/V_t$
$n$	-	Nombre d'échantillons
$N$	chocs	Nombre de chocs infligés à la coupelle dans la détermination de la limite de liquidité (limite d'Atterberg)
$N$	N	Force verticale durant un essai de cisaillement direct
$N_\gamma, N_q, N_c$	-	Coefficients de capacité portante de fondations superficielles ou de fondations profondes

## TABLES DES NOTATIONS

$N_m$	-	Coefficient de résistance au cône proposé par Janbu & Senneset (1974)
$N_q^*$	-	facteur de capacité portante pour une fondation profonde circulaire $= N_q \cdot s_q$
$p, p'$	Pa	Contrainte moyenne en contrainte totale $= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$ , et contrainte moyenne en contrainte effective
$P_i, P_f$	Pa	Pressions de gaz initiale et finale, lors de mesures au moyen du pycnomètre à gaz
$q, q_f$	Pa	Contrainte déviatorique et contrainte déviatorique à la rupture $= \sigma_1 - \sigma_3$
$q_b$	Pa	Résistance à la pointe de l'essai de pénétration statique, calculée par la méthode De Beer, d'après CSTC (2009)
$q_c$	Pa	Résistance au cône mesurée
$q_c^*$	Pa	Résistance au cône corrigée pour une couche fine résistante interstratifiée entre deux couches moins résistantes $= K_H \cdot q_{cB}$
$q_{c,E}$	Pa	Résistance au cône mesurée avec une pointe électrique
$q_{c,m}$	Pa	Valeur moyenne de la résistance au cône
$q_{c,M}$	Pa	Résistance au cône mesurée avec une pointe mécanique
$q_{c1e}$	-	Résistance au cône normalisée d'après Olsen & Mitchell (1995)
$q_E$	Pa	Résistance au cône effective $= (q_t - u_2)$
$q_s$	Pa	Résistance de frottement latéral local déterminée au moyen du CPT, d'après CSTC (2009)
$q_t$	Pa	Résistance au cône totale corrigée $= q_c + u_2(1 - A_n/A_c)$
$Q_a$	N	Force admissible totale d'un pieu
$Q_b$	N	Force limite à la pointe ou à la base d'un pieu
$Q_c$	N	Force totale rencontrée par le cône
$Q_s$	N	Force rencontrée le long du manchon de frottement d'un CPT
$Q_s$	N	Force limite de frottement le long des parois latérales d'un pieu
$Q_{st}$	N	Résistance de frottement latéral total
$Q_t$	-	Résistance au cône normalisée $= (q_t - \sigma_v)/\sigma'_v$
$Q_u$	N	Force limite totale d'un pieu
$R'_b$	Pa	Capacité portante limite nette à la base du pieu $= (Q_b - W_f)/A_b$
$R_{c,d}$	Pa	Valeur de calcul de la capacité portante d'un pieu en compression, d'après l'Eurocode 7.1
$R_f$	%	Rapport de frottement $= f_s/q_t$
$R_p$	Pa	Résistance au cône mesurée
$R_T$	N	Force totale rencontrée par le cône et le train de tubes extérieurs ou par le cône et le manchon de frottement

$s_u$	Pa	Résistance au cisaillement non drainé
$s_\gamma, s_q, s_c$	-	Coefficients correctifs liés à la forme de la fondation
$S_r$	%	Degré de saturation = $V_w/V_v$
$S_t$	-	Sensibilité du sol au tassement
$t_{50}, t_{90}$	s	Temps nécessaire pour obtenir un certain degré de consolidation primaire (respectivement 50 % et 90 %)
$T$	N	Force tangentielle durant un essai de cisaillement direct
$T_v$	-	Facteur temps pour la consolidation verticale
$u$	Pa	Pression interstitielle in situ ou dans l'échantillon
$u_2$	Pa	Pression interstitielle mesurée en arrière du cône
$U$	%	Degré de consolidation primaire
$V_m, V_r$	$m^3$	Volume, respectivement de l'enceinte de mesure et de référence, dans le cadre de mesures à l'aide d'un pycnomètre à gaz
$V_s, V_v$	$m^3$	Volumes, respectivement du solide (des grains) et des vides
$w$	%	Teneur en eau
$w_L, w_P$	%	Limites d'Atterberg, respectivement de liquidité et de plasticité.
$W_f$	N	Poids propre du pieu

### Abréviations et acronymes

AMSL	Hauteur moyenne de la surface de la mer (« Average Mean Sea Level »)
BP	Avant nos jours (« Before Present »)
ca	Âge calibré, relatif aux méthodes de datation
CD	Essai triaxial ou de cisaillement direct consolidé - drainé
CHR	Complexe Humifère de Remicourt
$C_{org}$	Carbone organique
CPT	Essai de pénétration statique (« Cone Penetration Test »)
CSTC	Centre Scientifique et Technique de la Construction
CU	Essai triaxial ou de cisaillement direct consolidé – non drainé
DPL	Essai de pénétration dynamique léger (« Dynamic Penetration Light »)
DRX	Diffractométrie des rayons X
ELI	État limite inférieur de Rankine
ELS	État limite supérieur de Rankine

## TABLES DES NOTATIONS

ERT	Tomographie de résistivité électrique (« Electrical Resistivity Tomography »)
GI/GS	Greenland Interstadial/Stadial
HBM	Horizon blanchi de Momalle
HLN	Horizon à Langues de Nagelbeek
IRSL	Datation par luminescence stimulée optiquement par infrarouge
IRSNB	Institut royal des Sciences naturelles de Belgique
ka	Âge exprimé en millier d'années
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LD	Limite de décarbonatation
LOI	Perte au feu (« Loss on Ignition »)
LP(n)A	Lumière polarisée (non) analysée
Ma	Âge exprimé en million d'années
MAL	Sol de Malplaquet
MIS	Stade isotopique marin (« Marine Isotope Stage »)
MO	Matière organique
MS	Marqueur stratigraphique
N/A	Mesure non applicable
OCR	Rapport de surconsolidation (« Overconsolidation Ratio »)
PP	Pénétromètre de poche
PR	Pédocomplexe de Rocourt
Rc, Re, Rm	En référence aux sites, respectivement, de Rocourt, Remicourt et Romont
s.d.	« Sans date », relatif à un document bibliographique dont la date d'édition ou d'élaboration n'est pas mentionnée.
SFX	Spectrométrie de fluorescence des rayons X
SMOW	« Standard Mean Ocean Water »
TL	Datation par thermoluminescence
uncal	Âge non calibré, relatif aux méthodes de datation
USCS	Classification internationale des sols (« Unified Soil Classification System »)
UU	Essai triaxial ou de cisaillement direct non consolidé – non drainé
VSG-A/VSG-B	Sol de Villers-Saint-Ghislain A/B





**Chapitre 1 :**  
**Introduction**





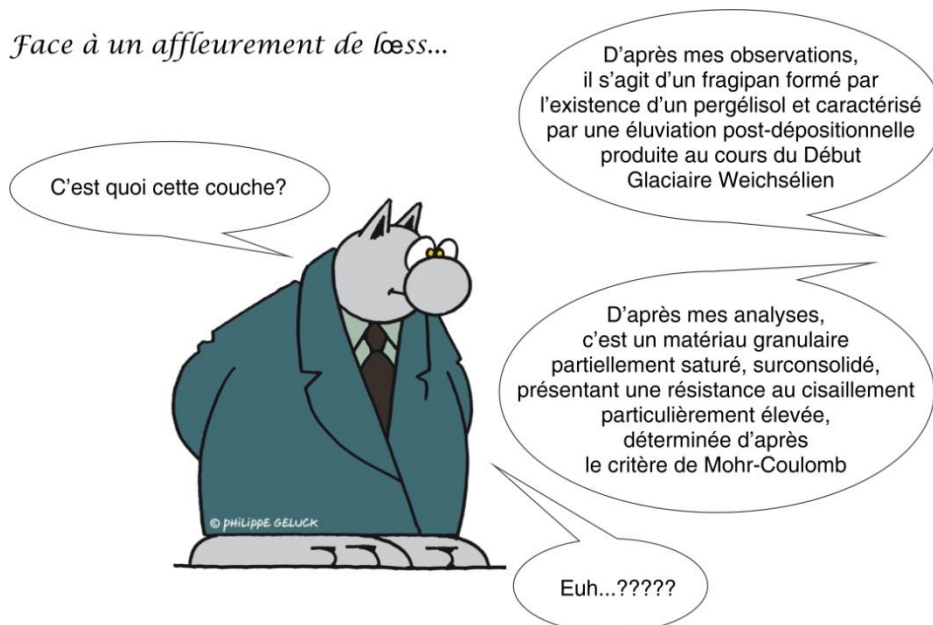
## 1. Contexte de l'étude

Des études estiment que près de 10 % de la surface des continents sont couverts par des dépôts lœssiques superficiels. Ce matériau est au centre de l'étude présentée dans ce travail. Le lœss correspond à un limon d'origine éolienne. Une définition plus complète du lœss sera apportée plus loin dans ce travail. En Belgique, le lœss se localise principalement en Moyenne Belgique. La Hesbaye, une région située à l'est de la Moyenne Belgique, fait l'objet d'une attention plus particulière dans le cadre de cette étude.

Le lœss est un dépôt sédimentaire particulièrement intéressant pour de nombreuses raisons. Il constitue une archive des conditions paléoenvironnementales et paléoclimatiques survenues au cours d'une période relative au Quaternaire. C'est également un matériau constitutif des sols les plus fertiles au monde. De nombreux sites archéologiques sont issus du lœss, qui les a préservés. Par ailleurs, en raison de sa proximité avec la surface topographique, la couche de lœss constitue souvent le dépôt sous les fondations de nombreux bâtiments et ouvrages, avec des caractéristiques géotechniques spécifiques. Enfin, le lœss est un matériau sujet à l'érosion et aux glissements de terrain. Ces différentes applications font du lœss un carrefour entre une variété de disciplines scientifiques telles que la géologie, la géotechnique, l'archéologie, la pédologie et l'agronomie.

L'originalité essentielle de cette thèse repose sur une étude des dépôts lœssiques au moyen d'une approche combinant les aspects géologiques, avec les caractéristiques mécaniques du matériau. Ces différents aspects seront intimement liés tout au long de la thèse. Une telle approche est peu courante. Elle permet de réunir plusieurs communautés scientifiques, géologues, géotechniciens et géomécaniciens, ayant parfois des approches, des connaissances et des opinions différentes, sur un même matériau : le lœss en l'occurrence. Du point de vue de la géologie de l'ingénieur, ce matériau superficiel est connu pour être relativement homogène, présentant peu de variabilité de son comportement mécanique. En lien avec la réalisation d'ouvrages du génie civil, la couche limoneuse présente habituellement une faible capacité portante et peut être sujette à des déformations non négligeables. Du point de vue géologique, le lœss est un dépôt sédimentaire formé d'horizons stratigraphiques distincts permettant de retracer les conditions paléoclimatiques au cours des dernières périodes glaciaires et interglaciaires. Une adaptation Du Chat de Philippe Geluck permet d'illustrer les différences de langage entre les deux communautés scientifiques...

*Face à un affleurement de lœss...*



Les différentes manières de parler d'un même objet nécessitent parfois quelques clarifications sur les termes utilisés. Afin de faciliter la compréhension du manuscrit, un lexique reprenant la plupart des mots de vocabulaire spécifiques mentionnés dans le texte est présenté en fin de document. Un exemple qui illustre bien les différences de point de vue entre les communautés scientifiques concernées est la définition du mot « sol ». Ce terme mérite d'emblée quelques précisions car il reviendra fréquemment tout au long de cette thèse. Quelques définitions sont développées ci-dessous :

- **de manière générale**, le sol est un terme polysémique servant aussi bien à désigner la couche labourée dans un champ, le bien foncier, le « terroir », un territoire, la surface de notre planète, un matériau, un terrain, et même un plancher dans différents types d'habitats (*Baize, 2004*).
- **en géotechnique**, le sol correspond à un agglomérat naturel constitué de particules solides, et d'espaces intergranulaires où se rencontrent un ou plusieurs fluides interstitiels (eau, air, gaz, etc.). Les particules solides proviennent de la désagrégation des roches par altération mécanique ou chimique sous l'effet d'agents naturels, de la décomposition d'organismes végétaux ou animaux, ou encore d'une activité industrielle (XP P94-010, 1996). Dans cette définition, le mot désigne des matériaux meubles tels que de l'argile, du limon, du sable, mais également des remblais, des niveaux caillouteux, et même des roches altérées. Il est d'usage commun de parler, par exemple, de « mécanique des sols », qui étudie les caractéristiques physiques et mécaniques de tels matériaux, ou encore d'une « éprouvette de sol », qui désigne un échantillon de sol taillé pour être analysé. Ce terme s'oppose habituellement aux roches, qui sont formées d'agrégats de minéraux formant un tout très cohérent. Les roches présentent habituellement des caractéristiques de résistance mécanique plus élevées que celles caractérisant les sols. On parle alors de milieux rocheux, dont les caractéristiques mécaniques sont étudiées par la « mécanique des roches ». Cependant, en géotechnique, la distinction entre « sol » et « roche » n'est pas toujours aussi explicite. En effet, dans certains contextes, le mot « sol » englobe également les matériaux rocheux. C'est le cas par exemple, lorsqu'on parle d'« essais de sol » ou de « reconnaissance de sol », où le mot « sol » désigne en réalité le sous-sol, qu'il soit meuble ou rocheux.
- **en géologie et en pédologie**, un sol est un produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent. Un volume de sol est constitué d'éléments solides, liquides et gazeux. Il s'agit d'un milieu complexe et dynamique évoluant sous l'influence de facteurs externes (hydrosphère, atmosphère et biosphère). Ses propriétés s'acquièrent sous l'action combinée de ces facteurs : la roche-mère s'altère sous l'influence du climat et d'une végétation pionnière, la matière organique se mélange au sol, des minéraux de la roche s'altèrent, la matière organique se dégrade lentement d'abord en humus frais, finalement en acide carbonique, eau, ammoniacque et nitrates. Enfin, des éléments minéraux et organiques peuvent être déplacés par l'eau de pluie infiltrée et différencier ainsi le sol en une succession de couches de texture, de structure et de couleurs différentes, appelées horizons. Le sol est donc une structure quadridimensionnelle (temps et espace) (Mathieu & Lozet, 2011 ; Foucault et al., 2014). Dans ce contexte, un « profil du sol » correspond à un profil pédologique où le sol est représenté par un ensemble d'horizons. Un « sol hydromorphe » est un sol qui s'est formé dans une zone saturée en eau de façon permanente ou périodique. **En agronomie**, le sol possède une définition assez semblable à celle utilisée par les géologues et les pédologues. Les investigations se limitent toutefois souvent à des profondeurs de l'ordre de quelques décimètres à un ou deux mètres.

Toujours concernant le mot « sol », afin d'éviter toute ambiguïté lors de la lecture de ce manuscrit, le sens approprié du terme est déterminée par le contexte auquel il s'applique. Voici ci-après deux exemples tirés de ce manuscrit pour illustrer ces propos.

*« La mesure de la résistance au frottement latéral local est le point de départ des systèmes de classification des sols au moyen de l'essai de pénétration statique »*

Dans cet exemple, le sens approprié du mot « sol » correspond à celui relatif à la géotechnique.

*« Un horizon brun, bioturbé et illuvié, correspondant à un sol boréal (...) »*

Dans cet exemple, la signification du mot « sol » se rapporte à la pédologie.

Une attention a été portée tout au long de la rédaction de ce manuscrit pour faciliter, autant que possible, la compréhension des notions, des résultats et des méthodes utilisées, qui ne sont, a priori, pas familiers à l'une ou à l'autre communauté scientifique. Cela nécessite parfois de vulgariser certains termes et certaines observations, alors qu'ils peuvent paraître évidents aux yeux de l'autre communauté. En fin de manuscrit, un lexique est à disposition du lecteur afin de faciliter la compréhension de certains termes plus spécifiques.

Une seconde originalité intrinsèque à cette thèse concerne l'étude multiéchelle réalisée sur le loess. L'organisation du manuscrit est d'ailleurs basée sur cette approche multiéchelle. Dans les premiers chapitres, le matériau est décrit et analysé selon une échelle d'étude très grande. La caractérisation du loess est ensuite progressivement complétée et affinée au travers des chapitres suivants où l'investigation est réalisée à des échelles de plus en plus petites. Une telle structuration du manuscrit est particulièrement intéressante car elle met en lumière les limitations et les apports de chaque échelle d'étude. De cette manière, il sera fréquent que certaines observations obtenues à une échelle donnée, trouvent une explication grâce aux analyses menées à une autre échelle d'étude. Les différentes échelles abordées dans ce travail couvrent un large spectre continu, depuis une échelle globale à une échelle microscopique, en passant par les échelles continentale, (supra)régionale, locale, et macroscopique. La signification de chacune des échelles d'étude abordées dans le travail est précisée en termes de dimension, à la Figure 1-1.

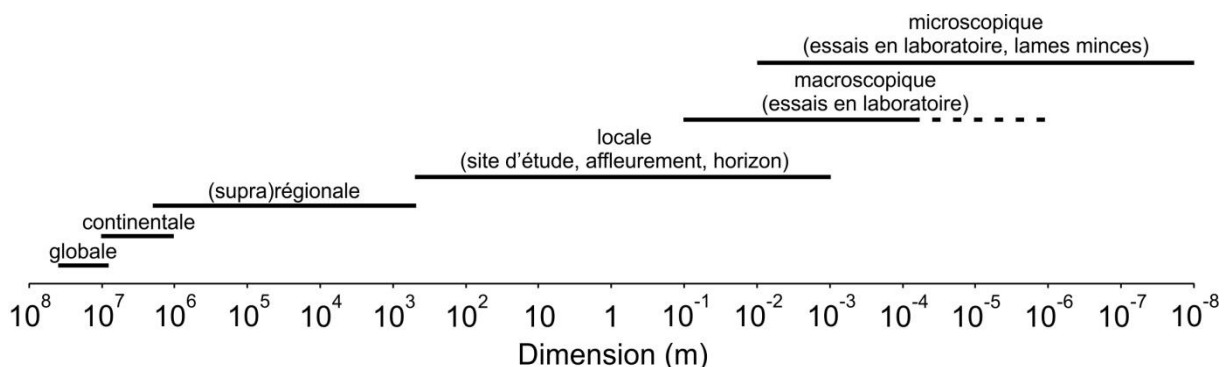


Figure 1-1 : Ordre de grandeur de la taille de l'entité considérée pour chacune des échelles d'étude abordées dans le manuscrit.

Un troisième aspect particulier de cette thèse se remarque par l'approche expérimentale utilisée pour caractériser les dépôts lœssiques. L'étude est réalisée au départ d'essais in situ et d'essais en laboratoire. L'essai qui est véritablement au cœur de ces recherches correspond à l'essai de pénétration statique. Il s'agit d'un essai géotechnique réalisé in situ. Il sera bien évidemment développé plus tard dans ce travail, où un chapitre à part entière lui est consacré. Les essais réalisés sur le matériau étudié sont nombreux et complémentaires. Ils sont listés ci-dessous. La simple lecture des types d'analyses réalisées, montrent bien la combinaison des approches géologique et géotechnique dans ce travail.

- **in situ** : essai de pénétration statique, tomographie de résistivité électrique, forage carotté ou à la tarière, mesure de résistance au pénétromètre de poche, description d'affleurement ;
- **en laboratoire** : essai œdométrique, essai triaxial, essai de cisaillement direct, analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, pycnomètre à gaz, limites d'Atterberg, diffractométrie des rayons X, spectrométrie de fluorescence des rayons X, teneur en matière organique, teneur en carbonates, porosimétrie par intrusion de mercure, observation de lames minces au microscope polarisant.

## 2. Objectifs

Les caractéristiques mécaniques du limon éolien sont peu connues, alors que c'est la couche sur laquelle sont fondés de nombreux bâtiments et ouvrages. C'est le constat qui est à l'initiative de ce travail. Il prévaut d'autant plus que le limon éolien se rencontre dans une région proche de la nôtre, c'est-à-dire de Liège, la Hesbaye. D'un point de vue géomécanique, le lœss est souvent considéré comme un matériau homogène alors que d'un point de vue géologique, ces dépôts sont caractérisés par une succession d'horizons bien distincts. Cette différence de point de vue mérite que l'on s'y attarde. Il s'agit du premier objectif de cette thèse. Il peut être formulé de la façon interrogative suivante :

**Est-il possible de distinguer des horizons stratigraphiques au sein de la couche lœssique, sur base des propriétés physiques et mécaniques du matériau ?**

Ce premier objectif nécessite d'étudier les dépôts lœssiques de manière précise et détaillée, en lien avec la stratigraphie. Une combinaison entre les aspects géologiques et les analyses géotechniques est indispensable pour mener à bien ce but. Au terme de ce travail, il sera alors possible de savoir si l'identification d'horizons stratigraphiques sur base d'une analyse géotechnique est envisageable. Si tel est le cas, une analyse multiéchelle approfondie sera menée afin de comprendre les raisons des variabilités des propriétés physiques et mécaniques observées, toujours en lien avec les aspects géologiques.

Comme il a déjà été mentionné précédemment, une originalité de cette thèse est la réalisation d'essais géotechniques à la fois in situ et en laboratoire, au départ du même matériau. Certaines variables géomécaniques peuvent être déterminées soit directement sur site, soit par l'analyse en laboratoire d'échantillons prélevés sur le site. Ces deux approches aboutissent parfois à la détermination de la même variable. Toutefois, puisque le mode opératoire est différent, leur détermination ne se fait pas de la même façon. De nombreuses corrélations, souvent empiriques, ont dès lors été proposées dans la littérature scientifique,

pour relier les variables déterminées entre un essai in situ et un essai en laboratoire. Cela amène au second objectif de cette thèse, développé sous la formulation suivante :

**Les corrélations entre certaines variables physiques et mécaniques obtenues in situ et en laboratoire, proposées dans la littérature, sont-elles vérifiées pour le matériau limoneux étudié ?**

Ce point concerne plutôt les aspects liés aux propriétés physiques et mécaniques du matériau investigué. Quelques corrélations très connues et souvent employées en géotechnique seront alors vérifiées pour un matériau limoneux. L'essai de pénétration statique est au centre de cette analyse, puisque les corrélations étudiées dans ce travail sont toutes issues de cet essai in situ.

### 3. Organisation de la thèse

L'introduction dont fait partie cette section, correspond au chapitre 1. En tout, le manuscrit compte sept chapitres, suivis par quelques annexes et la liste des références bibliographiques mentionnées dans le texte. Il se termine par un petit lexique afin de faciliter la compréhension de certains passages de la thèse. Les principaux chapitres du présent manuscrit s'articulent principalement sur l'approche multiéchelle :

**chapitre 2** : l'essai de pénétration statique

Puisque l'essai de pénétration statique est au cœur de la démarche expérimentale entreprise dans le cadre de cette thèse, il bénéficie d'un chapitre à part entière. Cet essai géotechnique y est décrit dans le détail. Son fonctionnement y est expliqué, et l'équipement en lien avec l'essai y est décrit. Les variables issues de l'essai de pénétration statique sont développées. Les applications pratiques faisant de cet essai, un moyen très utilisé pour caractériser le sol, sont ensuite parcourues plus en détail.

**chapitre 3** : étude à l'échelle régionale et suprarégionale

Ce chapitre tranche avec le précédent, car il précise les aspects plutôt géologiques en lien avec les contextes chronostratigraphique, lithostratigraphique et paléoclimatique des dépôts loessiques étudiés dans le cadre de ce travail. Il initie également l'analyse multiéchelle, en développant les échelles d'étude globale, continentale, suprarégionale et régionale sur le loess. Une analyse plus approfondie de l'échelle régionale, correspondant à la Hesbaye, y est présentée. C'est également dans ce chapitre qu'est développée la définition du loess.

**chapitre 4** : étude à l'échelle locale

Les investigations réalisées in situ sont développées dans ce chapitre. Elles émanent de l'étude détaillée de trois sites (Remicourt, Romont et Rocourt) localisés en Hesbaye. Les corrélations entre propriétés mécaniques et horizons géologiques sont présentées au travers de l'étude des trois sites. La démarche expérimentale qui prévaut dans ce chapitre, consiste à comparer les caractéristiques mécaniques obtenues in situ, avec la stratigraphie des dépôts loessiques observables par l'existence d'un affleurement à proximité. Cette étude se réalise à

l'échelle locale, c'est-à-dire, à l'échelle d'un site ou d'un affleurement. Les résultats de cette analyse sont également discutés en lien avec une application intéressante pour la prospection archéologique.

### **chapitre 5** : étude à l'échelle macroscopique

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus au départ d'essais en laboratoire. Ces derniers sont réalisés sur des échantillons dont la taille varie entre quelques cm<sup>3</sup> et un dm<sup>3</sup>, prélevés par carottage sur le site de Romont (Ében-Émael, Belgique). Ces échantillons macroscopiques sont analysés afin de préciser la caractérisation physique et mécanique du limon, au travers des essais suivants : essai œdométrique, essai triaxial, essai de cisaillement direct, analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, pycnomètre à gaz, limites d'Atterberg. C'est également dans ce chapitre qu'est développée l'étude consacrée à la comparaison entre les variables physiques et mécaniques mesurées en laboratoire, et celles acquises in situ au moyen de l'essai de pénétration statique.

### **chapitre 6** : étude à l'échelle microscopique

L'analyse à l'échelle microscopique est réalisée au départ d'échantillons de taille inférieure au cm<sup>3</sup>, provenant du site de Romont (Ében-Émael, Belgique). Elle constitue l'échelle d'étude la plus petite investiguée dans ce travail. Les différents résultats expérimentaux développés dans ce chapitre permettent de compléter la caractérisation physique, chimique et minéralogique au moyen des essais suivants : diffractométrie des rayons X, spectrométrie de fluorescence des rayons X, teneur en matière organique, teneur en carbonates, porosimétrie par intrusion de mercure, observation de lames minces au microscope polarisant. Les résultats apportés par ces différentes techniques d'analyses permettent de mieux comprendre certaines variations observées dans le comportement mécanique du limon investigué à des échelles d'étude plus grandes.

### **chapitre 7** : conclusions générales et perspectives

Ce chapitre synthétise les principaux résultats émanant d'une part de la caractérisation du limon éolien, en lien avec la stratigraphie, et d'autre part, de l'analyse des variables physiques et mécaniques obtenues au moyen de l'essai de pénétration statique et d'essais en laboratoire. Ces résultats aboutissent à quelques perspectives concrètes et originales, en lien avec la géotechnique et la prospection archéologique.

**Chapitre 2 :**  
**L'essai de pénétration statique**





## 1. Introduction

L'essai de pénétration statique (CPT) est un des essais d'investigation in situ parmi les plus communs en géotechnique. Il consiste à enfoncer une pointe de dimension normalisée dans le sol (au sens géotechnique du terme) à vitesse constante et d'en mesurer la résistance correspondante. Cette résistance est alors classiquement représentée graphiquement en fonction de la profondeur. Le CPT est au centre de l'étude expérimentale réalisée dans le cadre de ce travail. C'est pourquoi il fait l'objet d'un chapitre à part entière.

Le chapitre présente les résultats d'une étude bibliographique de synthèse. Il débute par un historique des développements technologiques réalisés autour de l'équipement utilisé, depuis le XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'à nos jours. Le déroulement d'un essai de pénétration statique actuel ainsi que les principaux paramètres acquis sont ensuite détaillés. Le CPT est un essai qui apporte des informations sur la stratigraphie des différentes couches recoupées, sur les types de sol (p.ex. sable, limon sableux, argile) rencontrés, ainsi que sur les paramètres mécaniques qui caractérisent chacun de ces sols. Ces différentes applications du CPT constituent le cœur de ce chapitre, et sont développées dans une section qui leur est propre. La dernière section se penche sur l'utilisation du CPT pour le dimensionnement de pieux vis-à-vis de la capacité portante. Cette section est développée afin de préciser comment le CPT intervient dans le dimensionnement de ce type d'ouvrage géotechnique, et permet de mieux appréhender toute la complexité de la cinématique de la rupture du sol autour de la pointe. Les théories qui y font référence seront en partie utilisées dans d'autres chapitres de ce travail.

## 2. Développements technologiques de l'essai CPT

### 2.1. La naissance de l'essai de pénétration

L'essai de pénétration trouve son origine parallèlement aux nombreuses recherches menées sur la mécanique des sols, dans le courant du XIX<sup>e</sup> siècle. Au début, l'essai de pénétration statique n'existait pas encore car l'enfoncement se réalisait par à-coups, de manière dynamique. C'est le français A. Collin qui, pour la première fois, en 1846, conçut un équipement de laboratoire consistant à enfoncer une tige de 1 mm de diamètre dans un sol argileux pour en estimer sa cohésion. La forme conique de la terminaison pénétrante de l'équipement est apparue dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Il s'agit au départ d'un cône avec un angle au sommet de 90°, directement suivi par le train de tiges. L'enfoncement est alors toujours dynamique (Sanglerat, 1972).

Il faut attendre 1932 pour voir le développement par le hollandais P. Barentsen du premier CPT proprement-dit, c'est-à-dire fonctionnant avec un enfoncement à vitesse constante (Barentsen, 1936). Une pointe conique de 10 cm<sup>2</sup> de section avec un apex de 60° était alors poussée dans le sol à la force des bras (Figure 2-1). Le cône pouvait être enfoncé indépendamment du reste par l'intermédiaire de tiges intérieures coulissant dans un train de tubes extérieurs. La force nécessaire à l'enfoncement de l'équipement était alors lue sur un manomètre situé à l'aplomb des tiges et des tubes. Le principe du fonctionnement du CPT était né mais ce n'est pas pour autant que cet appareil fut fréquemment utilisé. En effet, la limitation majeure résidait dans la force maximale disponible pour enfoncer le cône et les trains de tiges et de tubes. En réalité, cet appareil fut plutôt utilisé à des fins de recherche en lien avec des sols tourbeux ou argileux.

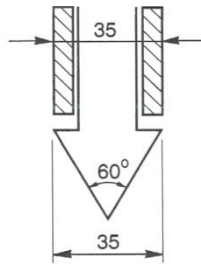


Figure 2-1 : Illustration de la pointe M4 développée pour le premier pénétromètre hollandais (d'après Sanglerat, 1972). Les longueurs sont exprimées en mm.

Dans l'optique d'ouvrir les CPT à de nouveaux contextes géotechniques plus variés, tout en atteignant des profondeurs d'investigation plus importantes, le Laboratoire de Géomécanique (« Laboratorium voor Grondmechanica ») de l'Université de Delft réalisa le premier CPT qualifié de « profond » en 1935. Ce dernier fut effectué au moyen d'un pénétromètre capable d'atteindre une force d'enfoncement de 10 T (100 kN) (Figure 2-2). Avant de réaliser l'essai de pénétration, une excavation de 2x3 m<sup>2</sup> et d'un mètre de profondeur devait être effectuée. La machine était alors posée sur un lit planches de bois recouvrant le fond de l'excavation. La cavité était ensuite comblée par du sable, dont le poids servait à fournir la force de réaction nécessaire pour atteindre les 10 T. Un seul essai pouvait ainsi prendre jusqu'à trois jours. Des systèmes d'ancrage du pénétromètre dans le sol ont par la suite permis d'atteindre une force de réaction de 10 T sans devoir réaliser d'excavation.

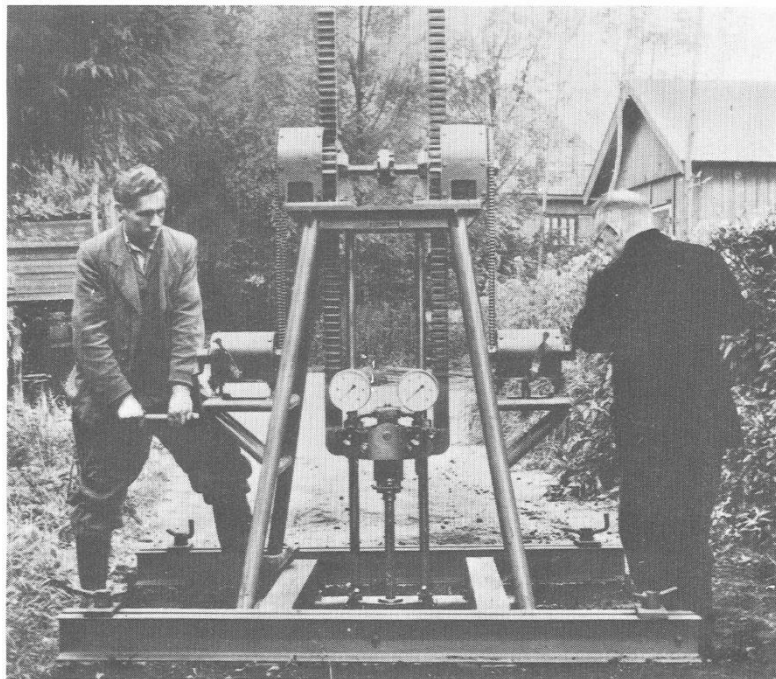


Figure 2-2 : Le pénétromètre hollandais, capable d'atteindre une capacité de 10 T (d'après Sanglerat, 1972).

## 2.2. Des pointes mécaniques de plus en plus sophistiquées

En 1948, la pointe mécanique originelle fut modifiée par l'ajout d'une partie conique dans le prolongement en arrière du cône (Vermeiden, 1948). Cet apport sert à empêcher au sol de se loger entre les tiges intérieures et les tubes extérieurs et ainsi fausser les mesures. Cette pointe, appelée cône à jupe (ou « jacket cone », ou encore « M1 mantle cone » en anglais) inventée par J. Vermeiden du Laboratoire de Géomécanique de l'Université de Delft, est une version améliorée de la pointe proposée par P. Barentsen. La pointe de type M1 est toujours couramment utilisée dans certaines parties du monde, et notamment en Belgique.

Le déroulement d'un essai de pénétration statique muni de la pointe de type M1 se réalise de manière discontinue, par des cycles en trois temps. La configuration initiale de la pointe est illustrée à la Figure 2-3 (a). Le cône seul est d'abord enfoncé par l'intermédiaire du train de tiges intérieures, sur une profondeur de 6,5 cm. La pointe occupe alors une configuration représentée sur la Figure 2-3 (b). La force nécessaire est enregistrée et permet de déterminer la résistance au cône ( $q_c$ ). Ensuite, seul le train de tubes extérieurs est descendu afin de retrouver une pointe en position initiale mais 6,5 cm plus bas (Figure 2-3 (c)). Le cône et le train de tubes extérieurs sont alors enfoncés simultanément sur une profondeur de 13,5 cm. La force nécessaire est enregistrée et correspond à un effort total ( $R_T$ ). La résistance de frottement latéral total ( $Q_{st}$ ) peut dès lors être déduite. À ce stade, la pointe a alors parcouru 20 cm dans le sol depuis sa position initiale (Figure 2-3 (d)). Une série de cycles supplémentaires de mesures sont alors réalisés jusqu'au terme de l'essai de pénétration.

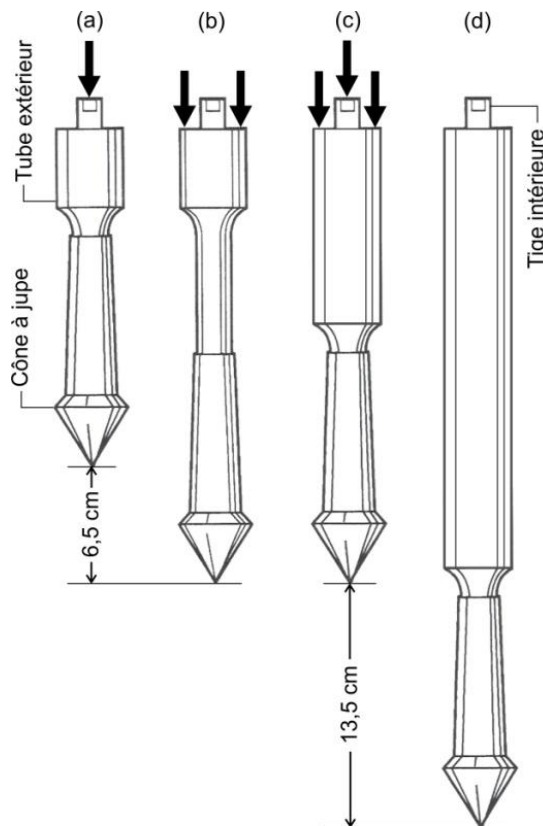


Figure 2-3 : Le cône à jupe ou cône de type M1.

H. Begemann apporta en 1953 une partie supplémentaire au cône à jupe, capable de mesurer la résistance au frottement latéral local, le long d'un manchon de frottement d'une longueur de 134 mm (pour une surface de frottement habituelle de 150 cm<sup>2</sup>), situé en arrière du cône. Cette nouvelle pointe est appelée cône de Begemann, ou encore pointe de type M2

(ou « friction jacket cone » en anglais). Cette pointe est encore parfois utilisée aujourd'hui. La mesure de la résistance au frottement latéral local est le point de départ des systèmes de classification des sols au moyen de l'essai de pénétration statique (Begemann, 1965). Cette mesure du frottement latéral local est préférée au frottement latéral total, moins précis. Puisqu'il n'était plus nécessaire de connaître le frottement latéral total, un anneau réducteur de frottement, de diamètre légèrement plus large que celui des tubes extérieurs, pouvait le cas échéant, être placé en arrière de la pointe afin d'atteindre des profondeurs plus importantes.

Le déroulement d'un cycle de mesures au moyen d'une pointe de type M2 se réalise en quatre étapes. La configuration initiale de la pointe est illustrée à la Figure 2-4 (a). Le cône seul est d'abord enfoncé sur une course de 4 cm par l'intermédiaire du train de tiges intérieures (Figure 2-4 (b)). La force nécessaire pour enfoncer le cône ( $Q_c$ ) est alors mesurée et permet de déterminer la résistance au cône ( $q_c$ ). L'action sur le train de tiges intérieures est ensuite poursuivie sur 3,5 cm supplémentaires (Figure 2-4 (c)). Le cône et le manchon de frottement sont alors enfoncés simultanément. Une force totale est mesurée. La résistance de frottement latéral local ( $f_s$ ) est déduite, en ayant préalablement soustrait la force liée à l'enfoncement du cône seul, à la force totale mesurée. La troisième étape consiste à enfoncer uniquement le train de tubes extérieurs afin de retrouver une configuration refermée de la pointe (Figure 2-4 (d)). L'ensemble de la pointe est finalement enfoncé sur une profondeur de 12,5 cm sans enregistrer de mesure (Figure 2-4 (e)). Un nouveau cycle de mesures peut alors recommencer, 20 cm plus bas par rapport à la position initiale du cycle précédent.

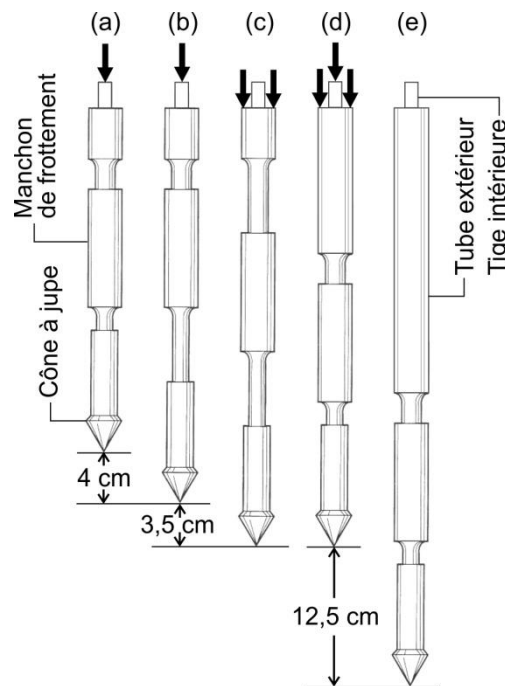


Figure 2-4 : Le cône de Begemann ou cône de type M2, équipé d'un manchon de frottement.

À partir des années 1960, le pénétromètre est de plus en plus souvent incorporé dans un véhicule, facilitant sa mobilisation et permettant d'atteindre des capacités plus importantes en raison du poids propre du véhicule. Le premier pénétromètre capable d'atteindre une force d'enfoncement de 175 kN (17,5 T) est développé par la Goudsche Machinefabriek en 1968 (Sanglerat, 1972).

2.3. L'arrivée de la pointe électrique

Les désavantages des pointes mécaniques sont de plus en plus souvent mis en évidence, à mesure que l'essai atteint des profondeurs importantes. Le problème principal rencontré, et ce quelque soit le type de pointe mécanique utilisé, est engendré par des frottements parasites entre les tiges intérieures et la surface interne des tubes extérieurs. Les premières expérimentations sur des pointes électriques, fonctionnant au moyen de capteurs de force électriques situés dans la tige, ont été réalisées aux Pays-Bas à partir de la fin des années 1940. C'est finalement Fugro, en 1965, qui a été le premier à utiliser une pointe électrique pour les investigations de routine (Figure 2-5 (a)). Les pointes électriques n'ont plus besoin d'être équipées en tiges internes. Elles ne sont donc pas confrontées au problème d'interférences entre les tiges internes et les tubes externes. De plus, les pointes électriques donnent accès à une mesure des propriétés du sol recoupé en continu (tous les centimètres) avec la profondeur. L'enfoncement de l'ensemble de la pointe se réalise aussi en continu. Ceci permet d'éviter des déplacements indésirables du sol pouvant se produire lorsque les différentes parties de la pointe avancent en alternance. Les mesures de résistance au cône et de frottement latéral local sont donc plus simples à réaliser et sont considérées comme étant plus fiables. Les premières pointes électriques sont d'abord reliées à une imprimante, puis à un système de stockage des données acquises, puis plus tard à un ordinateur.

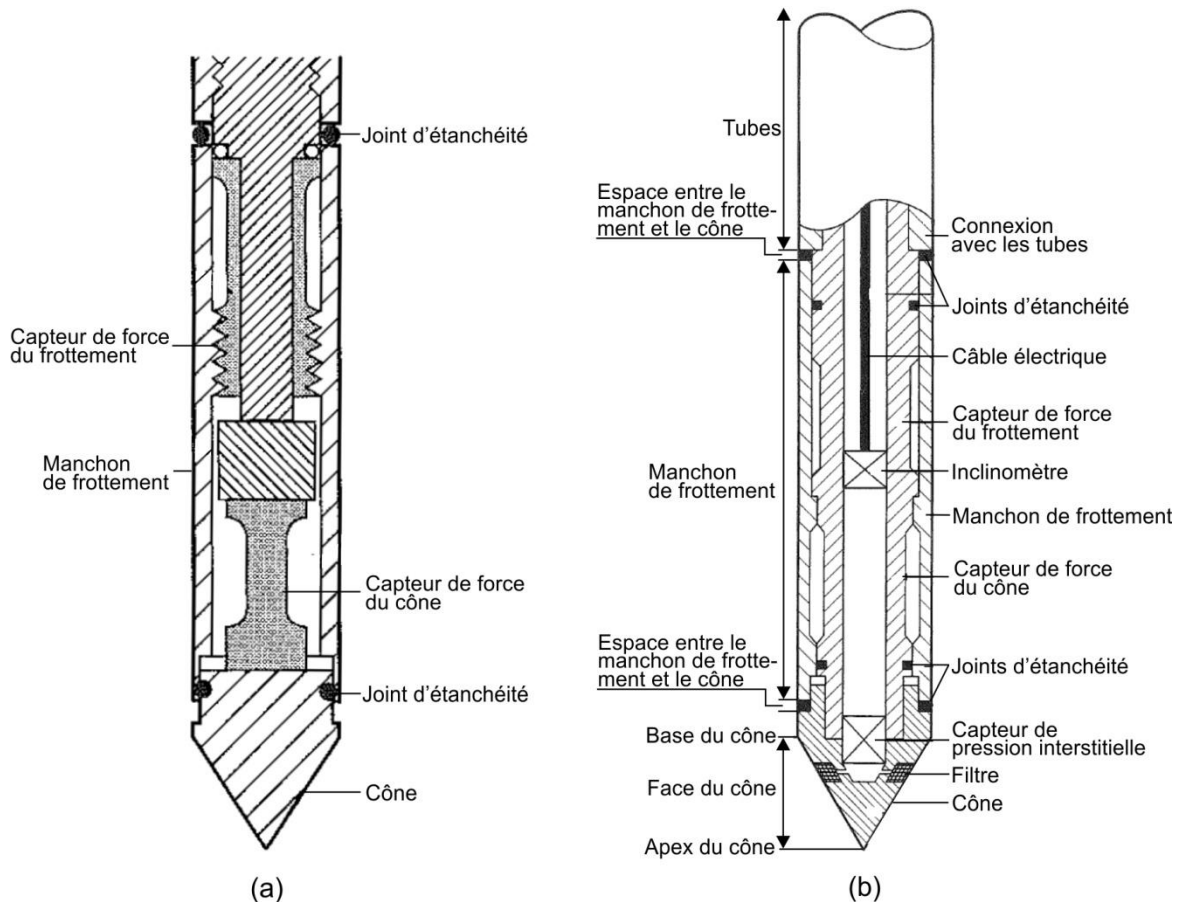


Figure 2-5 : Coupes schématiques (a) d'une pointe électrique, (b) d'un piézocône (modifié, d'après Lunne et al., 1997).

C'est vers le milieu des années 1970 qu'a été développé le premier piézocône. Il s'agit d'un cône électrique capable de mesurer, en plus de la résistance au cône et de la résistance de frottement latéral local, la pression interstitielle in situ en cours de pénétration (Figure 2-5 (b)). Cette mesure permet d'accroître la précision sur la détermination des types

de sol rencontrés. Le piézocône est à la base de très nombreuses recherches sur les propriétés mécaniques des sols à partir des années 1980, et plus particulièrement aux États-Unis, au Canada, dans les pays scandinaves et aux Pays-Bas. C'est à ce moment qu'est introduite la résistance au cône totale corrigée ( $q_t$ ) qui tient compte, en milieu saturé, des effets de la pression interstitielle agissant en arrière de la base du cône. Ce phénomène sera développé plus tard dans ce chapitre. Les résultats de recherches menées au moyen d'un piézocône sont toujours foisonnants aujourd'hui dans la littérature scientifique.

La pointe électrique telle qu'elle a été élaborée par Fugro, a par la suite été complétée par toute une série d'équipements de mesure supplémentaires afin de répondre à des demandes toujours plus variées, et notamment environnementales. Ces équipements supplémentaires consistent par exemple en : un inclinomètre, un pressiomètre, une sonde de température, des géophones (mesure de la vitesse de propagation des ondes sismiques), une caméra, une sonde de mesure de la conductivité/résistivité électrique, une sonde de mesure des radioisotopes ou encore, une sonde de mesure du pH.

### 2.4. L'essai de pénétration statique offshore

Les essais de pénétration statique peuvent également être réalisés depuis une barge ou un bateau. La conquête du milieu marin a débuté vers les années 1970. La technologie est aujourd'hui capable de sonder des fonds océaniques profonds de plus de 3000 m. Pour les essais effectués en eau peu profonde (profondeur < 30-40 m), l'équipement et les procédures sont similaires aux essais sur terre. L'essai est alors réalisé depuis une barge ou une plateforme, prémunie le cas échéant d'un système de contrôle capable d'empêcher un chargement cyclique engendré par les effets des vagues ou de la houle. Un équipement spécifique est par contre nécessaire pour les travaux en eau profonde (profondeur > 30-40 m). Deux techniques principales existent pour les essais de pénétration à grande profondeur. L'une nécessite la réalisation d'un préforage jusqu'à la profondeur désirée (mode « down-hole CPT »). Le forage peut être contrôlé depuis la surface, ou bien au moyen d'un module ancré sur le fond marin. Ensuite, l'équipement nécessaire à l'essai de pénétration est introduit dans le forage et l'essai débute à partir du fond du forage. Si nécessaire, après une première pénétration, le forage peut être poursuivi et l'essai de pénétration peut alors être répété plus bas. Cette technique offre comme avantages une profondeur de pénétration importante et la possibilité de réaliser l'essai de pénétration dans des couches relativement résistantes. Actuellement, les systèmes les plus avancés permettent de réaliser des forages avec échantillonnage, couplés à la réalisation de CPT, à partir d'un fond marin situé à une profondeur atteignant jusqu'à 3000 m (par la société Gregg Drilling & Testing (USA)). L'autre technique n'est pas couplée à la réalisation d'un forage. Dans ce cas, l'essai de pénétration est réalisé au départ d'un module ancré sur le fond marin (mode « seabed ») (Figure 2-6). Dans les conditions les plus favorables, cette technique peut atteindre une profondeur de pénétration de l'ordre de 50 m. Actuellement, il est possible de sonder les fonds marins situés à une profondeur maximale de 4000 m (par le Centre de Sciences Environnementales Marines de l'Université de Brême (MARUM), Allemagne) (Lunne *et al.*, 1997 ; Lunne, 2012 ; Jorat *et al.*, 2014).

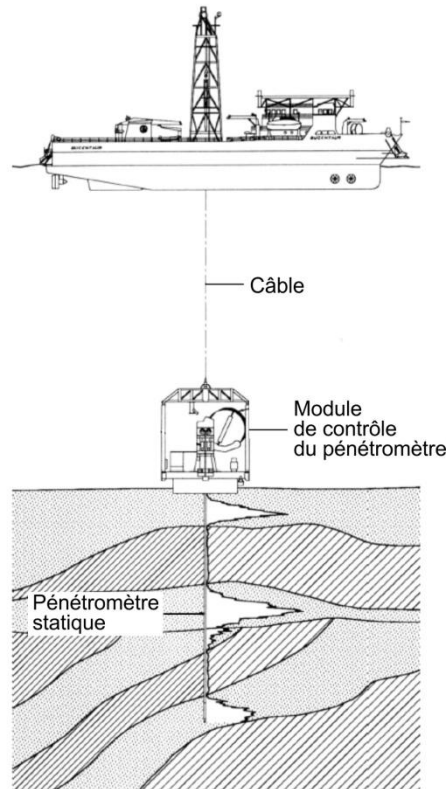


Figure 2-6 : Exemple d'essai de pénétration statique réalisé depuis le fond marin (mode « seabed ») (modifié, d'après Lunne, 2012).

### 3. Principes et fonctionnement

Aujourd'hui, un essai de pénétration statique consiste à enfoncer une pointe conique et un train de tiges dans le sous-sol, à une vitesse constante de  $2 \pm 0,5$  cm/s. La force d'enfoncement est fournie depuis la surface par des vérins hydrauliques qui convertissent le poids propre du véhicule servant à la réalisation de l'essai ou la résistance à la traction d'un système d'ancrage du véhicule. Les pointes utilisées possèdent des dimensions standardisées, caractérisées par un angle au sommet de  $60^\circ$  et une superficie de la section à la base ( $A_c$ ) de  $10 \text{ cm}^2$  (le diamètre équivaut à  $35,7 \text{ mm}$ ). En conséquence aux nombreux développements technologiques mentionnés ci-avant, plusieurs types de pointe ont été conçus, mécanique ou électrique, permettant d'acquérir plus ou moins de paramètres. L'enfoncement se réalise de manière continue ou discontinue, en fonction du type de pointe utilisé. La force nécessaire pour enfoncer la pointe et/ou le train de tiges est mesurée classiquement tous les  $20 \text{ cm}$  pour les pointes mécaniques et tous les centimètres pour les pointes électriques. Les valeurs de résistance à l'enfoncement ainsi mesurées sont ensuite reportées graphiquement en fonction de la profondeur. Les modes opératoires des essais utilisant une pointe mécanique ou une pointe électrique sont définis dans les normes internationales ASTM D3441-05 (2005) et ASTM D5778-12 (2012), respectivement.

#### 4. Principaux paramètres mesurés et calculés

Différents paramètres peuvent être mesurés et calculés à partir d'un essai de pénétration statique. Les paramètres accessibles dépendent du type de pointe utilisé. Les plus fréquemment mesurés sont développés ci-après.

- La résistance au cône ( $q_c$ ) :

La résistance au cône constitue le paramètre par excellence issu de tout essai de pénétration statique, quelque soit le type de pointe utilisé. Cette résistance est calculée à partir de la force rencontrée ( $Q_c$ ) pour enfoncer la partie conique de la pointe. La résistance au cône équivaut à une contrainte qui s'exprime en MPa. Elle se calcule comme suit :

$$q_c = Q_c / A_c \quad (2-1)$$

où :

- $q_c$  = la résistance au cône, exprimée en MPa (ou parfois en ton/ft<sup>2</sup>, kgf/cm<sup>2</sup> ou bar),
- $Q_c$  = la force rencontrée par le cône, et
- $A_c$  = la surface de la base du cône, typiquement 10 cm<sup>2</sup>.

- La résistance au cône totale corrigée ( $q_t$ ) :

Ce paramètre peut être calculé à partir de mesures réalisées par une pointe électrique capable de déterminer la pression interstitielle du milieu recoupé. Dans un milieu saturé, la pression interstitielle agit sur les parties extérieures de la pointe, mais également sur les surfaces internes et notamment sur une section de la face arrière du cône, accessible à l'eau. Cette pression d'eau agit dans le sens de la pénétration. Il en résulte que la résistance au cône mesurée lors d'un essai en condition saturée est inférieure à la valeur de contrainte totale réellement présente dans le milieu situé aux alentours immédiats du cône (Robertson & Campanella, 1983). La résistance au cône mesurée est donc affectée par la géométrie de la pointe, et plus particulièrement par le rapport entre la surface totale de la base du cône ( $A_c$ ) et la superficie de la face arrière du cône non accessible à l'eau ( $A_n$ ) (Figure 2-7). Ce rapport de surface varie entre 0,55 et 0,9 pour la plupart des pointes électriques (Lunne *et al.*, 1997). Afin de s'affranchir de cette influence, Campanella *et al.* (1982) ont introduit le paramètre  $q_t$  qui se détermine de la façon suivante :

$$q_t = q_c + u_2(1 - A_n/A_c) \quad (2-2)$$

où :

- $q_t$  = la résistance au cône totale corrigée, exprimée en MPa,
- $q_c$  = la résistance au cône mesurée,
- $u_2$  = la pression interstitielle agissant sur la face arrière du cône,
- $A_c$  = la surface de la base du cône, et
- $A_n$  = la surface de la face arrière du cône, sur laquelle n'agit pas  $u_2$ .

En milieu partiellement saturé,  $q_t$  équivaut à  $q_c$ .



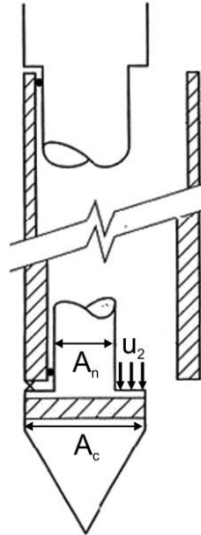


Figure 2-7 : Effet de la pression interstitielle sur la résistance au cône (modifié, d'après Lunne et al., 1997).

- La résistance de frottement latéral local ( $f_s$ ) :

Elle se mesure par l'intermédiaire d'un manchon de frottement d'une superficie de 150 cm<sup>2</sup> (ce qui correspond à une hauteur de 133,7 mm pour un diamètre de 35,7 mm), situé en arrière du cône. Ce paramètre s'exprime en kPa et se calcule de la manière suivante :

$$f_s = Q_s / A_s \quad (2-3)$$

où :

- $f_s$  = la résistance de frottement latéral local, exprimée en kPa (ou parfois en ton/ft<sup>2</sup>, kgf/cm<sup>2</sup> ou bar),
- $Q_s$  = la force rencontrée le long du manchon de frottement, et
- $A_s$  = la surface du manchon de frottement, typiquement 150 cm<sup>2</sup>.

- La résistance de frottement latéral total ( $Q_{st}$ ) :

Ce paramètre est parfois utilisé dans l'interprétation d'essais de pénétration statique réalisés au moyen d'une pointe mécanique dépourvue de manchon de frottement. Il constitue donc une mesure de la force de frottement entre le train de tubes et le sol environnant. La surface de frottement n'étant pas connue, ce paramètre s'exprime en kN. Il se calcule ainsi :

$$Q_{st} = R_T - Q_c \quad (2-4)$$

où :

- $Q_{st}$  = la force de frottement latéral total rencontrée par le train de tubes extérieurs, exprimée en kN,
- $R_T$  = la force totale rencontrée par le cône et le train de tubes extérieurs, et
- $Q_c$  = la force rencontrée par le cône.

- Le rapport de frottement ( $R_f$ ) :

Ce paramètre est mieux connu sous sa dénomination anglophone de « friction ratio ». Il se calcule à partir de la résistance au cône ( $q_c$  ou plus généralement  $q_t$ ) et du frottement latéral local ( $f_s$ ). Le rapport de frottement est un paramètre très utilisé dans l'interprétation des résultats issus du CPT. Il intervient notamment dans les systèmes récents de classification des

sols et dans certaines normes relatives au dimensionnement de pieu, comme c'est le cas en Belgique par exemple (CSTC, 2016). Le rapport de frottement se détermine comme suit :

$$R_f = f_s/q_t \quad (2-5)$$

où :

- $R_f$  = le rapport de frottement, exprimé en %, varie entre 0 et 10 % pour la grande majorité des types de sol,
- $f_s$  = la résistance de frottement latéral local, et
- $q_t$  = la résistance au cône totale corrigée, qui équivaut à la résistance au cône ( $q_c$ ) en milieu partiellement saturé.

- L'inclinaison de la pointe :

Un essai de pénétration statique est supposé investiguer le sol verticalement. Cependant, des inclinomètres positionnés dans la pointe ont montré que c'est parfois loin d'être le cas. En cours de pénétration, la pointe dévie habituellement d'autant plus de sa position verticale initiale que la profondeur d'investigation est importante et que des niveaux de résistances assez différentes sont recoupés. La déviation de la pointe engendre également un biais par rapport à la profondeur réelle des couches recoupées (Figure 2-8). Pour éviter d'éventuelles imprécisions dans les valeurs mesurées et de risquer d'endommager l'équipement, les normes suggèrent d'arrêter l'essai de pénétration lorsque la pointe dévie de plus de 5° par rapport à la verticale pour un enfoncement de 1 m ou dévie de 12° sur 10 m (ASTM D5778-12, 2012). Ce contrôle est rendu possible pour les pointes électriques équipées d'un inclinomètre, mais ne l'est pas pour les autres, et notamment les pointes mécaniques.

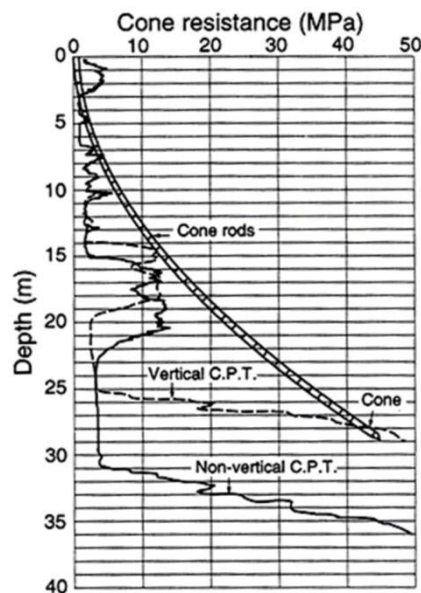


Figure 2-8 : Effet de l'inclinaison de la pointe en cours d'enfoncement sur la profondeur mesurée (d'après Bruzzi & Battaglio, 1987).

## 5. Introduction à l'interprétation de l'essai de pénétration statique

Le Tableau 2-1 suivant reprend les principales applications du CPT et les compare avec d'autres essais géotechniques in situ très fréquents, comme l'essai de pénétration dynamique (DPL), l'essai pressiométrique ou encore l'essai à la plaque. Il en ressort que l'essai de pénétration statique s'applique aux matériaux meubles allant du sable à l'argile, en incluant également la tourbe. Le CPT n'est, par contre, pas adapté aux graviers en raison de leur grande résistance à la pénétration. Par ailleurs, le CPT est particulièrement approprié pour les analyses stratigraphiques. Il est également capable d'identifier les types de sol recoupés. L'essai de pénétration statique permet aussi de déterminer, avec des degrés de fiabilité variables selon les cas, des paramètres mécaniques relatifs aux couches recoupées.

Deux remarques sont toutefois à préciser concernant la lecture du Tableau 2-1. La première concerne les différents niveaux de fiabilité ou de qualité des mesures qu'offre un essai donné pour déterminer les paramètres mentionnés. Cette notion d'applicabilité ne tient pas compte du type de sol analysé. Certains paramètres sont en effet plus pertinents dans certains types de sols que dans d'autres. La deuxième remarque concerne la comparaison de l'applicabilité entre un CPT muni d'une pointe électrique et d'un piézocône. Des différences sont mises en évidence dans ce tableau. Elles s'appliquent au milieu saturé pour lequel l'utilisation d'une pointe électrique limite les qualités d'application par rapport à un piézocône. Par contre, en milieu partiellement saturé, les qualités d'application de la pointe électrique équivalent celles correspondant au piézocône.

La suite de cette section présente, au travers d'un travail bibliographique de synthèse, différentes applications résultant de l'analyse de mesures issues du CPT. Les applications qui sont abordées concernent :

- l'analyse stratigraphique lorsque la pointe recoupe des couches ayant des résistances mécaniques plus ou moins différentes. Des modèles à deux et à trois couches sont alors étudiés ;
- la classification des sols au moyen de diagrammes développés à cet effet ;
- la détermination de paramètres mécaniques relatifs au sol recoupé.

### 5.1. Analyse stratigraphique

L'essai de pénétration statique s'applique particulièrement bien à l'étude de la stratigraphie du sous-sol (Tableau 2-1). À ce titre, les pointes électriques présentent un avantage sur les pointes mécaniques car les caractéristiques du matériau recoupé sont mesurées en continu (tous les centimètres) en fonction de la profondeur. Les données acquises par une pointe électrique pourront dès lors mener à une analyse plus fine et détaillée de la stratigraphie.

Cependant, les valeurs de résistance au cône sont influencées aux alentours d'une interface entre deux matériaux de caractéristiques mécaniques différentes. Il en résulte que la transition d'un matériau à l'autre ne va pas être enregistrée par un changement brusque de la résistance au cône. Il a été démontré expérimentalement et numériquement par l'étude de modèles à deux couches que la distance d'influence de l'interface sur la mesure de la résistance au cône est fonction de différents paramètres. La Figure 2-9 montre des résultats obtenus par simulations numériques utilisant une loi de comportement élasto-plastique, avec comme critère de rupture, le critère de Mohr-Coulomb. Les valeurs des paramètres utilisées dans le modèle ont préalablement été calibrées sur des résultats expérimentaux (Ahmadi *et al.*, 2005).

Tableau 2-1 : Les domaines d'application et l'utilité de différents essais géotechniques in situ (d'après Lunne et al., 1997).

Essais	Paramètres							Types de sol						
	Type sol	Strati	u	$\phi'$	$s_u$	$I_D$	$m_v$	Roche dure	Roche tendre	Grav.	Sable	Lim.	Arg.	Tourbe
CPT														
Mécanique	B	A/B	–	C	C	B	C	–	C	C	A	A	A	A
Électrique	B	A	–	C	B	A/B	C	–	C	C	A	A	A	A
Piézocône	A	A	A	B	B	A/B	B	–	C	–	A	A	A	A
DPL	C	B	–	C	C	C	–	–	C	B	A	B	B	B
Pressiomètre	B	B	–	C	B	C	B	A	A	B	B	B	A	B
Essai à la plaque	C	–	–	C	B	B	B	B	A	B	B	A	A	A

Applicabilité : A = élevée ; B = modérée ; C = faible ; – = aucune. Définition des paramètres de sol : u = pression interstitielle in situ ;  $\phi'$  = angle de frottement interne effectif ;  $s_u$  = résistance au cisaillement non drainé ;  $I_D$  = indice de densité ;  $m_v$  = coefficient de compressibilité. Autres abréviations : DPL = essai de pénétration dynamique léger (« Dynamic Penetration Light » en anglais) ; Strati. = stratigraphie ; Grav. = gravier ; Lim. = limon ; Arg. = argile.

Ainsi, les paramètres faisant varier la distance d'influence de l'interface sont : la densité relative des matériaux et de l'état de contrainte initial. Ce dernier est essentiellement dicté par la contrainte horizontale (Figure 2-9 (d)) ; la contrainte verticale joue peu sur la distance d'influence de l'interface. En outre, la distance d'influence est d'autant plus grande que le matériau recoupé par la pointe est dense et raide. A titre indicatif, cette distance représente entre 10 et 20 fois le diamètre du cône utilisé dans un sable dense (Figure 2-9 (a) et Figure 2-9 (b)) et seulement 2 à 3 fois son diamètre dans une argile tendre (Figure 2-9 (c)) (Lunne *et al.*, 1997 ; Ahmadi & Robertson, 2005). Ces valeurs correspondent à la distance d'influence à l'approche de l'interface. Cette distance est habituellement plus faible en arrière de l'interface. Par ailleurs, la Figure 2-9 (d) met en évidence l'influence de la contrainte effective horizontale sur la valeur de la résistance au cône. Cette dernière est pratiquement doublée en passant d'une contrainte effective horizontale de 100 kPa à 500 kPa. La contrainte verticale effective reste quant à elle inchangée.

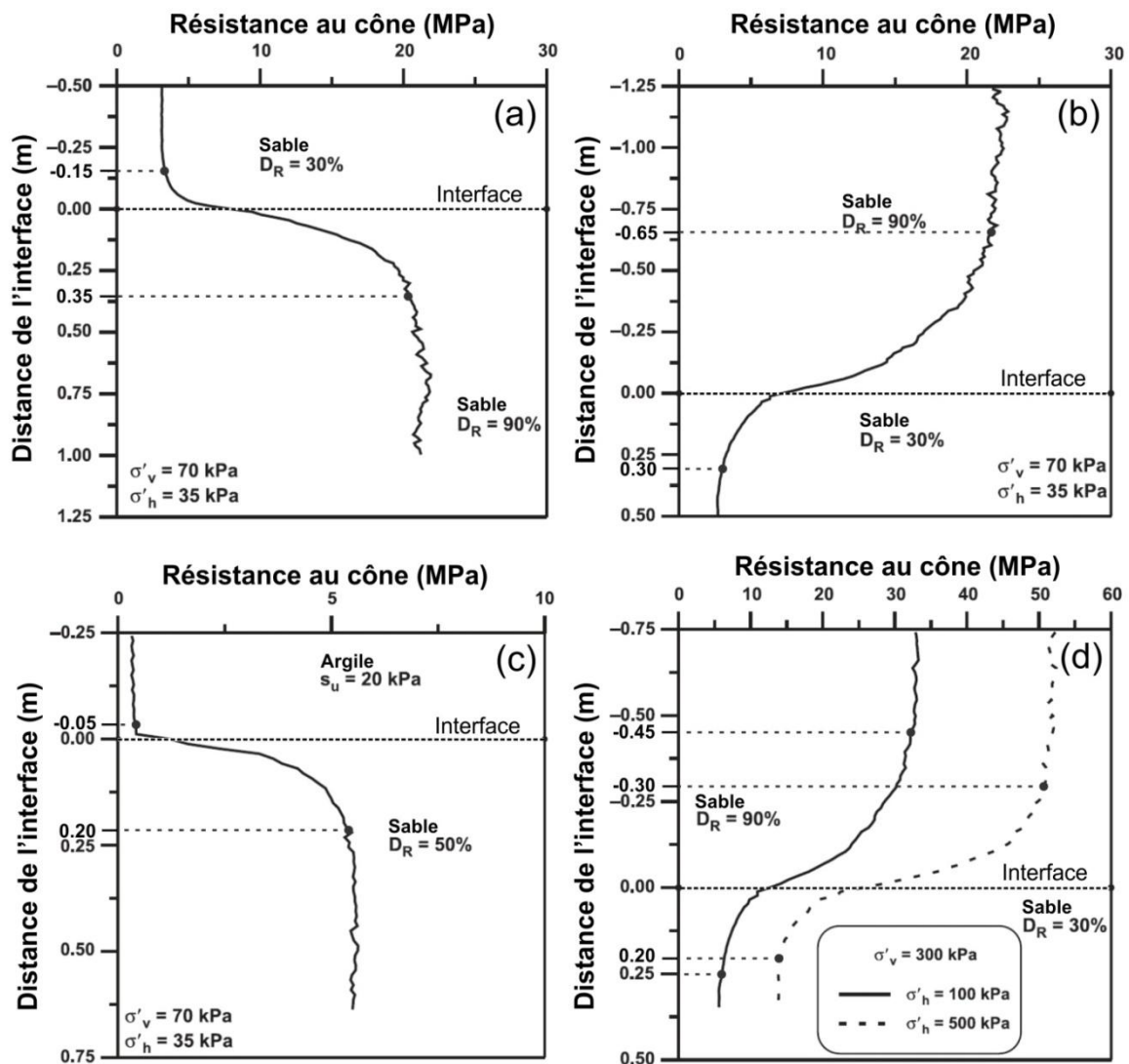


Figure 2-9 : Résultats de simulations numériques sur l'évaluation de la résistance au cône pour différents modèles bicouches (modifié, d'après Ahmadi & Robertson, 2005). Le cône modélisé possède les dimensions classiques avec une section de 10 cm<sup>2</sup> et un diamètre de 35,7 mm. (a) Entre un sable lâche surmontant un sable dense. (b) Entre un sable dense surmontant un sable lâche. (c) Entre un sable moyennement dense surmonté par une argile tendre. (d) Effet de la contrainte horizontale effective entre un sable dense surmontant un sable lâche.

Dans les modèles à trois couches où la couche centrale est trop peu épaisse, la résistance au cône correcte (c'est-à-dire sans influence des couches environnantes) n'est pas atteinte (Figure 2-10 (a)). Elle est soit sous-estimée si la couche centrale est plus résistante que les couches environnantes, soit surestimée dans le cas contraire. Pour prendre en compte l'influence des couches environnantes sur les mesures relatives à la couche centrale, un facteur de correction ( $K_H$ ) a été introduit afin de calculer la résistance au cône corrigée ( $q_{c^*}$ ). Ce facteur de correction se base sur un modèle où la couche centrale est plus résistante que les couches environnantes, par exemple une couche de sable interstratifiée entre deux couches d'argile. Uniquement dans ce cas, la résistance au cône corrigée s'obtient par :

$$q_{c^*} = K_H \cdot q_{cB} \quad (2-6)$$

où :

- $q_{c^*}$  = la résistance au cône corrigée pour une couche fine plus résistante que les couches environnantes,
- $K_H$  = un coefficient de correction de la résistance au cône, qui est fonction de l'épaisseur de la couche et du diamètre du cône, et
- $q_{cB}$  = la résistance au cône mesurée au sein de la couche fine plus résistante.

Basée sur une solution élastique simplifiée, Vreugdenhil *et al.* (1994) ont établi une relation entre  $K_H$  et l'épaisseur de la couche mince ( $H$ ), pour différents rapports  $q_{cA}/q_{cB}$ , pour une pointe de 10 cm<sup>2</sup> de section (Figure 2-10 (b)). Il a été proposé par la suite de restreindre cette correction au cas le plus sécuritaire qui équivaut à  $q_{cA}/q_{cB} = 2$  (Robertson & Fear, 1995). Des données expérimentales supplémentaires ont ensuite montré que le cas considéré comme sécuritaire ne l'est en réalité pas suffisamment (Castro & Robertson, 1997, rapport non publié). Youd *et al.* (2001) ont finalement proposé de considérer la courbe enveloppe inférieure issues des résultats expérimentaux de Castro et Robertson pour déterminer  $K_H$  en fonction de  $h/B$ . Cette courbe enveloppe possède l'équation suivante :

$$K_H = 0,25[(h/B)/17 - 1,77]^2 + 1,0 \quad (2-7)$$

où :

- $h$  = l'épaisseur de la couche centrale, et
- $B$  = le diamètre du cône (équivalent à 35,7 mm pour un cône de 10 cm<sup>2</sup> de section).

Ce coefficient de correction est d'autant plus grand que la différence de résistance entre la couche centrale et les couches environnantes est grande et que l'épaisseur de la couche centrale est faible. En guise d'exemple, le coefficient de correction de la résistance au cône n'est plus nécessaire lorsque la couche mince constituée de sable lâche ( $q_c = 10$  MPa) dépasse une épaisseur de 20 cm (5 à 6 fois le diamètre d'un cône de 10 cm<sup>2</sup> de section). Par contre, il faut que la couche centrale fasse près de 1 m d'épaisseur pour que la résistance au cône soit pleinement atteinte dans une couche mince de sable dense ( $q_c = 22$  MPa) (Ahmadi & Robertson, 2005).

En ce qui concerne la résistance de frottement latéral local, la mesure se réalise au moyen d'un manchon de frottement d'une longueur de 134 mm. Cette distance relativement large engendre inévitablement un effet de lissage de la résistance au frottement latéral local pour les couches minces. Il en résulte que dans une analyse stratigraphique des dépôts recoupés, la résistance de frottement latéral local permet de moins facilement identifier d'éventuelles couches minces.

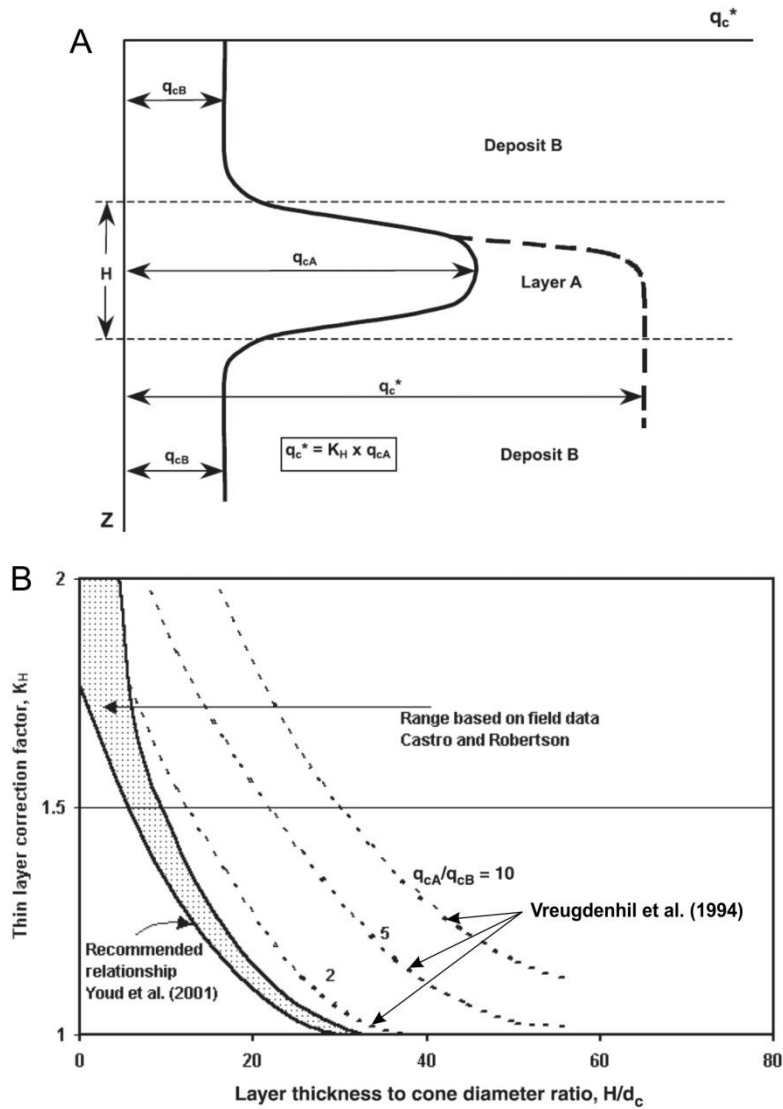


Figure 2-10 : Modèle à trois couches composé d'une couche centrale mince plus résistante (modifié, d'après Ahmadi & Robertson, 2005). (a) Explication des variables utilisées. (b) Différentes relations du coefficient de correction de la résistance au cône du CPT pour une couche fine résistante en fonction du rapport  $H/d_c$ .

## 5.2. Classification des sols

Les nombreuses recherches menées depuis les années 1960 sur la classification des sols sur base des paramètres mesurés par le CPT, ont permis d'aboutir à des systèmes de classification de plus en plus complets, précis et fiables. Ces systèmes de classification se présentent sous la forme de graphiques (« Soil Behaviour Type classification system » ou « SBT chart » en anglais) reprenant en abscisse et en ordonnée les paramètres issus de l'essai de pénétration. Ces graphiques sont subdivisés en différentes zones correspondant à différents types de sol. Ces systèmes essaient de s'approcher au mieux de la classification internationale des sols (« Unified Soil Classification System » ou « USCS » en anglais) qui, elle, est définie sur base d'une analyse de la granulométrie et des limites d'Atterberg (ASTM D2487-06, 2006). Des différences entre les deux systèmes sont toutefois fréquentes. En effet, les mesures au pénétromètre sont influencées par bien d'autres paramètres que la granulométrie du sédiment (p. ex. la cohésion, l'état de contraintes initial, la porosité, le degré de saturation,

etc.). Cela peut avoir comme conséquence une détermination erronée d'un type de sol obtenue au moyen du CPT, lorsqu'il est comparé aux résultats issus de la classification internationale des sols. En d'autres termes, ces systèmes de classification développés autour du CPT, permettent de déterminer un type de sol présentant les caractéristiques mécaniques typiques de ce sol. Mais ce dernier peut être différent de la dénomination granulométrique correspondante.

Le premier diagramme de ce type a été proposé par Begemann (1965). Il représente la résistance de frottement latéral local en fonction de la résistance au cône (Figure 2-11). Des zones correspondant à différents types de sol y sont représentées. Elles ont été définies sur base d'un grand nombre d'essais de pénétration statique munis du cône mécanique M2 (cône de Begemann), capable de mesurer le frottement latéral local, et provenant de différentes régions des Pays-Bas. Le graphique indique également une estimation du pourcentage de particules inférieures à 16  $\mu$ m. Cependant, ce diagramme a été conçu au départ d'essais issus de contextes géotechniques peu variés. D'importantes différences peuvent apparaître lorsque d'autres régions du monde ou d'autres contextes géotechniques sont investigués.

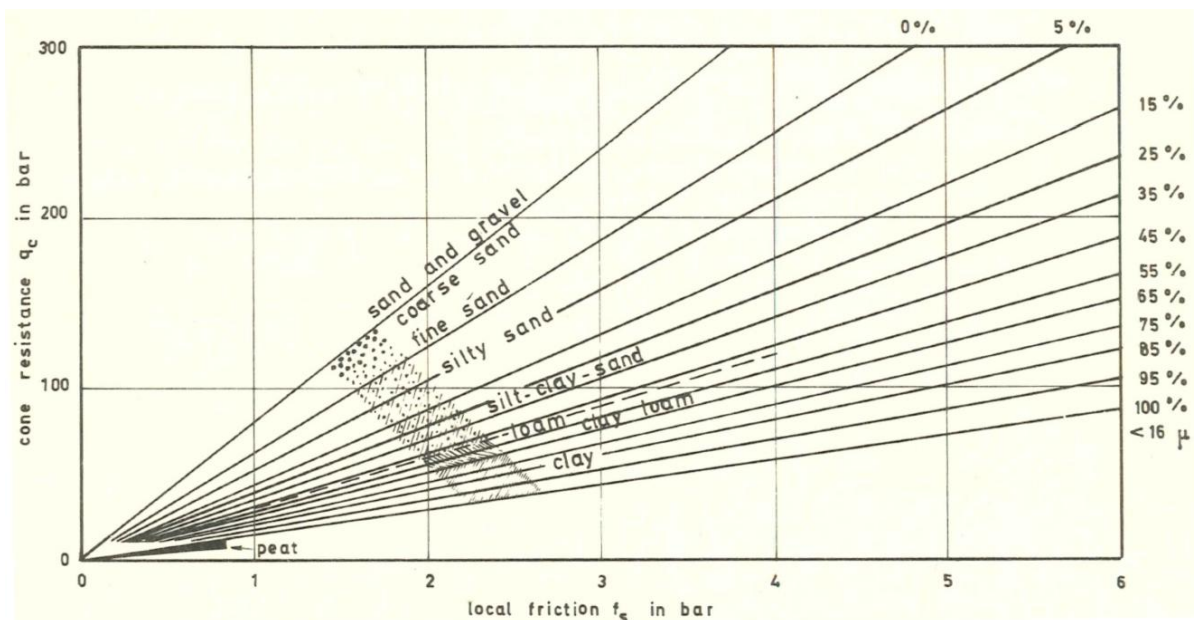


Figure 2-11 : Diagramme de classification des sols pour un cône M2 (d'après Begemann, 1965).

En même temps, des tables ont été développées dans différents pays afin d'évaluer les types de sol recoupés par la pointe. En France, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Chasseux *et al.*, 1972) publie dans un rapport technique un tableau permettant d'identifier des sols à partir de la résistance au cône et de la résistance totale (Tableau 2-2). Ce tableau est donc accessible pour des données issues de la pointe mécanique M1, ne nécessitant pas la mesure du frottement latéral local.



Tableau 2-2 : Identification qualitative de la nature des sols à partir de la résistance à la pointe ( $R_p$ ) et de l'effort total ( $R_T$ ) (d'après Chasseux et al., 1972).

	$R_p$	Nature	Résistance à la pointe ( $R_p$ )	Effort total ( $R_T$ )	Observations
Sols fins peu consistants	$R_p < 1$ MPa	Vase	$R_p$ augmente peu avec $z$	$R_T$ varie peu	Nécessité de mesures précises, par l'emploi d'une pointe électrique par exemple.
		Tourbe		$R_T$ croît très légèrement avec $z$	
		Argile molle		$R_T$ croît avec $z$	
Sols fins consistants	$1 < R_p < 3$ MPa	Limon	$R_p$ varie peu avec $z$	$R_T$ croît légèrement avec $z$	En présence de graviers ou cailloux, $R_p$ peut présenter une courbe en « dents de scie ».
		Argile	$R_p$ croît légèrement avec $z$	$R_T$ croît linéairement avec $z$	
Sols grenus	$3 < R_p < 20$ MPa	Sable lâche	$R_p$ croît légèrement avec $z$	$R_T$ varie légèrement avec $z$	$R_p$ et $R_T$ peuvent présenter des variations dues à l'hétérogénéité ou à la variation de compacité du sable, et à la présence de graviers.
		Sable compact	$R_p$ pratiquement constant en fonction de $z$	$R_T$ reste pratiquement constant	
Sols carbonatés	$1 < R_p < 6$ MPa	Craie	$R_p$ croît avec $z$	$R_T$ croît peu avec $z$	$R_p$ et $R_T$ très fortement influencés par la présence de nodules dans les craies molles.
		Marne	$R_p$ croît avec $z$	$R_T$ croît avec $z$	$R_T$ sensible à l'augmentation de la compacité (forme parabolique).

Un autre tableau a été établi, toujours en France, à partir de la résistance au cône et de la résistance de frottement latéral local, issues du pénétromètre Andina (Tableau 2-3). Ce dernier fut utilisé en France dans les années 1970 mais comporte une pointe avec des dimensions non standardisées.

Ces résultats ont conduit Sanglerat *et al.* (1974) à proposer un diagramme de classification des sols (Figure 2-12). Ce sont les premiers à établir un diagramme reprenant la résistance au cône (en échelle logarithmique) en fonction du rapport de frottement. Cependant, ce diagramme a été conçu à partir de données issues du pénétromètre Andina, présentant des dimensions non conventionnelles.

Tableau 2-3 : Classification des sols sur base du  $q_c$  et du  $f_s$ , à partir du pénétromètre Andina (d'après Sanglerat, 1972).

$q_c$ (MPa)	$f_s$ (kPa)	Description lithologique
$q_c < 0,6$	$15 < f_s < 40$	Tourbes, argiles lacustres et argiles très tendres.
$q_c < 1$	$f_s < 20$	Sables limoneux lâches et remblais très lâches.
	$20 < f_s < 60$	Argiles légères et argiles limoneuses.
$1 < q_c < 3$	$f_s < 10$	Remblais graveleux lâches.
	$10 < f_s < 40$	Sables lâches ou loess au-dessus du niveau de la nappe.
	$40 < f_s < 80$	Argiles et argiles limoneuses.
	$80 < f_s < 200$	Argiles raides.
$3 < q_c < 6$	$f_s < 100$	Sables limoneux moyennement denses et sables.
	$100 < f_s < 300$	Argiles raides ou argiles limoneuses raides.
$6 < q_c < 15$	$f_s < 100$	Graviers avec éventuellement des sables fins lâches.
	$100 < f_s < 300$	Sables denses ou mélanges denses de sables, limons et argiles ; Graviers argileux.
	$f_s > 300$	Graviers dans une matrice de sables argileux dense ; Argiles très raides.
$15 < q_c < 30$	$100 < f_s < 200$	Mélanges de sables et de graviers denses.
	$f_s > 200$	Sables grossiers ou sables limoneux denses.

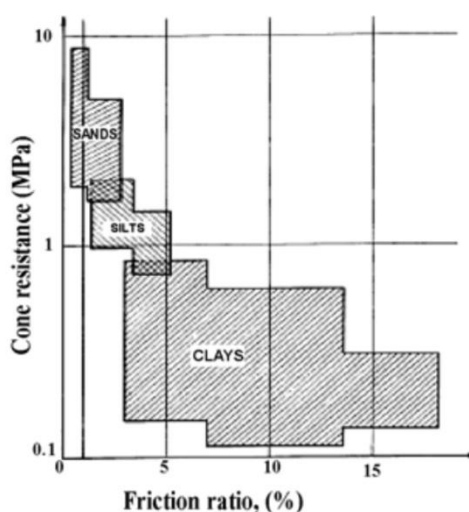


Figure 2-12 : Diagramme de classification des sols à partir d'un pénétromètre non conventionnel (d'après Sanglerat et al., 1974).

Schmertmann (1978) propose un diagramme de classification des sols basés sur les résultats provenant de Floride (USA) et issus d'une pointe mécanique (Figure 2-13 (a)). Le diagramme présente également la distinction entre des sables de différentes densités et des argiles et limons de différentes consistances (résistance au cisaillement non drainé). Schmertmann a également converti le diagramme en un graphique comparable à celui proposé par Begemann 13 ans plus tôt (Figure 2-13 (b)). Cependant, ces diagrammes restent trop restrictifs à certaines régions du monde. Des corrélations avec le contexte géotechnique local sont dès lors préférables. En effet, la rugosité de la surface du manchon de frottement, la ductilité du sol ou encore les effets de pression interstitielle peuvent influencer les corrélations

avec le diagramme. Schmertmann précise également que le rapport de frottement diminue en précision pour de faibles valeurs de résistance au cône. Malgré ces recommandations, l'utilisation du diagramme de Schmertmann est une pratique courante en Amérique du Nord.

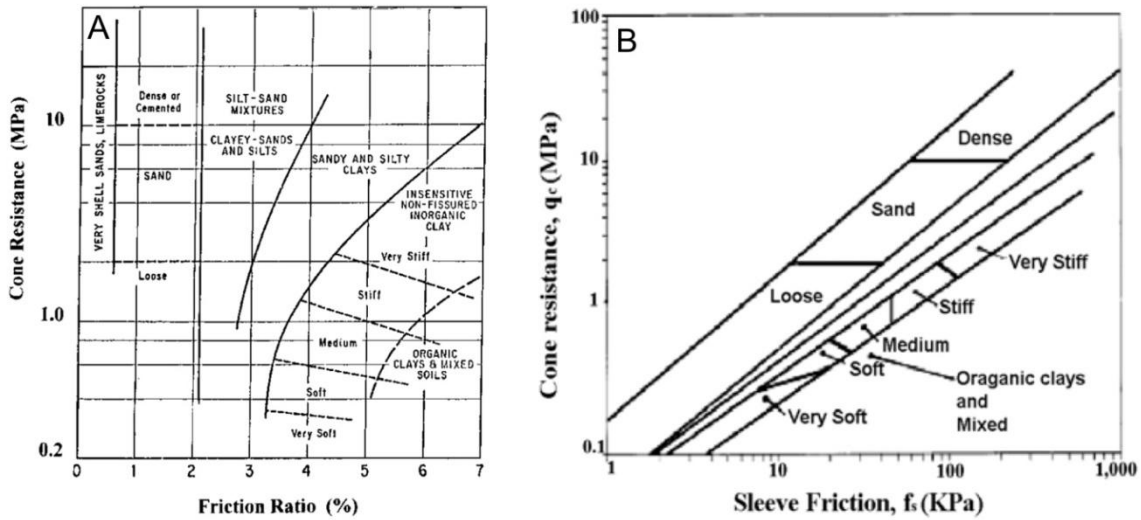


Figure 2-13 : Diagrammes de classification des sols proposés par Schmertmann (1978). (a) Diagramme original. (b) Diagramme adapté à celui proposé par Begemann (1965).

Douglas et Olsen (1981) sont les premiers à proposer un diagramme de classification des sols à partir de résultats issus d'une pointe électrique (Figure 2-14). En plus de la dénomination des types de sol, le diagramme reprend également des informations au sujet de la classification internationale des sols (ASTM D2487-06, 2006), de l'indice de liquidité, du coefficient de poussée des terres au repos ou encore, de l'indice des vides. Il est constitué de trois courbes délimitant un contenu en grains grossiers croissant, et par quatre courbes d'isovaleurs de la résistance de frottement latéral local. Les zones correspondant aux sables et aux argiles sont assez comparables à celles reprises sur le diagramme de Schmertmann (Figure 2-13 (a)).

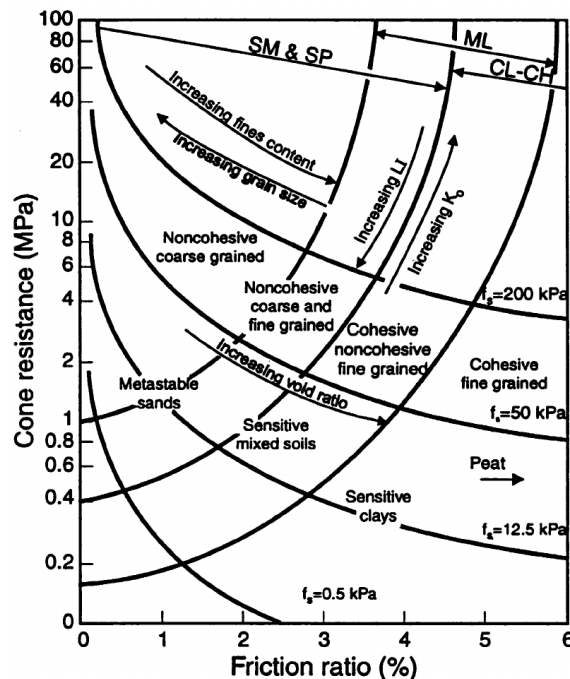


Figure 2-14 : Diagramme de classification des sols proposé par Douglas et Olsen (1981).

Robertson *et al.* (1986) ont proposé un diagramme de classification des sols qui, pour la première fois, se base sur des résultats issus d'un piézocône (Figure 2-15). Il tient compte de la résistance au cône corrigée ( $q_t$ ) suite aux effets non désirés de la pression interstitielle sur le cône en milieu saturé (équation 2-2). Le diagramme identifie une douzaine de zones correspondant à différents types de sol. Il est intéressant de noter la présence de nouveaux types de sol, correspondant aux zones 1, 11 et 12. Les zones 4 à 9 apportent un haut niveau de raffinement concernant les sols intermédiaires entre les argiles d'une part, et les sables d'autre part.

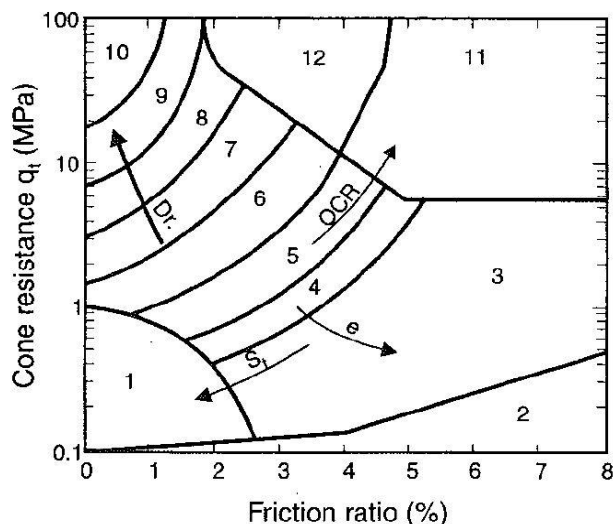


Figure 2-15 : Diagramme de Robertson *et al.* (1986). 1. Sol fin sensible; 2. Sol organique; 3. Argile; 4. Argile à argile limoneuse; 5. Argile limoneuse à limon argileux; 6. Limon argileux à limon sableux; 7. Limon sableux à sable limoneux; 8. Sable limoneux à sable; 9. Sable; 10. Sable à sable graveleux; 11. Sol fin très raide\*; 12. Sable argileux ou argile\*. \* Surconsolidé ou induré.

Robertson (1990) apporta quelques améliorations au précédent diagramme. Il proposa un nouveau diagramme reprenant la résistance au cône normalisée ( $Q_t$ ) et le rapport de frottement normalisé ( $F_r$ ) (Figure 2-16). Ceci est une façon de minimiser l'effet de la contrainte verticale in situ sur la valeur de résistance au cône mesurée. Ce nouveau diagramme est donc également adapté aux données issues d'essais de pénétration profonds (> 30 m). Cependant, pour des sondages de faibles profondeurs, la normalisation proposée a tendance à surestimer légèrement la gamme granulométrique du sol.

La résistance au cône normalisée ( $Q_t$ ) est définie comme étant :

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_v)}{\sigma'_v} \quad (2-8)$$

et,

le rapport de frottement normalisé ( $F_r$ ) équivaut à :

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_v)} \quad (2-9)$$

où :

- $q_t$  = la résistance au cône totale corrigée (éq. 1-2),
- $f_s$  = la résistance de frottement latéral local, et
- $\sigma_v$  et  $\sigma'_v$  = la contrainte verticale in situ, respectivement totale et effective.

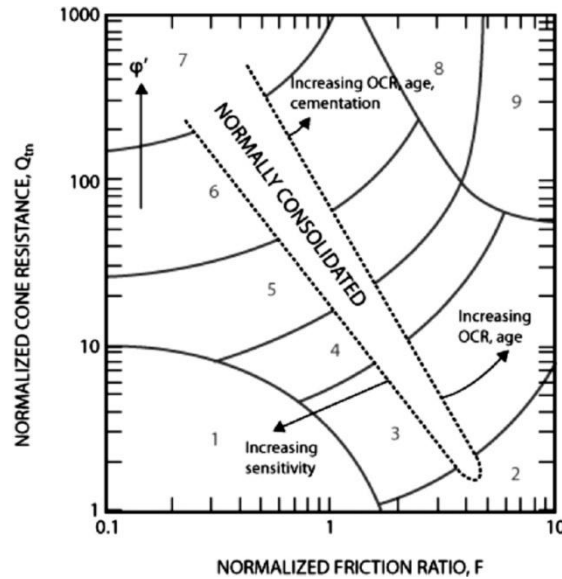


Figure 2-16 : Diagramme normalisé de Robertson (1990). 1. Sol sensible, finement grenu; 2. Sol organique, tourbe; 3. Argile à argile limoneuse; 4. Mélange limoneux, argile limoneuse à limon argileux; 5. Mélange sableux, limon sableux à sable limoneux; 6. Sable limoneux à sable; 7. Sable à sable graveleux; 8. Sable argileux à sable très raide; 9. Sol finement grenu très raide.

Olsen et Mitchell (1995) ont également proposé un diagramme de classification des sols tenant compte d'une résistance au cône normalisée (Figure 2-17). Cette dernière se détermine comme suit :

$$q_{c1e} = \frac{(q_t - \sigma_v)}{(\sigma'_v)^c} \quad (2-10)$$

où :

- $q_{c1e}$  = la résistance au cône normalisée pour une contrainte effective verticale équivalente à 1 atm (100 kPa), et
- $c$  = un exposant lié à la résistance au cône. La valeur de l'exposant  $c$  se détermine graphiquement et équivaut à la pente de l'évolution de la résistance au cône en fonction de la contrainte verticale effective.

Le diagramme représente la résistance au cône normalisée ( $q_{c1e}$ ) en fonction du rapport de frottement ( $R_f$ ). Il inclut des courbes, annotées « SCN » (pour « Soil Classification Number »), délimitant les différentes catégories de sols. Le diagramme reprend également des courbes d'isovaleurs de l'exposant  $c$ .

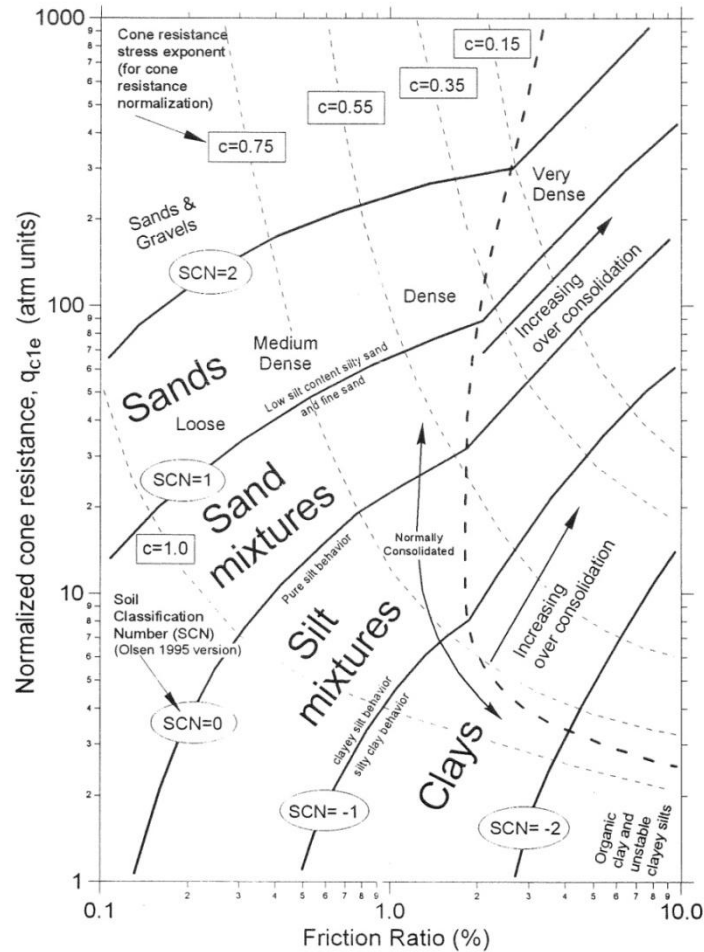


Figure 2-17 : Diagramme de classification des sols proposé par Olsen & Mitchell (1995).

Eslami et Fellenius (2004) ont également développé un diagramme de classification des sols sur base des résultats d'un essai de pénétration statique. Le diagramme proposé est du même type que celui établi par Begemann. Il représente la résistance de frottement latéral local en fonction d'une résistance au cône effective ( $q_E$ ) (Figure 2-18). Cette dernière est définie par :

$$q_E = (q_t - u_2) \quad (2-11)$$

où :

- $q_t$  = la résistance au cône totale corrigée (éq. 2-2), et
- $u_2$  = pression interstitielle mesurée en arrière du cône.

La représentation de la résistance au cône effective permet de délimiter des zones du graphique qui, d'après les concepteurs du diagramme, correspondent mieux aux différents types de sol. Le diagramme proposé n'indique pas de catégories spécifiques aux sols indurés ou aux argiles très raides, comme c'est le cas pour les diagrammes de Robertson *et al.* (1986) et de Robertson (1990). Concernant la dénomination des types de sol, Eslami et Fellenius (2004) précisent que l'adjectif argileux, limoneux ou sableux indique une proportion de ce matériau entre 20 et 35 % en poids.

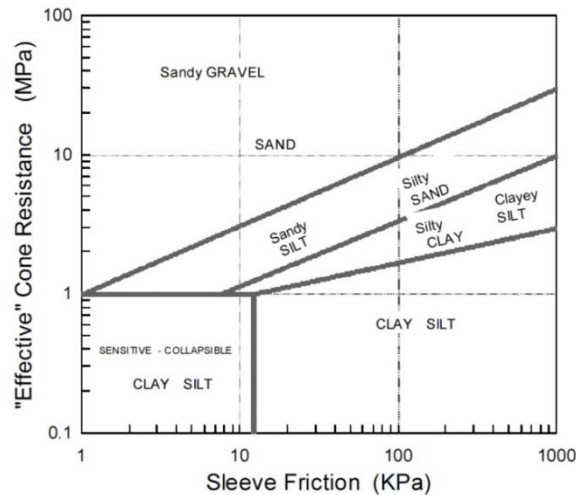


Figure 2-18 : Diagramme de classification des sols proposé par Eslami & Fellenius (2004).

### 5.3. Détermination de paramètres

En plus d'une estimation des types de sol recoupés, l'essai de pénétration statique permet de déterminer différents paramètres liés aux caractéristiques mécaniques et hydromécaniques des sols. Ces paramètres géotechniques peuvent être calculés au moyen de corrélations souvent semi-empiriques, apportant des degrés de fiabilité divers en fonction du type de sol et du paramètre estimé. Le Tableau 2-4 suivant reprend les principaux paramètres qu'il est possible d'estimer à partir du CPT, ainsi que le niveau de fiabilité correspondant. L'essai de pénétration statique est applicable à une grande variété de types de sol. Cependant, deux grandes catégories de sols ressortent de l'analyse du CPT. Il y a d'une part les sols sans cohésion, typiquement sableux, pour lesquels la pénétration se réalise dans des conditions considérées comme étant parfaitement drainées. D'autre part, il y a les sols fins, typiquement argileux, pour lesquels la pénétration s'effectue dans des conditions généralement non drainées. Par contre, les sols intermédiaires entre un sable et une argile possèdent un comportement partiellement drainé en cours de pénétration, ce qui les rend plus compliqués à interpréter à partir du CPT.

Les nombreuses recherches développées autour de la détermination de la cohésion non drainée dans les argiles, au moyen du CPT, ont mené, aujourd'hui, à une assez bonne fiabilité de la valeur obtenue, lorsqu'elle est comparée à des résultats obtenus par des essais en laboratoire (essais triaxiaux, dans ce cas). Dans le même ordre d'idée, le CPT permet de déterminer de façon assez fiable, la valeur de l'angle de frottement effectif pour un sable. Les paramètres de déformabilité sont, d'une manière générale, déterminés de manière moins pertinente dans le cas d'une argile que pour un matériau sableux.

L'estimation de certains paramètres géotechniques repris dans ce tableau sera développée dans le chapitre 5, consacré à l'étude à l'échelle macroscopique, en lien avec l'interprétation des essais de laboratoire.

Tableau 2-4 : Perception de l'applicabilité du CPT dans la détermination des paramètres relatifs au sol, à partir d'une pointe électrique ou d'un piézocône (d'après Lunne et al., 1997).

Type de sol	Variables d'état				Paramètres de résistance		Caractéristiques de déformabilité			Caractéristiques hydromécaniques	
	$\gamma, I_D$	$K_0$	OCR	$S_t$	$s_u$	$\phi'$	E	M	$G_0$	k	$c_v$
Argile	3-4	4-5	2-3	2-3	1-2	3-4	4-5	4-5	4-5	2-4	2-3
Sable	2-3	4-5	4-5			2	2-4	2-4	2-3		

Niveau d'applicabilité : 1 = fiabilité élevée ; 2 = fiabilité modérée à élevée ; 3 = fiabilité modérée ; 4 = fiabilité faible à modérée ; 5 = fiabilité faible. Définition des paramètres de sol :  $\gamma$  = poids volumique ;  $I_D$  = densité relative ;  $K_0$  = coefficient de poussée des terres au repos ; OCR = rapport de surconsolidation ;  $S_t$  = sensibilité ;  $s_u$  = résistance au cisaillement non drainé ;  $\phi'$  = angle de frottement interne effectif ; E = module de Young ; M = module œdométrique ;  $G_0$  = module de cisaillement à faibles déformations ; k = coefficient de perméabilité ;  $c_v$  = coefficient de consolidation verticale.



## 6. Application aux fondations profondes

Les résultats de l'essai de pénétration statique sont utilisés pour bon nombre d'applications en génie civil, parmi lesquelles, les plus fréquentes se rapportent certainement au dimensionnement des fondations profondes et superficielles. Le Tableau 2-4 met en lumière des degrés variables de qualité, et par extension, de fiabilité, relatifs aux paramètres déduits des mesures réalisées au moyen du CPT. D'une manière générale, les paramètres liés à la déformabilité du matériau sont estimés de manière moins fiable que les paramètres de résistance mécanique. Il en résulte que le recours au CPT pour le dimensionnement vis-à-vis de la capacité portante s'avère plus pertinent que celui vis-à-vis de la déformabilité.

La suite de cette section présente quelques résultats majeurs, issus de la littérature scientifique, développés pour le dimensionnement de la capacité portante du sol à partir du CPT, et en lien avec une fondation profonde. L'utilisation du CPT pour le dimensionnement des fondations superficielles ne sera pas abordée dans ce travail. Le dimensionnement vis-à-vis de la déformabilité du sol ne sera pas non plus développé dans ce qui suit.

Une fondation profonde sous forme d'un pieu à refoulement du sol présente de nombreuses similitudes avec l'équipement qui est enfoncé dans le sous-sol dans le cadre d'un essai de pénétration statique. C'est une raison pour laquelle le CPT est très utilisé dans le dimensionnement de tels ouvrages. Certaines normes nationales et internationales définissant les modalités pour le dimensionnement de pieux se basent d'ailleurs sur les résultats de l'essai de pénétration statique. C'est notamment le cas pour la Directive belge pour l'application de l'Eurocode 7. Le pénétromètre statique constitue dès lors un moyen d'investigation majeur et concret dans le dimensionnement des pieux.

Par ailleurs, les très nombreuses recherches qui ont été menées sur la détermination de la capacité portante d'un pieu dans divers types de sol, permettent de mieux comprendre la cinématique de rupture autour de la base du pieu. Ces mécanismes sont comparables à ceux se produisant autour de la pointe du CPT lors de son enfoncement. Cette section n'aborde pas de manière exhaustive les différentes approches proposées dans la littérature pour mieux appréhender ces modes de rupture, car cela requiert un travail considérable qui sort du cadre strict de cette étude. Dans ce travail, les modèles de rupture adaptés aux pieux, qui sont issus des développements liés à la détermination de la capacité portante du sol sous une fondation superficielle sont préférés aux autres modèles. Même si ces modèles peuvent être qualifiés en première abord de relativement anciens et imprécis, car ils ont été développés depuis les années 1920 au départ de cas parfois très simplifiés ou de manière semi-empirique, ils sont toujours utilisés pour la détermination de la cohésion ou de l'angle de frottement des sols argileux ou sableux. Ils sont également relativement simples d'utilisation et ne font pas intervenir un grand nombre de variables parfois difficiles à déterminer en laboratoire. Cette section présente donc les principaux résultats obtenus par cette approche. Les modèles présentés seront ensuite utilisés dans le cadre de ce travail pour en déterminer des valeurs de cohésion et d'angle de frottement qui seront comparées aux valeurs obtenues expérimentalement, en laboratoire. Ces résultats seront développés dans le chapitre 5.

### 6.1. Les pieux

Une fondation profonde a pour objectif de transmettre les charges appliquées en surface, aux couches situées à plus grande profondeur. C'est l'encastrement (rapport entre profondeur et largeur) de la fondation qui différencie de manière arbitraire une fondation profonde d'une fondation superficielle. En Belgique, pour qu'une fondation soit conventionnellement considérée comme profonde, l'encastrement doit être supérieur à cinq (CSTC, 2016). Les fondations profondes permettent de s'affranchir de conditions géotechniques médiocres relatives aux couches de surface, en allant rechercher de meilleures caractéristiques géotechniques en profondeur. Par contre, elles sont souvent plus coûteuses que les fondations superficielles et leur réalisation nécessite un équipement spécifique.

Dans ce travail, seules les fondations profondes sous la forme de pieux sont abordées. Les fondations profondes du type faux-puits ou colonnes ballastées ne sont pas développées. Il existe différents types de pieu. Ces derniers dépendent de trois critères :

- la nature du matériau constitutif : acier, béton armé, bois ;
- le mode de réalisation : pieux préfabriqués, pieux exécutés in situ ;
- la mise en œuvre dans le terrain : avec refoulement, avec refoulement limité, par excavation.

Ainsi, les directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique, relatives au dimensionnement de pieux (CSTC, 2016), distinguent quatre catégories principales de pieux : pieux avec refoulement du sol, pieux avec peu de refoulement ou de décompression du sol, pieux avec enlèvement du sol et micropieux. Leurs mises en place peuvent être très variées : pieu battu, pieu foncé, pieu battu moulé, pieu vissé moulé, pieu foré, pieu foré tubé, etc. Décrire chacune de ces techniques de mise en place sort du cadre de cette thèse. Pour d'avantage de précisions sur ce sujet, les références suivantes peuvent être consultées : Hunt (1979) ; ASCE 20-96 (1997) ; Tomlinson (2001) ; en Belgique, les Infofiches du CSTC sur l'exécution des différents types de pieu.

Dans la suite de cette section, seul le cas d'un pieu, chargé axialement et fonctionnant en compression est abordé. Ce choix est directement lié à l'application des données issues d'un essai de pénétration statique. Ce dernier peut en effet être comparé à un micropieu à refoulement du sol, enfoncé de manière statique dans le sous-sol et chargé a priori axialement.

### 6.2. Mécanisme de transfert de la charge axiale

Pour s'assurer que le sol situé aux alentours du pieu résiste à la charge axiale appliquée depuis la surface, il est nécessaire de déterminer la force limite totale ( $Q_u$ ) applicable au pieu (i.e. au sol autour du pieu). Dans le sol, la force limite totale est reprise par une composante le long du pieu, la force limite de frottement ( $Q_s$ ), et par une composante à la base du pieu, la force limite à la pointe ( $Q_b$ ) (Figure 2-19). La force limite totale d'un pieu en compression chargé axialement s'écrit donc :

$$Q_u = (Q_b - W_f) + Q_s = R'_b A_b + R_s A_s \quad (2-12)$$

où :

- $W_f$  = le poids propre du pieu,
- $R'_b$  = la capacité portante limite nette à la base du pieu,
- $A_b$  = la surface de la base du pieu,
- $R_s$  = la capacité portante limite liée aux frottements le long du pieu, et
- $A_s$  = la superficie totale des parois latérales du pieu situées sous la surface du sol.

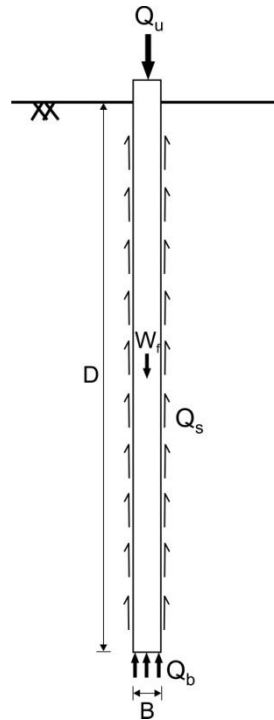


Figure 2-19 : Transfert de la charge axiale d'une fondation profonde vers le sol.

Ensuite, l'ancienne approche considère un coefficient de sécurité, classiquement appliqué à la force limite afin de déterminer la force admissible totale ( $Q_a$ ), nécessaire au dimensionnement du pieu. Ce coefficient de sécurité peut être appliqué soit sur la force limite totale, soit individuellement sur la force limite à la pointe et sur la force limite de frottement.

$$Q_a = Q_u / F_t \quad \text{ou bien} \quad Q_a = (Q_b - W_f) / F_b + Q_s / F_s \quad (2-13)$$

La nouvelle approche, définie par l'Eurocode 7.1 (EN 1997-1, 2004), vise à vérifier l'inégalité suivante (2-14), qui doit être satisfaite. Si tel est le cas, la fondation sur pieux résistera à la charge attendue avec une sécurité suffisante pour éviter une rupture géotechnique. La notion de sécurité est, dans ce cas, prise en compte au moyen de plusieurs facteurs qui interviennent sur les paramètres utilisés dans le calcul de  $F_{c,d}$  et de  $R_{c,d}$ .

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad (2-14)$$

où :

- $F_{c,d}$  = la valeur de calcul de la charge axiale en compression sur la fondation sur pieux, et
- $R_{c,d}$  = la valeur de calcul de la capacité portante dans le cas de pieux en compression.

### 6.3. Détermination de la capacité portante d'un pieu à partir du CPT

La capacité portante d'un pieu peut être déterminée de différentes façons. Le moyen le plus précis et fiable consiste à réaliser un essai de chargement du pieu. Ce dernier est alors chargé par paliers de chargement croissant. Le déplacement du pieu est ensuite mesuré au cours du temps pour in fine en déterminer la charge de rupture. La capacité portante du pieu peut également être déduite par un essai d'enfoncement dynamique du pieu, par battage. Différents essais in situ peuvent aussi être utilisés, à savoir, l'essai de pénétration dynamique, le pressiomètre et l'essai de pénétration statique. La suite de cette section est consacrée à

l'utilisation du CPT pour le calcul de la capacité portante du pieu, d'une manière générale et plus particulièrement en Belgique.

Il existe classiquement deux principales approches pour déterminer la capacité portante d'un pieu à partir d'essais de pénétration statique (Fellenius, 2017). Il y a d'une part les méthodes directes, et d'autre part les méthodes indirectes. Dans les méthodes directes, la résistance au cône, et parfois la résistance de frottement latéral local, sont utilisées dans la détermination de la capacité portante du pieu. Certaines méthodes considèrent des valeurs de résistance du CPT modifiées pour prendre en compte la différence de diamètre entre le CPT et le pieu. Les méthodes indirectes utilisent des paramètres du sol, tels que l'angle de frottement et la cohésion non drainée, déterminés à partir des résultats du CPT. Elles se basent sur les théories de calcul de la capacité portante, initialement conçues pour les fondations superficielles, et/ou sur les théories d'expansion de cavité. Elles négligent souvent l'état de contraintes horizontales, la compressibilité du sol et le phénomène d'adoucissement.

### 6.3.1. Approches directes

Robertson *et al.* (1988) ont comparé 13 méthodes différentes pour estimer la capacité portante de pieux battus métalliques chargés axialement dans un contexte de dépôts deltaïques. Les différentes méthodes de calcul s'individualisent en deux sous-groupes : d'un côté les méthodes directes et de l'autre, les méthodes indirectes ou celles qui n'utilisent pas de données issues du CPT. Il en ressort que les méthodes directes parviennent à bien mieux estimer la capacité portante d'un pieu que les autres méthodes. Parmi les méthodes directes, la méthode proposée par le LCPC (Bustamante & Gianceselli, 1982) apportait les résultats les plus satisfaisants, à ce moment-là (au moment de l'étude, en 1988).

Le Tableau 2-5 suivant reprend quelques-unes des principales méthodes de calcul de la capacité portante d'un pieu au départ de données issues du CPT. Certaines de ces méthodes sont bien entendu obsolètes. Les méthodes de dimensionnement se basent aujourd'hui sur des normes et des directives internationales ou nationales. Quelques remarques sont à soulever concernant ces méthodes.

- Certaines méthodes ne considèrent pas la mesure du frottement latéral local pour estimer la capacité portante au frottement du pieu. D'autres méthodes laissent le choix à l'utilisateur d'employer le  $f_s$  ou le  $q_c$  dans les calculs. La mesure de frottement latéral local est parfois jugée comme très sensible. De plus, certaines pointes mécaniques ne sont pas équipées pour mesurer ce paramètre.
- Toutes les méthodes de calcul utilisent une résistance au cône, mesurée au CPT, moyennée sur un intervalle de profondeur situé en amont et en aval de la tête du pieu.
- Eslami et Fellenius proposent une méthode qui est la seule à utiliser une résistance au cône corrigée des effets de la pression interstitielle agissant en arrière du cône.
- La plupart de ces méthodes sont développées pour des matériaux argileux ou sableux. Dans le cas de matériaux intermédiaires, par exemple limoneux, ces méthodes restent ambiguës et ne précisent pas si les formules à utiliser sont celles développées pour le sable ou pour l'argile.
- Les méthodes sont développées dans des zones géographiques limitées et dans des contextes géotechniques également peu variés. Il en résulte que ces méthodes peuvent s'avérer inadéquates en dehors de leur région d'étalonnage.

Tableau 2-5 : Principales méthodes directes de détermination de la capacité portante d'un pieu à partir de résultats issus de CPT (Robertson *et al.*, 1988 ; Fellenius, 2017).

Méthode	Paramètre	Commentaire	Référence
Schmertmann et Nottingham	$q_c$ et $f_s$	Influence de l'OCR dans le calcul de la capacité portante à la pointe.	Nottingham (1975), Schmertmann (1978)
de Ruiter et Beringen	$q_c$ et $f_s$	- Méthode également appelée « méthode hollandaise » ou « méthode européenne » ; - Capacité portante à la pointe et au frottement latéral déterminée à partir de la résistance au cisaillement non drainé dans les argiles.	De Ruiter & Beringen (1979)
Tumay et Fakhroo	$q_c$ et $f_s$	- Influence de l'OCR dans le calcul de la capacité portante à la pointe ; - Méthode pour les argiles.	Tumay & Fakhroo (1981)
Van Mierlo et Koppejan	$q_c$		Van Mierlo & Koppejan (1952), Begemann <i>et al.</i> (1982)
Bustamante et Gianceselli	$q_c$	Méthode également appelée « méthode du LCPC » ou « méthode française ».	Bustamante & Gianceselli (1982)
Zhou <i>et al.</i>	$q_c$ et $f_s$		Zhou <i>et al.</i> (1982)
Meyerhof	$q_c$ et $f_s$	Méthode pour le sable.	Meyerhof (1951 ; 1963 ; 1976)
Méthode belge	$q_c$		Van Impe (1986)
Eslami et Fellenius	$q_c$	Correction du $q_c$ avec la pression interstitielle.	Eslami (1996), Eslami & Fellenius (1997)
Méthode ICP ("Imperial College Pile")	$q_c$		Jardine <i>et al.</i> (2005)
CSTC	$q_c$	Adaptation de l'Eurocode 7.1 pour les pratiques de dimensionnement de pieux en Belgique.	CSTC (2016)

En Belgique, ce sont les directives pour l'application de l'Eurocode 7 (CSTC, 2016), qui encadrent le dimensionnement de pieux à partir de données issues du CPT. D'après ces directives, la résistance au cône du pieu ( $R_b$ ) est déterminée par :

$$Q_b = \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot \beta \cdot \lambda \cdot A_b \cdot q_b \quad (2-15)$$

où :

- $Q_b$  = la résistance au cône, d'après le CSTC (2016),
- $\alpha_b$  = un facteur d'installation empirique qui prend en compte l'influence d'installation du pieu dans le sol,
- $\varepsilon_b$  = un facteur s'appliquant aux argiles tertiaires qui prend en compte l'effet d'échelle sur le frottement en raison de la fissuration du sol,
- $\beta$  = un facteur de forme lorsque la base du pieu n'est pas circulaire ou carrée,
- $\lambda$  = un facteur de réduction qui prend en compte la décompression du sol autour du pieu, engendrée lors de son installation par la présence d'une base élargie,
- $A_b$  = la surface de la base du pieu, et
- $q_b$  = la résistance au cône de l'essai de pénétration statique, calculée par la méthode De Beer.

Toujours d'après ces mêmes directives (CSTC, 2016), la résistance par frottement du pieu ( $R_s$ ), pour  $n$  couches de sols recoupées par le pieu, est déterminée à partir de la résistance au cône du CPT. La résistance par frottement du pieu s'obtient par :

$$Q_s = \chi_s \cdot \sum_{i=0}^n (\alpha_{s,i} \cdot h_i \cdot q_{s,i}) \quad (2-16)$$

où :

- $Q_s$  = la résistance par frottement, d'après le CSTC (2016),
- $\chi_s$  = le périmètre du pieu,
- $\alpha_s$  = un facteur d'installation empirique relatif à la couche de sol  $i$  et qui prend en compte d'une part la méthode d'installation du pieu et d'autre part sa rugosité,
- $h$  = l'épaisseur de la couche  $i$
- $q_s$  = la résistance de frottement latéral local déterminée au moyen du CPT. Cette dernière variable se détermine de la façon suivante :

$$q_{s,i} = \eta_{p,i} \cdot q_{c,m,i} \quad (2-17)$$

où :

- $q_{c,m}$  = la valeur moyenne de la résistance au cône du CPT sur la couche  $i$ . Les valeurs de résistance au cône inférieures à 1 MPa ne sont pas prises en compte dans le calcul, et
- $\eta_p$  = un facteur empirique qui indique le rapport entre la résistance de frottement latéral local au CPT et la résistance au cône selon le type de sol (Tableau 2-6).

Tableau 2-6 : Valeurs du facteur empirique  $\eta_p$  ou valeurs de  $q_s$  considérées en fonction du type de sol (CSTC, 2016).

Type de sol	$q_c$ (MPa)	$\eta_p^*$ (-)	$q_s$ (MPa)	$R_f^*$ (%)
Argile	1 – 4,5	1/30	0,150	3-6
	> 4,5			
Limon	1 – 6	1/60	0,100	2-3
	> 6			
Argile sableuse/limon sableux	1 – 10	1/80	0,125	1-2
Sable argileux/limon argileux	> 10			
Sable	1 – 10	1/90	$q_s = 0,110 + 0,004(q_c - 10)$	< 1
	10 – 20			
	> 20			

\* paramètres déterminés par l'essai de pénétration statique muni d'une pointe électrique

Les valeurs de résistance au cône du CPT utilisées dans les directives relatives au dimensionnement des pieux pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique (CSTC, 2016) sont déterminées au moyen d'une pointe électrique. Dans le cas d'utilisation d'une pointe mécanique dans les argiles tertiaires, il faut ajouter un coefficient  $\omega$  (Tableau 2-7) tel que :

$$q_{c,M} = \omega \cdot q_{c,E} \quad (2-18)$$

où :

- $q_{c,M}$  = la résistance au cône mesurée avec une pointe mécanique,
- $q_{c,E}$  = la résistance au cône mesurée avec une pointe électrique, et
- $\omega$  = facteur de conversion.

Tableau 2-7 : Facteurs de conversion  $\omega$  pour la réduction de la valeur de la résistance au cône mesurée lors d'essais de pénétration statique à l'aide d'une pointe mécanique (CSTC, 2016).

Pointe mécanique	Argile tertiaire	Autres sols
M1	1,30	1,00
M2	1,30	1,00
M4	1,15	1,00

La capacité portante d'un pieu en compression chargé axialement s'obtient ensuite en additionnant la composante de résistance au cône ( $Q_b$ ) et celle de résistance de frottement latéral ( $Q_s$ ). Pour obtenir la valeur de la capacité portante servant au dimensionnement du pieu, les directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique (CSTC, 2016) font intervenir successivement des coefficients réducteurs : facteurs de modèle, facteurs de corrélation et enfin facteurs de sécurité.

La définition des quatre catégories de sols, telles que proposées dans le Tableau 2-6 par les directives du CSTC (2016), basée sur des valeurs du rapport de frottement, amène à plusieurs remarques. Tout d'abord, la catégorie « sable argileux ou argile sableuse » ne semble pas suffisamment précise et se confond avec les autres catégories. Par ailleurs, les catégories de sols, définies en termes de résistance au cône et de rapport de frottement,

paraissent fort arbitraires, et ne se corrént que modérément aux diagrammes de classification des sols mentionnés précédemment dans ce chapitre. Les zones grisées de la Figure 2-20 soulignent les endroits où il y a concordance du type de sol entre les directives du CSTC (2016) et les diagrammes de classification des sols. La concordance n'est que modérée, notamment pour la catégorie « limon » qui, dans le diagramme de Robertson *et al.* (1986) peut aussi être un sable ou une argile indurée, et dans le diagramme de Douglas et Olsen (1981) peut être un sable (SM ou SP). Enfin, la méthode de calcul proposée par le CSTC tient compte de la résistance au cône mesurée avec une pointe électrique, sans mentionner s'il faut prendre en compte les effets de la pression interstitielle sur le cône. En présence d'une pression interstitielle non nulle, cela revient à considérer une résistance au cône plus faible (éq. 2-2), puisque  $q_c < q_t$  quand  $u \neq 0$ .

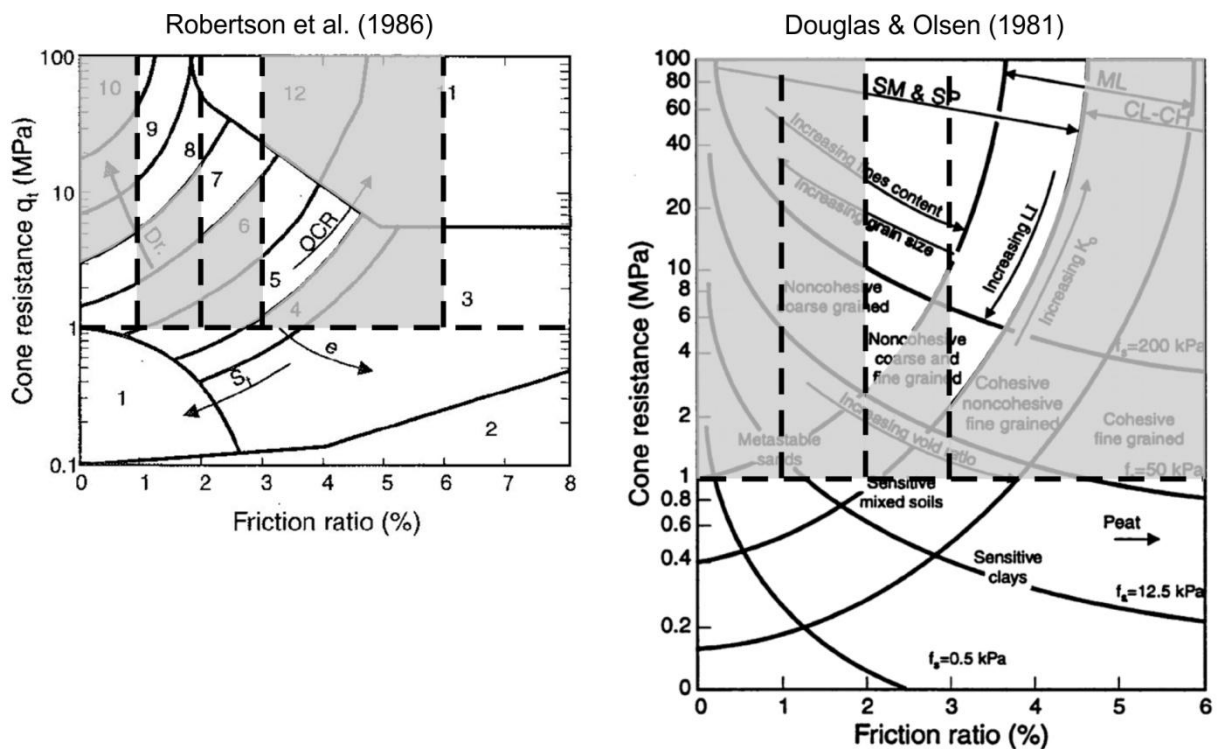


Figure 2-20 : Comparaison entre les catégories de sols définies par le CSTC (2016) dans les directives relatives au calcul de la capacité portante des pieux en Belgique, et les diagrammes de classification des sols. Les zones grisées correspondent aux endroits où les deux approchent se corrént.

### 6.3.2. Approches indirectes

En repartant de l'équation 2-12, la capacité portante limite nette d'un pieu ( $R'_b$ ) est ici assimilée à la résistance au cône ( $q_c$ ) du CPT. Comme l'ont montré Robertson *et al.* (1988), les approches indirectes du calcul de la capacité portante d'un pieu, au moyen d'essais de pénétration statique, sont moins fiables que les méthodes directes. C'est la raison pour laquelle elles ne sont plus utilisées aujourd'hui. Ces méthodes restent cependant intéressantes car elles ont été développées à partir de mécanisme de rupture se produisant lors de l'enfoncement du pieu. Elles permettent dès lors de mieux comprendre la cinématique de rupture se produisant aux alentours d'une fondation profonde et, par extension, de la pointe



d'un CPT. Par ailleurs, ces approches sont toujours utilisées pour déterminer les paramètres de résistance du sol, à savoir  $c$  et  $\phi$ .

Dans ce qui suit, deux approches indirectes sont développées. L'une est issue du calcul de la capacité portante initialement développé pour les fondations superficielles. Les apports et les limitations de cette approche sont présentés. Les limitations de cette première approche ont abouti à l'établissement d'une seconde approche, qui se base sur la prise en compte d'une certaine déformabilité du matériau dans la cinématique de rupture du sol à la base d'un pieu. Cette seconde approche se base sur la théorie d'expansion de cavité.

L'approche basée sur la théorie de la capacité portante des fondations superficielles sera appliquée pour la détermination des paramètres de résistance mécanique dans le chapitre 5. Les valeurs obtenues y seront comparées à celles obtenues au moyen d'essais de laboratoire (essai triaxial et boîte de cisaillement direct).

- Méthodes issues de la capacité portante d'une fondation superficielle

L'évaluation de la capacité portante limite d'une fondation superficielle a initialement été développée par Prandtl (1921) et Reissner (1924). Ils se sont basés sur les travaux de Rankine (1857), en améliorant la cinématique de rupture sous la fondation superficielle. Cette méthode considère dans un premier temps des mécanismes de rupture, puis analyse l'équilibre global du sol pour en déterminer la capacité portante limite. Cette dernière, relative à la base d'une fondation profonde, peut être estimée à partir de la résistance au cône du CPT, et devient alors :

$$q_c \approx R'_b = cN_c s_c + \gamma D N_q s_q + \frac{B}{2} \gamma N_\gamma s_\gamma \quad (2-19)$$

$$q_c \approx R'_b = \text{terme de cohésion} + \text{terme de profondeur} + \text{terme de surface}$$

où :

- B = le diamètre du pieu ou de la pointe du CPT,
- D = la profondeur de la base du pieu ou de la pointe CPT,
- $\gamma$  = le poids volumique du sol,
- c = la cohésion du sol sous la base du pieu ou de la pointe CPT,
- $N_\gamma, N_q, N_c$  = les coefficients de capacité portante développés pour les pieux, et
- $s_\gamma, s_q, s_c$  = les coefficients correctifs liés à la forme circulaire de la section transverse du pieu ou de la pointe CPT.

Pour une fondation profonde, le terme de surface est habituellement négligé. Il en résulte que, pour un matériau granulaire sans cohésion (sable), la résistance au cône vaut :

$$q_c = \gamma D N_q s_q \quad (2-20)$$

et pour un matériau purement cohérent (argile), à court terme ( $\phi=0$ ), la résistance au cône devient :

$$q_c = c_u N_c s_c + \gamma D \quad (2-21)$$

Différents schémas de rupture du sol autour de la base du pieu ont été proposés. Le modèle proposé par Prandtl (1921), Reissner (1924) et Terzaghi (1943), notamment, considère un schéma de rupture typique de celui relatif aux fondations superficielles (Figure 2-21 (a), Figure 2-22). Il se compose d'une zone triangulaire sous la base du pieu caractérisée par un état d'équilibre limite inférieur (ELI) de Rankine, de deux zones triangulaires situées de part et d'autre de la base du pieu et caractérisées par un état d'équilibre limite supérieur (ELS) de Rankine, et de deux zones de transition reliant la zone en ELI aux zones en ELS. Les zones de transition sont caractérisées par des lignes de rupture par cisaillement en spirale logarithmique. L'équilibre de rotation de la zone de transition mène au calcul de  $N_q$ . La Figure 2-23 illustre différentes relations entre  $N_q^*$  et  $\phi$  pour une fondation circulaire.  $N_q^*$  est un facteur de capacité portante qui prend en compte dans sa valeur, la forme circulaire de la fondation profonde :

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \quad (2-22)$$

$N_c$  vaut quant à lui :

$$N_c = (N_q - 1) \tan^{-1} \phi \quad (2-23)$$

Ce modèle de rupture considère un comportement du sol de type rigide-plastique, régi par la loi de Mohr-Coulomb. Une surcharge uniforme agissant sur un plan horizontal prolongeant la base de la fondation est également considérée. Les facteurs correctifs liés à la forme des fondations profondes ont été introduits pour la première fois par Terzaghi (1943).

De Beer (1945) et Meyerhof (1951), notamment, ont proposé une approche similaire mais avec un schéma de rupture différent, caractérisé par des extensions des surfaces de cisaillement au-dessus de la base de la fondation (Figure 2-21 (b)). Cette cinématique de rupture engendre des valeurs différentes de  $N_q$  et  $N_c$  en fonction de  $\phi$ . Elle n'a cependant jamais été observée expérimentalement (Djoneidi Djafari & Frank, 1983).

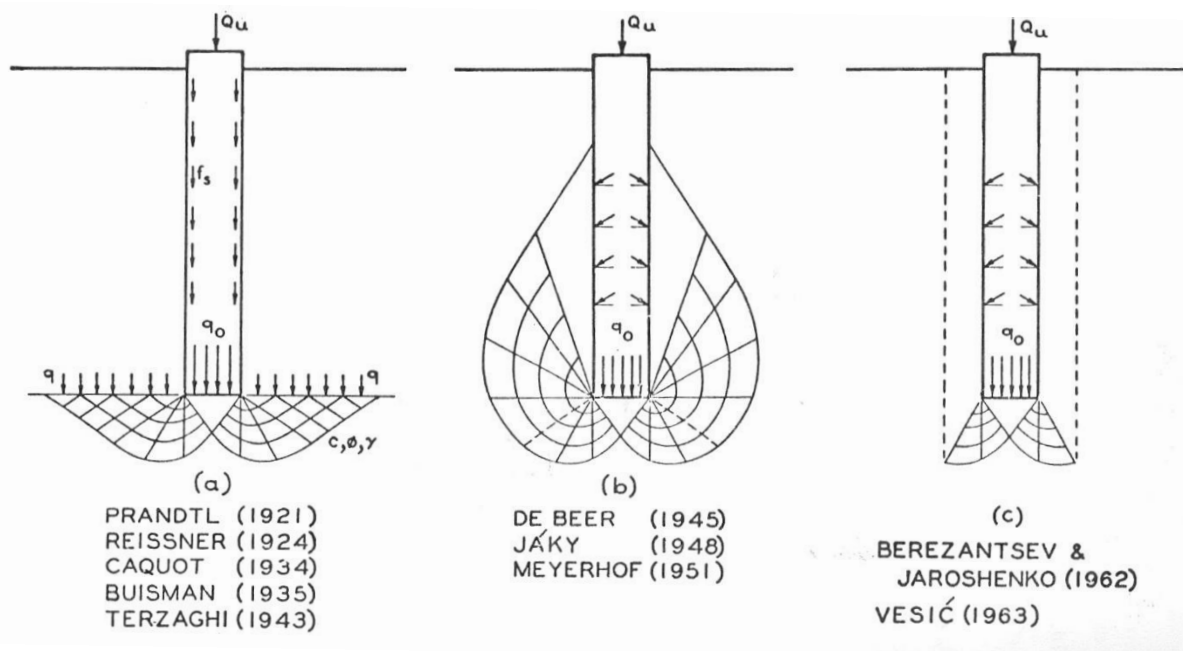
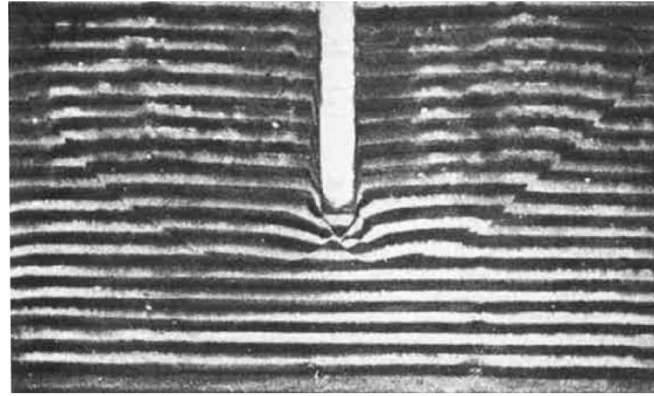


Figure 2-21 : Différentes cinématiques de rupture du sol autour d'un pieu (d'après Vesić, 1975).



Sable compact  $D_r \sim 0,9$   
Fondation rectangulaire  $B = 1,5$  et  $D/B = 5$

Figure 2-22 : Rupture générale par cisaillement pour une fondation rectangulaire à faible profondeur dans un sable très dense (d'après Vesic, 1963).

Un troisième modèle de rupture du sol autour de la base d'un pieu a été proposé par Vesic (1963), notamment. Sur base d'observations expérimentales, ce dernier décrit trois modes de rupture pouvant survenir à la base d'une fondation : rupture générale par cisaillement, rupture locale par cisaillement, lié à un refoulement incomplet, et rupture de poinçonnement (« punching ») par cisaillement. Le mode de rupture locale est représenté sur la Figure 2-21 (c). Le modèle considère dans ce cas une zone triangulaire élastique sous la base du pieu, entourée de part et d'autre par deux zones plastiques dont l'extension est gouvernée par l'angle au sommet.

Le Tableau 2-8 reprend quelques-unes des expressions proposées pour le calcul de  $N_q$  et pour le facteur de forme relatif à une fondation profonde circulaire. Ces expressions peuvent être utilisées pour déterminer l'angle de frottement interne du sol pour un sable sans cohésion.

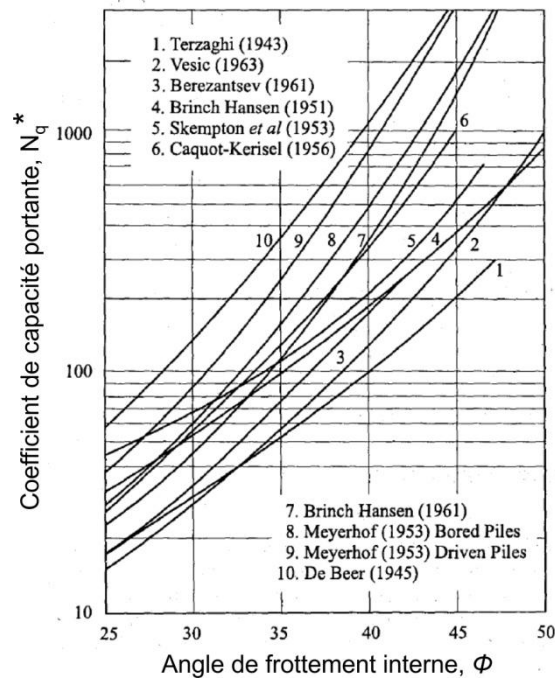


Figure 2-23 : Facteur de capacité portante pour une fondation profonde circulaire,  $N_q^*$  en fonction de l'angle de frottement interne,  $\phi$  (modifié, d'après Kezdi, 1975).

Tableau 2-8 : Compilation de différentes expressions de  $N_q$  et du facteur de forme  $s_q$  relatifs aux fondations profondes.

Modèle	$s_q$	$N_q$	
Prandtl (1921)	1	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	(2-24)
Terzaghi (1943)	1,3	$N_q = \frac{e^{(3\pi/2 - \phi') \tan \phi'}}{2 \cos^2(\pi/4 + \phi'/2)}$	(2-25)
Caquot & Kerisel (1966)*	1	$N_q = e^{2\pi \tan \phi} = 10^{2,73 \tan \phi}$	(2-26)
De Beer (1945)	1,3	$N_q = e^{2\pi \tan \phi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	(2-27)
Brinch Hansen (1970)	$f(\phi)$	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	(2-28)
Vesic (1963)	3	$N_q = e^{3,8\phi \tan \phi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	(2-29)
Janbu & Sennehet (1974)	1	$N_q = e^{(\pi - 2\beta) \tan \phi} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	(2-30)

\* Développé expérimentalement pour une profondeur supérieure à la profondeur critique.

Cependant, l'équation 2-20 montre que dans un sable sans cohésion, si  $N_q$  est constant,  $q_c$  ou  $R_b$  devrait augmenter proportionnellement avec la profondeur. Or, Vesic (1963) et Kerisel *et al.* (1965) observèrent qu'une telle relation de proportionnalité n'est présente qu'à très faible profondeur ( $D/B \leq 4$ ). A plus grande profondeur ( $D/B \geq 15$  à 20), la résistance au cône devient constante et indépendante de la profondeur (Figure 2-24). La même observation a été réalisée pour la valeur de frottement latéral. Cette profondeur est appelée profondeur critique, et est fonction uniquement de  $\phi$ . Il est également important de noter que la valeur de résistance atteinte au-delà de la profondeur critique est indépendante de la section du pieu (Kerisel, 1958 ; De Beer, 1963) (Figure 2-24). Ceci constitue un argument en faveur de l'utilisation du CPT pour estimer la capacité portante ultime d'un pieu de plus grand diamètre. Au-delà de cette profondeur, Vesic (1963) précise que seule la rupture de poinçonnement par cisaillement est présente. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont mentionné l'importance de prendre en compte la compressibilité du sol dans les mécanismes de rupture aux alentours de la base de la fondation (Terzaghi, 1943 ; Meyerhof, 1951 ; Vesic, 1963). Or, aucune des théories mentionnées jusqu'ici ne considère réellement cet aspect. De plus, ces théories ignorent l'influence de la pénétration du pieu sur l'état des contraintes initial autour de pieu, et en particulier sur les contraintes horizontales qui ont tendance à augmenter. Enfin, les surfaces de cisaillement schématisées à la Figure 2-21 ne sont en général pas observées autour du cône situé à grande profondeur. Ces observations ont finalement conduit à abandonner ces diverses théories pour le dimensionnement d'un pieu car elles sont relativement imprécises.

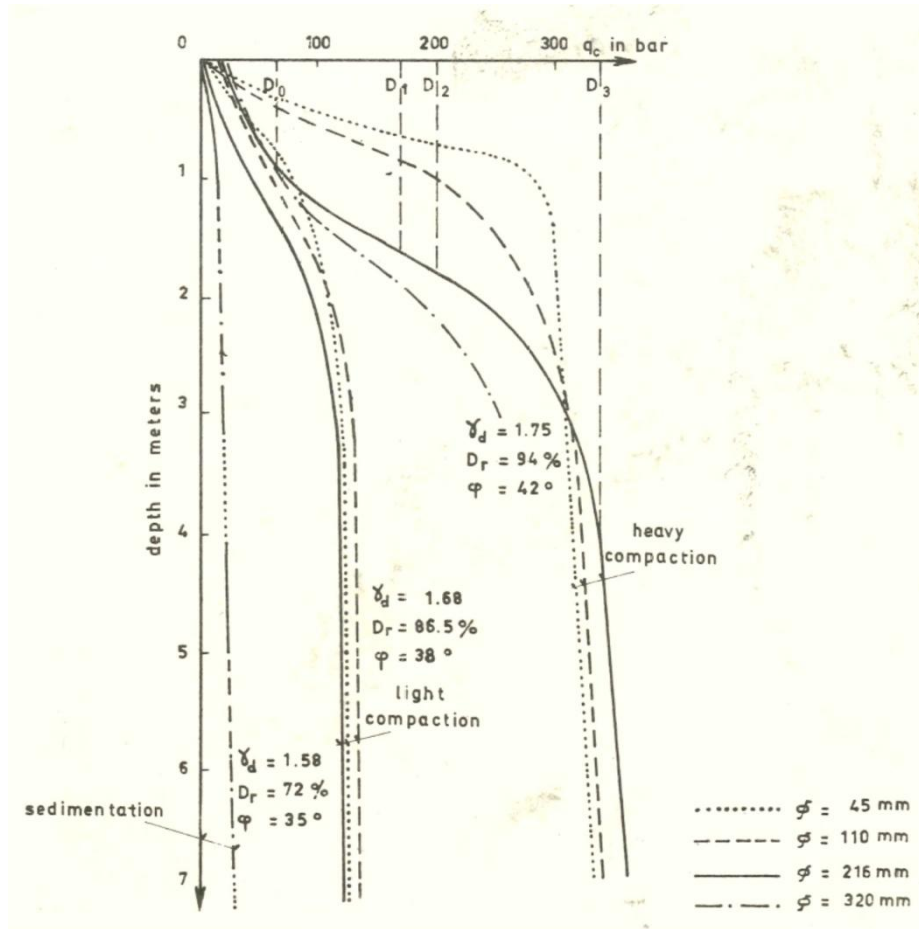


Figure 2-24 : Variation de la résistance au cône pour des sables de différentes densités et des pieux de différents diamètres (d'après Kerisel, 1958).

- Méthodes par expansion de cavité

L'approche par expansion de cavité considère la formation d'une cavité sphérique ou cylindrique autour du pieu à refoulement du sol, au cours de son enfoncement à grande profondeur, dans un milieu élasto-plastique. Les théories développées par cette approche permettent d'estimer plus précisément la capacité portante d'un pieu que celles issues de la théorie de la capacité portante (Yu & Mitchell, 1998 ; Yu, 2000). Ceci est lié à la prise en compte de paramètres de raideur et de déformabilité du sol, ainsi que l'augmentation des contraintes horizontales suite à l'enfoncement du pieu.

Dans de l'argile normalement consolidée, l'installation du pieu peut être modélisée comme l'expansion d'un cylindre de rayon variant de zéro à celui du pieu. Ce modèle permet d'évaluer les modifications de l'état des contraintes dans le sol autour du pieu, et entre dans le calcul de la capacité portante liée au frottement le long du pieu. La capacité portante à la pointe est corrélée à la pression limite nécessaire à la formation d'une cavité sphérique. Cette pression limite peut être estimée de manière semi-empirique à partir du CPT.

La capacité portante à la base du pieu est fonction de la pression limite d'expansion d'une cavité sphérique et d'une contrainte de cisaillement à l'interface entre le sol considéré comme rigide et le sol à comportement parfaitement plastique (Gibson, 1950). Suivant ce modèle, la capacité portante limite à la pointe dans une argile vaut :

$$R'_b = \psi_s + \alpha c_u \quad (2-31)$$

avec  $\alpha$  compris entre 0 et 1 (Yu, 2000).

Dans un sable, un des premiers modèles permettant de calculer la capacité portante limite à la base d'une fondation profonde a été proposé par Gibson (1950) :

$$R'_b = (1 + \tan \phi \tan \alpha) \psi_s \quad (2-32)$$

où :

- $\phi$  = l'angle de frottement interne du sol, et
- $\alpha$  = l'angle à la base du triangle considéré comme rigide, avec

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (2-33)$$

D'autres modèles sont bien sur, par la suite, venus compléter et préciser celui de Gibson (p.ex. Randolph *et al.*, 1994 ; Carter *et al.*, 1986 ; Yu & Houlsby, 1991). Ils ne seront toutefois pas abordés plus en détail dans le cadre de cette thèse.

L'essai de pénétration statique permet d'approcher les caractéristiques de résistances du sol en présence afin de déterminer la capacité portante du pieu. Pour un matériau sableux ou argileux, les équations 2-20 et 2-21 sont respectivement utilisées. Le Tableau 2-9 suivant donne quelques relations semi-empiriques pour le calcul de  $N_c$  et de  $N_q$  pour différents modèles. La Figure 2-25 illustre deux exemples de schémas de rupture à la base du pieu d'après la théorie d'expansion de cavité.

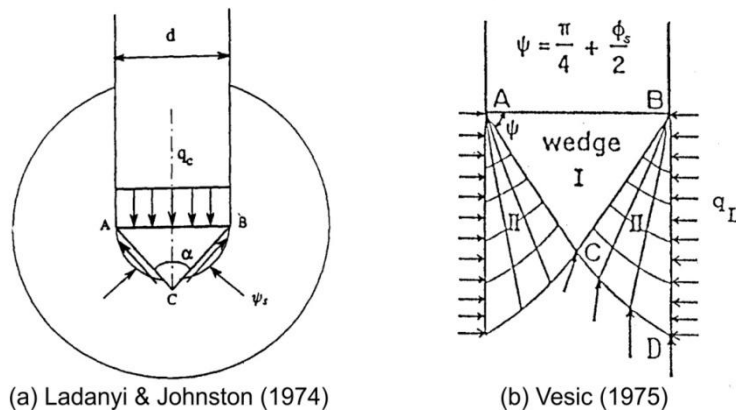


Figure 2-25 : Exemples de schémas de rupture à la base d'un pieu selon la théorie d'expansion de cavité.

La Figure 2-26 illustre des résultats expérimentaux d'introductions successives à niveau constant, générant la formation d'une cavité sphérique à la base d'un pieu (Ladanyi, 1961). Pour obtenir ces photographies, un mélange sec de sable et de ciment compacté et coloré a progressivement été introduit dans un milieu sableux considéré comme homogène par l'intermédiaire d'un tube fixe et au moyen d'un piston. Le diamètre intérieur du tube équivaut à 33,5 mm, très proche de celui d'une pointe de 10 cm<sup>2</sup> de section. Le mélange a ensuite été humidifié afin qu'il durcisse. Après durcissement et séchage, le matériau a été scié suivant un plan vertical de symétrie. Les résultats obtenus montrent la formation d'un bulbe sphérique se formant à l'aplomb du tube. Lorsque la profondeur est faible, deux phases de déformations sont observées. La première correspond à l'expansion d'une cavité, puis est suivie par une rupture par refoulement, comme le prédisent les théories se rapportant à la capacité portante. Dans ce cas, il est intéressant de constater qu'il y a successivement deux modes de rupture dans le matériau situés aux alentours de la base du pieu.

Tableau 2-9 : Différentes relations pour calculer  $N_q$  et  $N_c$  par la théorie d'expansion de la cavité, à partir du CPT.

Auteurs	Calcul de $N_c$ et $N_q$	
<b>Pour un matériau purement cohésif</b>		
Ladanyi & Johnston (1974)	$N_c = 3,16 + 1,33 \ln\left(\frac{G}{c_u}\right)$	(2-34)
Vesić (1975)	$N_c = 3,90 + 1,33 \ln\left(\frac{G}{c_u}\right)$	(2-35)
Baligh (1975)	$N_c = 12,0 + \ln\left(\frac{G}{c_u}\right)$	(2-36)
Yu (1993) – pour un cône parfaitement lisse	$N_c = 4,18 + 1,155 \ln\left(\frac{\sqrt{3} G}{2 c_u}\right)$	(2-37)
Yu (1993) – pour un cône parfaitement rugueux	$N_c = 9,4 + 1,155 \ln\left(\frac{\sqrt{3} G}{2 c_u}\right)$	(2-38)
<b>Pour un matériau sans cohésion</b>		
Ladanyi & Johnston (1974)*	$N_q = \frac{(1 + 2K_0)A}{3} [1 + \sqrt{3} \tan(\lambda\phi')]$	(2-39)
Vesić (1975)**	$N_q = \left(\frac{1 + 2K_0}{3 - \sin\phi'}\right) e^{[(\pi/2 - \phi') \tan\phi']} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) (I_{rr})^n$	(2-40)

\* dans l'équation 2-39,

A est le rapport entre la pression limite effective pour la formation d'une cavité sphérique et la contrainte effective moyenne initiale ;

$\lambda$  est la rugosité du cône ( $\lambda=0$  pour un cône parfaitement lisse, et  $\lambda=1$  pour un cône parfaitement rugueux).

\*\* dans l'équation 2-40,

$I_{rr}$  est l'indice de rigidité réduit qui prend en compte la déformabilité du sol ;

n est un paramètre uniquement fonction de l'angle de frottement interne effectif,  $\phi'$ .

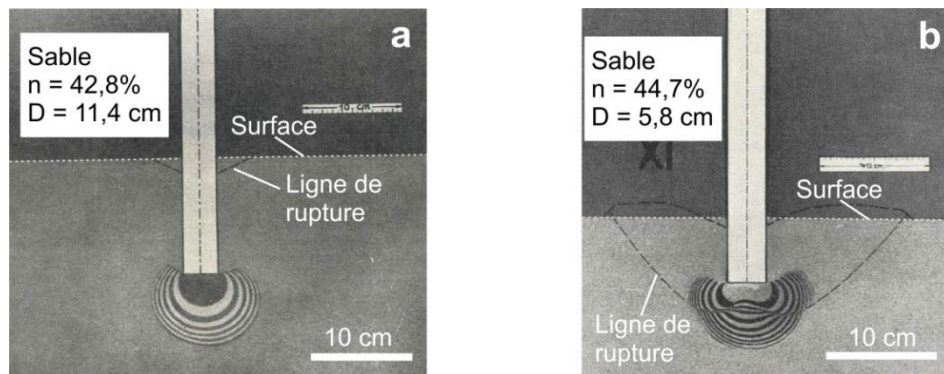


Figure 2-26 : Résultats expérimentaux d'introductions successives à niveau constant (modifié, d'après Ladanyi, 1961). (a) Essai pour un encastrement proche de 3,4. (b) essai pour un encastrement proche de 1,7. Paramètres :  $n$  = porosité (après introduction) ;  $D$  = profondeur d'introduction.

## 7. Conclusions intermédiaires

L'essai de pénétration statique (CPT) est un essai très couramment réalisé, qui est également au cœur de la démarche expérimentale de cette thèse. C'est pourquoi il bénéficie d'un chapitre à part entière. Les multiples développements technologiques réalisés autour du CPT sont à l'origine de la conception de différentes pointes, mécanique (M1, M2, M4) et électrique (avec ou sans possibilité de mesure de la pression d'eau interstitielle). Les pointes M1, M2 et électrique seront utilisées dans la suite de cette étude.

Deux paramètres issus de l'essai de pénétration statique sont à la base des très nombreuses recherches scientifiques. Il s'agit de la résistance au cône ( $q_c$ ) d'une part, et de la résistance de frottement latéral local ( $f_s$ ) d'autre part. Le rapport entre  $f_s$  et  $q_c$  donne accès au rapport de frottement ( $R_f$ ) qui constitue également un paramètre important, utilisé essentiellement dans la détermination des types de sol (p.ex. sable, argile limoneuse, argile) recoupés. Celle-ci se réalise au moyen de diagrammes de classification des sols, que les études scientifiques n'ont cessé de préciser et d'affiner depuis plus de 50 ans. Cependant, le type de sol défini sur base de tels diagrammes peut différer du type de sol déterminé au moyen de la classification internationale des sols, qui se base sur la granulométrie et la consistance du matériau.

Le CPT est également un outil d'investigation du sous-sol qui permet d'identifier des couches présentant des caractéristiques mécaniques différentes. Les valeurs de la résistance au cône, et dans une moindre mesure celles de la résistance au frottement latéral local, sont influencées par la couche sous-jacente à l'approche de l'interface. Cette distance d'influence peut atteindre jusqu'à 20x le diamètre du cône. Elle est notamment fonction de la densité du matériau et de la contrainte horizontale initiale.

Une série de paramètres mécaniques peuvent être estimés au moyen du CPT, selon des niveaux de fiabilité différents. Ces paramètres sont déterminés, la plupart du temps, au moyen de corrélations semi-empiriques établies par comparaison avec des résultats d'essais en laboratoire. D'une manière très générale, les paramètres déterminés avec une fiabilité correcte concernent l'angle de frottement effectif dans le sable et la cohésion non drainée dans l'argile. Leur détermination se base souvent sur la théorie de la capacité portante développée initialement pour une fondation superficielle, et adaptée au cas d'une fondation circulaire profonde. Par ailleurs, l'estimation de paramètres relatifs à la déformabilité est habituellement moins fiable que les paramètres de résistance mécanique ( $c$  et  $\phi$ ). Certaines de ces corrélations semi-empiriques seront développées dans le chapitre 5 et leurs résultats seront comparés à ceux issus des essais en laboratoire, pour un matériau limoneux.



**Chapitre 3 :**  
**Étude à l'échelle régionale et suprarégionale**



## 1. Introduction

En vue de mieux appréhender le matériau analysé dans le cadre de cette thèse, le chapitre présente, par une approche chronostratigraphique, le contexte général des dépôts lœssiques (limon éolien) étudiés. Le chapitre est articulé autour de l'étude des lœss à différentes échelles, depuis une échelle globale, jusqu'à une échelle régionale, correspondant à la Moyenne Belgique, en passant par une analyse à l'échelle de l'Eurasie. La couverture lœssique correspondant à ces différentes échelles est d'abord présentée. Une analyse inédite, plus détaillée, de cette couverture a été réalisée à l'échelle de la Hesbaye (région située au nord de Liège), le long d'un tronçon de la ligne TGV Liège – Bruxelles. Les résultats de cette étude sont présentés dans la section s'y rapportant. La deuxième partie du chapitre est développée autour de la description stratigraphique de la séquence lœssique de référence pour la Belgique. Cette description servira de base à la compréhension des séquences lœssiques investiguées et présentées dans le chapitre 4 suivant. Quelques corrélations stratigraphiques entre des horizons repères issus de séquences lœssiques différentes sont également présentées. Ces corrélations sont d'abord illustrées à l'échelle régionale, puis entre la Belgique et les pays limitrophes et enfin à l'échelle eurasiatique.

Certains passages de ce chapitre ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques :

- Delvoie, S., Boulvain, F., Charlier, R. & Collin, F., 2016a. Detailed characterization of the Late Pleistocene loess sequence stratigraphy of Remicourt (Hesbaye region, Belgium) with cone penetration tests. *Geologica Belgica*, **19**, 281-289.
- Delvoie, S., Pirson, S., Charlier, R. & Collin, F., 2016c. Étude de la séquence stratigraphique des lœss de la carrière de Romont (Ében-Émael, Belgique) par une campagne géotechnique. *Notae Praehistoricae*, **36**, 5-21.

## 2. Le lœss (limon éolien)

### 2.1. Qu'est ce que le lœss ?

Depuis les premières observations publiées par K. von Leonhard (1824) jusqu'à ce jour, il n'y a pas encore de consensus au sein de la communauté scientifique sur la définition exhaustive officielle du lœss (Pécsi, 1990, 1995 ; Pye, 1995 ; Antoine, 2002 ; Smalley *et al.*, 2011 ; Sprafke & Obrecht, 2016). Grâce aux travaux de F. von Richthofen (1882) sur d'importants dépôts éoliens pouvant atteindre localement 300 m d'épaisseur rencontrés en Chine, il est toutefois maintenant communément admis que le lœss consiste en une accumulation de limon d'origine éolienne (Smalley *et al.*, 2001 ; Sprafke & Obrecht, 2016). M. Pécsi (1990) précisa que le lœss comporte généralement en moyenne entre 50 et 70 % (en poids) de particules comprises entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . La composition minéralogique est largement dominée par le quartz (en moyenne entre 60 et 70 %). En outre, le lœss résulte de processus sédimentaires et post-dépositionnels complexes.

Le lœss est généralement associé aux périodes les plus froides du Quaternaire. Il se localise en marge de l'extension maximale des grands inlandsis présents au Quaternaire, comme c'est le cas notamment en Amérique du Nord et en Europe ou en périphérie de déserts comme en Chine. Le phénomène principal responsable du transport des particules est le phénomène de déflation éolienne. Ce mécanisme permet des déplacements de particules pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Il crée également un granoclassement des particules : les plus fines se déplacent sur de plus grandes distances que les particules plus

grossières. Après le transport, se produit le dépôt des particules. Ce dernier est régi par les conditions atmosphériques (précipitations, courants descendants, baisse de la vitesse du vent) et par les conditions à la surface topographique (présence de végétation, présence de relief). L'accumulation de couches de lœss étendues et épaisses résulte essentiellement de la combinaison de trois facteurs. D'abord, il est nécessaire de disposer d'apports importants de particules sur des périodes de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'années. Ensuite, des vents ayant une énergie suffisante pour transporter des particules doivent être présents. Enfin, la présence de courants descendants ou de pièges à la surface topographique doit permettre le dépôt des particules en suspension. La végétation et les barrières topographiques servent souvent d'éléments à la base de la sédimentation des particules (Pye, 1995).

Une séquence lœssique se compose habituellement d'une succession de couches de lœss et de paléosols. Il est d'ailleurs plus usuel de parler de séquence lœssique pour désigner une couche de lœss dans son ensemble. Par cette succession de lœss-paléosols, la séquence lœssique constitue une archive paléoclimatique importante, enregistrant les modifications du paléoclimat et de la dynamique globale passée du transport de poussières minérales dans l'atmosphère (Kohfeld & Harrison, 2001 ; Derbyshire, 2003 ; Muhs *et al.*, 2014). Une séquence lœssique illustre les changements paléoenvironnementaux survenus au cours d'une période relative au Quaternaire (Haesaerts, 1985 ; Rousseau, 1991 ; Antoine *et al.*, 1999, 2009, 2013 ; Haesaerts *et al.*, 2005, 2009). Grâce à leurs caractéristiques propres, les dépôts lœssiques constituent également un matériau à la base des sols les plus fertiles au monde (Catt, 2001). Par ailleurs, de nombreux sites archéologiques paléolithiques sont préservés au sein de la séquence lœssique (Locht *et al.*, 2003, 2016 ; Di Modica, 2011 ; Di Modica *et al.*, 2016 ; Richter, 2016). La plupart des établissements néolithiques d'Europe sont aussi associés aux régions lœssiques fertiles (Pécsi & Richter, 1996). En raison de sa proximité avec la surface topographique, la couche de lœss constitue souvent le dépôt sous les fondations de nombreux bâtiments et ouvrages, avec des caractéristiques géotechniques spécifiques (Derbyshire & Mellors, 1988 ; Dijkstra *et al.*, 1994 ; Assallay *et al.*, 1997 ; Delage *et al.*, 2005). En outre, le lœss est un matériau sujet à l'érosion et aux glissements de terrain (Derbyshire, 2001). Ces différentes applications font du lœss un carrefour entre une variété de disciplines scientifiques telles que la géologie du Quaternaire, la géotechnique, l'archéologie et la pédologie.

### 2.2. Origine des glaciations

Le Quaternaire est caractérisé par une succession de périodes glaciaires, plus froides, et de périodes interglaciaires, plus chaudes. Une glaciation est une période durant laquelle la quantité de glace stockée à la surface du globe est supérieure à la moyenne. De très nombreuses études ont affiné ce schéma bivalent simplifié en montrant qu'il existe bien plus de périodes froides et de périodes chaudes à l'échelle globale qu'il n'a été défini de glaciations et d'interglaciaires. Une période glaciaire peut donc elle-même être caractérisée par des périodes plus froides et des périodes plus chaudes.

La théorie astronomique de M. Milankovitch (1941) est acceptée par la communauté scientifique pour expliquer les variations millénaires de l'insolation à la surface de la Terre durant les 600 derniers milliers d'années. Cette théorie a été développée au cours des années 1980 et prend en compte différents mouvements cycliques principaux de la Terre par rapport au Soleil :

- la variation de l'excentricité du Soleil : l'orbite de la Terre est une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers. La période de retour équivaut à environ 100.000 ans ;
- la précession des équinoxes : il s'agit d'un mouvement conique effectué par l'axe de rotation de la Terre autour du plan de l'écliptique. La période vaut 26.000 ans ;

- la variation de l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre : l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la normal au plan de l'écliptique varie entre 21°55' et 24°18' avec une périodicité d'approximativement 41.000 ans.

La combinaison de ces différents mouvements aboutit à des variations de l'insolation à la surface de la Terre au cours du temps, en relativement bonne corrélation avec d'autres indicateurs des fluctuations paléoclimatiques tels que les isotopes de l'oxygène (Hays *et al.*, 1976). Ces derniers définissent d'ailleurs le cadre chronostratigraphique des dernières centaines de milliers d'années. Ainsi, le  $\delta^{18}\text{O}$  constitue un indicateur de référence pour les fluctuations paléoclimatiques. Il se définit en général par rapport à la composition moyenne actuelle de l'eau océanique (SMOW, « Standard Mean Ocean Water »), comme suit :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \times 1000 \quad (3-1)$$

Le  $\delta^{18}\text{O}$  peut être déterminé à partir de carottes de forages réalisés dans les sédiments qui composent les fonds océaniques, par l'analyse isotopique de foraminifères benthiques. Certains de ces organismes marins sont constitués d'un test carbonaté qui fixe le rapport isotopique présent dans l'eau océanique correspondant au moment de la vie de l'organisme. Ces derniers sont par ailleurs extrêmement abondants, et ce dans tous les océans. Le rapport isotopique obtenu de cette manière est donc représentatif du rapport isotopique de l'eau océanique. Celui-ci est essentiellement contrôlé par les fluctuations du volume global des océans. Le fractionnement isotopique de l'oxygène se produit par évaporation de l'eau océanique dans l'atmosphère. Ce processus favorise l'évaporation de l'isotope le plus léger, l'isotope  $^{16}\text{O}$ . En période froide, le volume d'eau océanique est plus faible en raison de la présence d'importante quantité de glace. Le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau océanique est donc plus élevé durant les périodes de bas niveau marin, c'est-à-dire durant les périodes de glaciation.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  peut également être issu de l'analyse d'épaisses carottes de glace provenant d'Antarctique ou du Groenland (Johnsen *et al.*, 2001 ; Andersen *et al.*, 2006). Dans la glace, le  $\delta^{18}\text{O}$  est plus faible en période froide qu'en période chaude. C'est donc la tendance inverse de celle observée dans les sédiments océaniques. En période chaude, il y a plus d'énergie disponible pour évaporer des molécules d'eau contenant l'isotope  $^{18}\text{O}$ . Il y a donc plus d'isotope  $^{18}\text{O}$  présent dans l'atmosphère. Arrivé aux pôles, c'est l'isotope  $^{18}\text{O}$  qui précipite préférentiellement par rapport à l'isotope  $^{16}\text{O}$ . Puisqu'il y a plus d' $^{18}\text{O}$  disponible dans l'atmosphère, il y a également plus de ce même isotope présent dans la glace. Cette tendance se marque aussi par l'analyse du rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

L'analyse des fluctuations isotopiques de l'oxygène mesurées à partir des sédiments océaniques a permis d'individualiser alternativement des périodes plus froides ( $\delta^{18}\text{O}$  plus élevé) et des périodes plus chaudes ( $\delta^{18}\text{O}$  plus faible). Il a alors été attribué à chacune de ces périodes un « stade isotopique marin », plus souvent dénommé par « MIS » (« Marine Isotope Stage »). Ainsi, la période interglaciaire actuelle, l'Holocène, est représentée par le MIS-1. La dernière période glaciaire, le Weichsélien, se compose des MIS-2 à MIS-5a-d. La dernière période interglaciaire, l'Éémien, constitue le MIS-5e. Un schéma chronostratigraphique synthétique reprenant le dernier million d'années est illustré à la Figure 3-1.

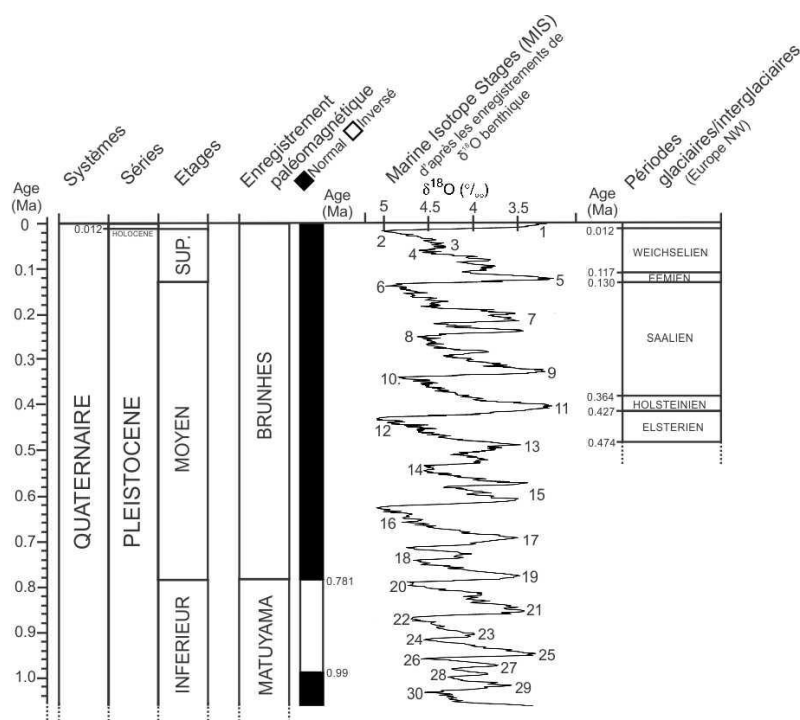


Figure 3-1 : Table de corrélations chronostratigraphiques du dernier million d'années (modifié, d'après Gibbard et al., 2004).

De manière comparable, l'étude des variations isotopiques de l'oxygène mesurées dans les glaces du Groenland a permis de définir une série « d'interstades » (GI – « Greenland Interstadial), périodes plus chaudes ( $\delta^{18}\text{O}$  plus élevé) et de « stades » (GS – « Greenland Stadial »), périodes plus froides ( $\delta^{18}\text{O}$  plus faible). La durée moyenne de chacun de ces stades est de l'ordre de 2000 ans. La dernière glaciation est composée de 24 interstades. Ces périodes sont également connues sous le nom d'événements de Dansgaard-Oeschger.

Il faut encore préciser que la théorie de Milankovitch n'explique pas toutes les variations majeures observées par l'analyse du  $\delta^{18}\text{O}$ . En effet, elle repose sur un modèle de fluctuation climatique linéaire alors que certaines variations isotopiques semblent correspondre à un schéma temporel non linéaire. D'autres causes doivent donc entrer dans le modèle afin d'expliquer ces autres fluctuations climatiques. Ces facteurs supplémentaires de changements climatiques globaux sont notamment la circulation océanique (Imbrie *et al.*, 1993), le cycle du carbone (Shackleton, 2000), la présence plus ou moins importante de glace à la surface des océans et des continents (Imbrie & Imbrie, 1980), la circulation atmosphérique, les émissions de poussières et d'aérosols volcaniques dans l'atmosphère et les variations de l'activité solaire.

### 2.3. Cadre chronostratigraphique du Pléistocène supérieur

La définition des stades isotopiques marins ainsi que des événements de Dansgaard-Oeschger permet d'établir le cadre chronostratigraphique du Pléistocène supérieur. Ce schéma servira de référence pour la suite de ce travail et sera fréquemment employé lorsque sera abordée la description stratigraphique des lèss. Ainsi, il est proposé de subdiviser le Pléistocène supérieur en différentes périodes chronoclimatiques, comme suit, du plus ancien au plus jeune : Émien (dernier interglaciaire), Début Glaciaire weichsélien, Pléniglaciaire inférieur weichsélien, Pléniglaciaire moyen weichsélien, Pléniglaciaire supérieur weichsélien, Tardiglaciaire weichsélien et Holocène (interglaciaire actuel). Cette subdivision est d'ailleurs fréquemment utilisée dans la littérature scientifique (cf. Zagwijn and Paepe, 1968; Zagwijn,

1974; Haesaerts *et al.*, 2016). Des corrélations chronostratigraphiques approximatives, à partir des stades isotopiques marins et des stades/interstades glaciaires, sont également proposées pour chacune de ces périodes chronoclimatiques. Les limites des périodes chronoclimatiques ont été choisies en prenant en compte les enregistrements stratigraphiques rencontrés dans la séquence lœssique belge, afin de faciliter leur distinction sur le terrain. Elle se base sur les travaux antérieurs de P. Haesaerts et de S. Pirson notamment (Pirson, 2007 ; Pirson *et al.*, 2009 ; Haesaerts *et al.*, 2016). Le schéma chronostratigraphique suivant pour le Pléistocène supérieur a donc été appliqué dans ce travail (Figure 3-2) :

- Dernier interglaciaire (Éemien) : approx. MIS 5e; GI 26 – GI 25a; 128 – 110,6 ka;
- Début Glaciaire weichsélien : approx. MIS 5d – 5a; GS 25 – GI 21.1a; 110,6 – 77,8 ka;
- Pléniglaciaire inférieur weichsélien : approx. MIS 4; GS 21.1 – GS 18; 77,8 – 59,4 ka;
- Pléniglaciaire moyen weichsélien : approx. majeure partie du MIS 3 – GI 17.2 – GI 5.1 ; 59,4 – 30,6 ka;
- Pléniglaciaire supérieur weichsélien : approx. fin du MIS 3 – main part of MIS 2; GS 5.1 – GS 2.1; 30,6 – 14,7 ka;
- Tardiglaciaire weichsélien : approx. fin du MIS 2; GI 1e – GS 1; 14,7 – 11,7 ka.

Cependant, la corrélation chronostratigraphique précise entre les stades isotopiques marins et les séquences continentales s'avèrent souvent imprécises (p.ex. Sánchez Goñi *et al.*, 2000; Gibbard and Van Kolfshoten, 2004; Sier *et al.*, 2011). C'est pourquoi il est suggéré de considérer ces corrélations avec la séquence stratigraphique belge comme des approximations.

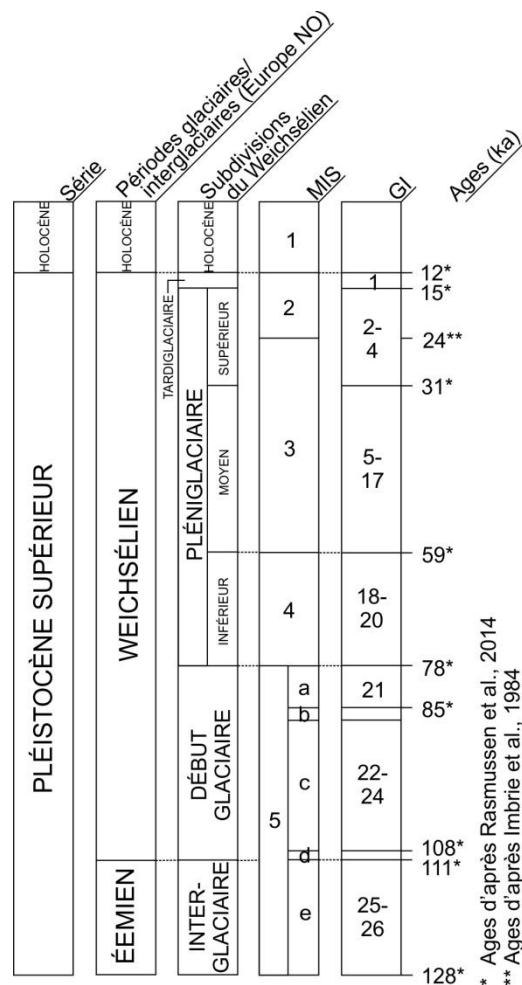


Figure 3-2 : Schéma chronostratigraphique du Pléistocène supérieur suivi dans le cadre de cette étude (compilé à partir de Pirson, 2007 ; Pirson *et al.*, 2009 ; Haesaerts *et al.*, 2016).

### 3. La couverture loessique au-delà de la Belgique

#### 3.1. Dans le monde

Des estimations montrent que le loess couvrirait plus de 10 % de la surface des continents à l'échelle globale (Pécsi, 1990 ; Smalley *et al.*, 2011). Sa couverture est principalement localisée dans les régions tempérées (Pye, 1995 ; Sprafke & Obreht, 2016). Sur la Figure 3-3, M. Pécsi (1990) individualise le loess, et les dépôts assimilés au loess « loess-like » en anglais). Cette distinction prête à confusion et est encore aujourd'hui discutée. Les loess atypiques présentent quelques caractéristiques qui diffèrent des loess typiques, à savoir notamment une proportion en argile ou en sable beaucoup plus importante (Antoine, 2002). Ils se localisent essentiellement dans les régions péri-désertiques.

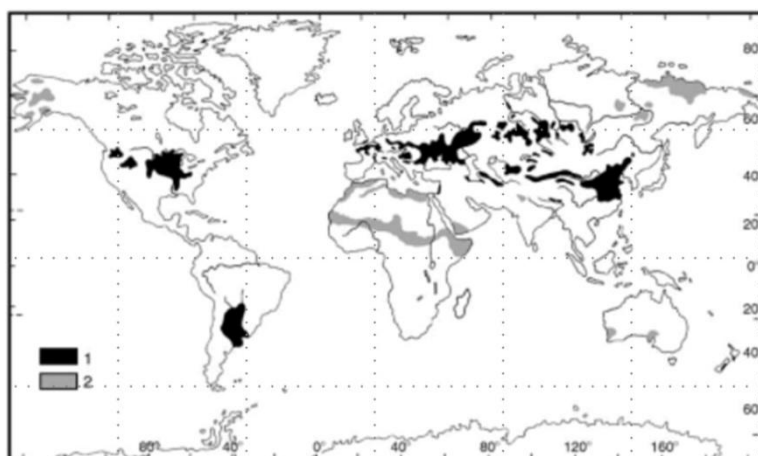


Figure 3-3 : Répartition du loess et des dépôts assimilés au loess (« loess-like » en anglais) à l'échelle globale (d'après Pécsi, 1990). Légende : 1. Loess ; 2. Dépôts assimilés au loess (« loess-like »).

#### 3.2. En Eurasie

En Europe du nord, les périodes les plus froides sont caractérisées par la présence d'un imposant inlandsis. Le maximum de l'extension vers le sud du front glaciaire au cours du Weichsélien s'est produit il y a environ 20.000 ans, durant le Pléniglaciaire supérieur. A cette époque, le pied de la calotte glaciaire s'étendait depuis le Royaume-Uni jusqu'en Russie du NO, en passant par les Pays-Bas, l'Allemagne et la Pologne méridionale. Cependant, comme il a déjà été mentionné précédemment, une période glaciaire est également composée de périodes plus chaudes. Il en résulte un déplacement constant, essentiellement nord-sud, du front glaciaire au cours du temps. La Figure 3-4 illustre l'extension du front de la calotte glaciaire à la fin du Saalien (avant-dernière période glaciaire) et à différents moments au cours du Weichsélien.



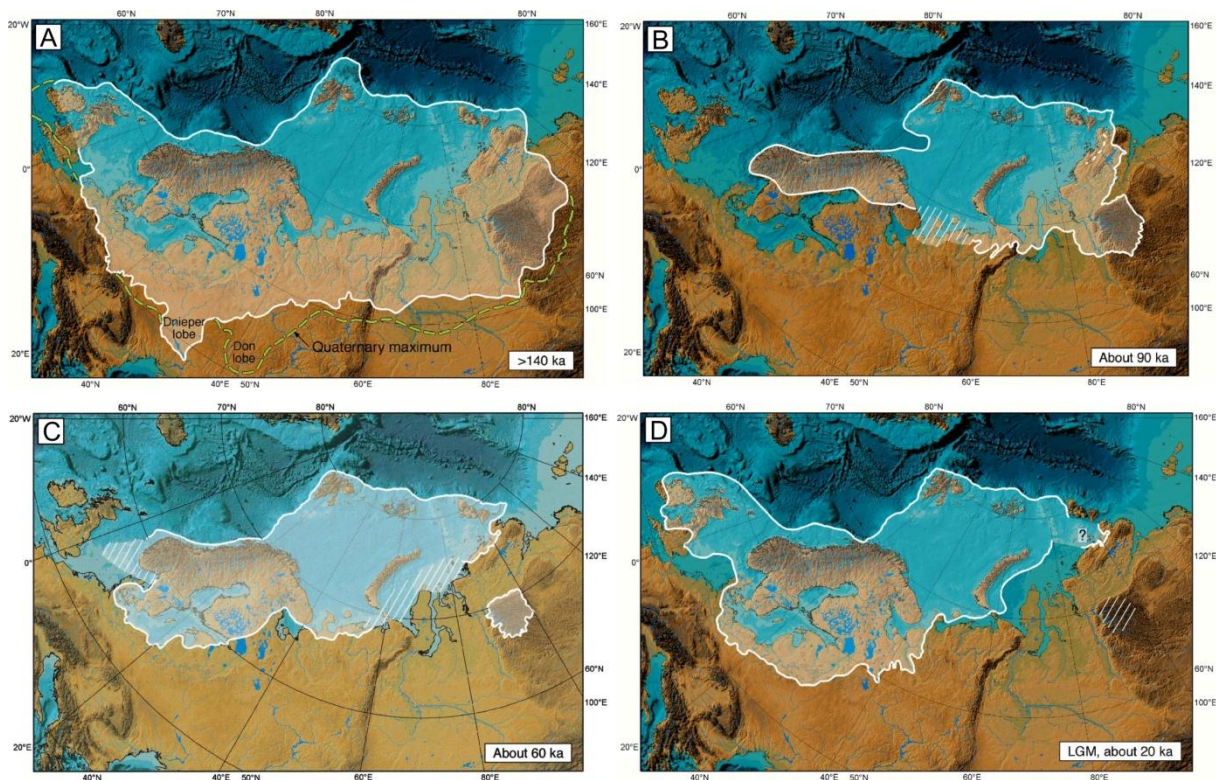


Figure 3-4 : Reconstitution de l'étendue de la calotte glaciaire en Eurasie (d'après Svendsen et al., 2004). (A) Pendant la fin du Saalien (160-140 ka) ; (B) Début Glaciation Weichsélien (90-80 ka) ; (C) Pléniglaciaire moyen Weichsélien (~60 ka) ; (D) Pléniglaciaire supérieur Weichsélien (~20 ka). Il faut préciser que cette reconstitution ne reprend pas d'autres calottes glaciaires ou inlandsis présents durant certaines périodes, notamment en Islande, au Groenland, dans les Alpes, et dans d'autres régions montagneuses. Les zones hachurées indiquent une incertitude sur la délimitation de la calotte glaciaire.

Parallèlement à l'extension de la calotte glaciaire centrée sur la Scandinavie, plusieurs plus petites calottes se sont également développées ailleurs en Europe. Il s'agit de calottes d'altitude parmi lesquelles les plus proches de la Belgique auraient recouvert, de manière plus ou moins épisodique, les Alpes, le Jura, les Pyrénées, le Massif Central, les Vosges, et encore la Forêt Noire.

Les lœss d'Eurasie, tout comme ceux que l'on rencontre en Amérique du Nord, résultent des glaciations, et essentiellement de la dernière glaciation. Ils se localisent en bordure du pied des calottes glaciaires quaternaires, et donc principalement en bordure de la calotte weichsélienne. Ils se répartissent essentiellement entre les latitudes 30° et 60° N, et plus particulièrement aux alentours du 50° parallèle (la Belgique se localise entre les latitudes 49°30' et 51°30'). Leur localisation est liée à l'extension maximale des fronts glaciaires. Les zones à l'origine du matériau limoneux, soumises à la déflation éolienne, sont les sandar (plaines glaciaires où se concentrent les matériaux drainés par les eaux de fonte en marge des glaciers), les estuaires et les plaines alluviales continentales (Antoine, 2002). Le modèle simplifié de leur mise en place est illustré à la Figure 3-5.

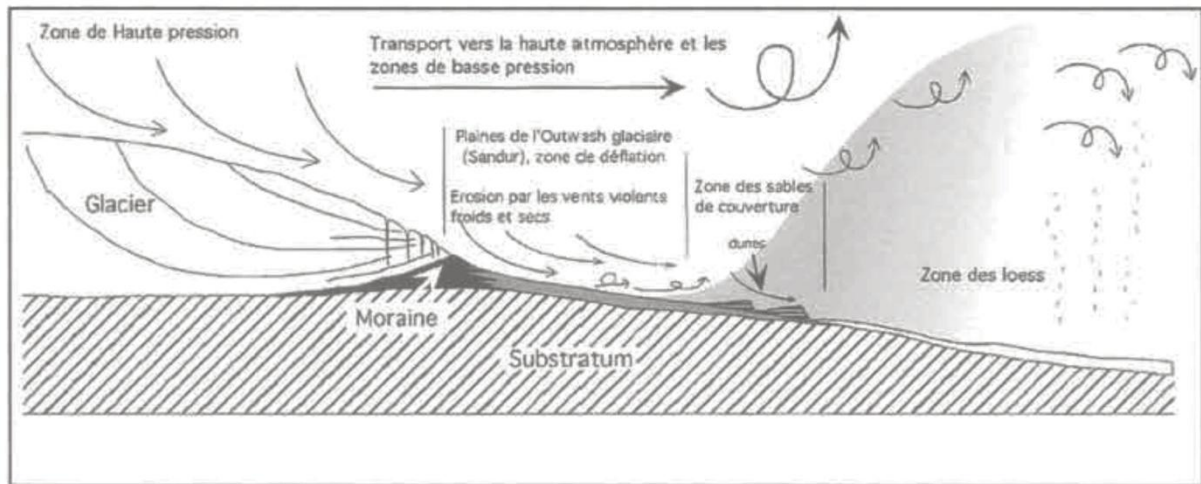


Figure 3-5 : Modèle de mise en place des sédiments éoliens en zone périglaciaire à proximité de grands inlandsis (d'après Antoine, 2002).

La Figure 3-6 reprend l'extension de la couverture loessique à l'échelle de l'Europe. Cette couverture s'étend depuis la Bretagne jusqu'aux plaines de Russie occidentale, en passant par la Belgique, les Pays-Bas, l'Allemagne, la Pologne, l'Autriche, la République Tchèque, la Slovaquie, la Hongrie, la Roumanie, l'Ukraine, la Moldavie, la Biélorussie et la Lituanie.

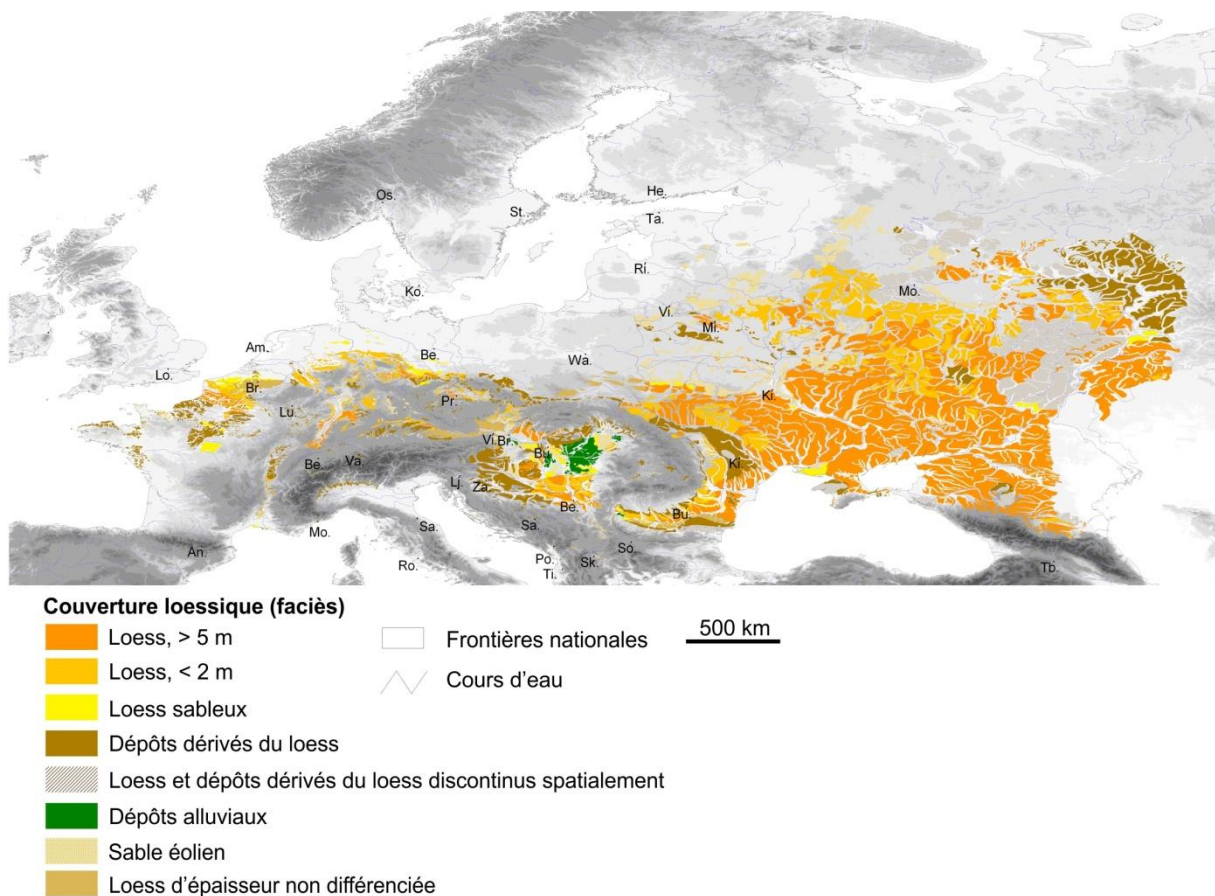


Figure 3-6 : Localisation de la couverture loessique en Europe (au 1/2.500.000), modifié d'après Haase et al. (2007).

L'analyse détaillée d'une séquence loessique révèle la présence de nombreux paléosols interstratifiés avec des niveaux loessiques. Ces paléosols sont les témoins de la présence d'une végétation à un moment donné, lorsque les conditions climatiques et le taux de sédimentation étaient favorables à son développement. Le type de végétation, lorsque celle-ci était en mesure de se développer, est lié aux conditions climatiques présentes à un moment donné et pour une latitude donnée. D'une manière très générale, en présence d'un climat tempéré, la végétation est arborée, incluant diverses essences de feuillus (climat comparable à l'actuel en Belgique). Une évolution du climat vers des conditions plus froides engendre une évolution de la végétation, d'abord toujours arborée mais composée essentiellement de conifères, puis de type toundra, de steppe, pour finalement atteindre un désert périglaciaire avec pergélisol.

La Figure 3-7 représente l'étendue des zones caractérisées par un pergélisol continu, discontinu ou sporadique ainsi que les zones soumises au gel, sans que ce dernier soit continu sur de longues périodes. Cette même figure montre des situations représentatives pour différentes périodes au cours de la première moitié du Weichsélien, à l'échelle de l'Europe du NO. Les MIS-5d et MIS-5b sont caractérisés par une évolution progressive vers des conditions climatiques plus froides, avec l'apparition d'un pergélisol d'abord sporadique à l'emplacement de la Belgique. Le MIS-4 et le début du MIS-3 sont généralement caractérisés par des conditions climatiques très rudes avec la présence régulière de phases de pergélisol continu, en lien avec un climat plus sec, dans une grande partie du nord de l'Europe et d'Europe centrale. Ces distributions peuvent être comparées à la configuration actuelle où plus aucune région d'Europe du NO n'est caractérisée par un pergélisol.

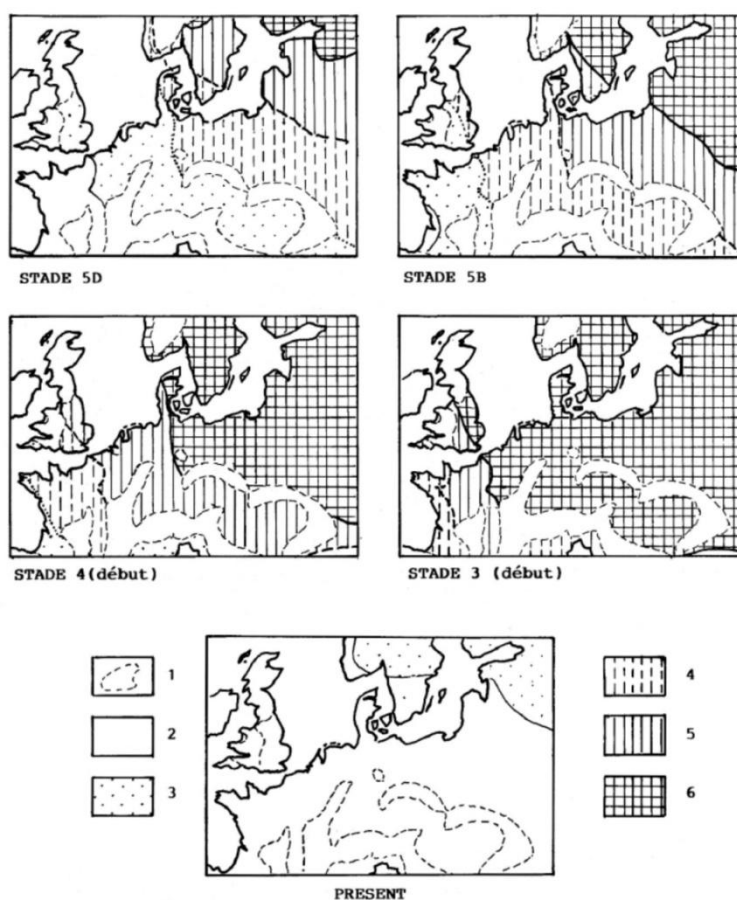


Figure 3-7 : Évolution des conditions climatiques régissant au cours du Weichsélien à nos jours (d'après Van Vliet-Lanoë, 1986). 1. Zone non considérée ; 2. Profondeur de gel inférieure à 1 m ; 3. Profondeur de gel supérieure à 1 m ; 4. Pergélisol sporadique ; 5. Pergélisol discontinu ; 6. Pergélisol continu.



## 4. La couverture loessique en Belgique

### 4.1. En Moyenne Belgique

La couverture loessique que l'on retrouve en Belgique résulte essentiellement du Weichsélien (dernière glaciation). Des loess datant des glaciations antérieures sont également présents sous les dépôts weichséliens mais en plus faible épaisseur et de manière plus discontinue. Comme l'indique la Figure 3-8, ces dépôts ont été apportés par des vents dominants venant du N à NO. Ils proviennent d'importantes zones de déflation localisées au droit d'anciens fonds marins exondés en Mer du Nord, et des Pays-Bas, en marge de la calotte glaciaire. La présence d'une quantité importante d'eau sous la forme de glace à l'échelle globale engendre une baisse du niveau des océans. En lien avec l'extension maximale des glaciers, des estimations indiquent que le niveau moyen des océans aurait été d'environ 100-120 m plus bas qu'actuellement (Shackleton, 1987 ; Lambeck *et al.*, 2014). Une telle baisse du niveau marin a permis d'émerger des terrains propices à la déflation éolienne en Mer du Nord.

Il n'y a pas de données détaillées sur l'épaisseur des loess en Belgique. D'une manière générale, la couche loessique atteint une épaisseur souvent supérieure à 4 m (Figure 3-8), mais présente une grande variabilité latérale. Ces caractéristiques seront développées et précisées plus tard dans ce chapitre, lorsque l'analyse plus détaillée de la séquence loessique de Hesbaye sera présentée.

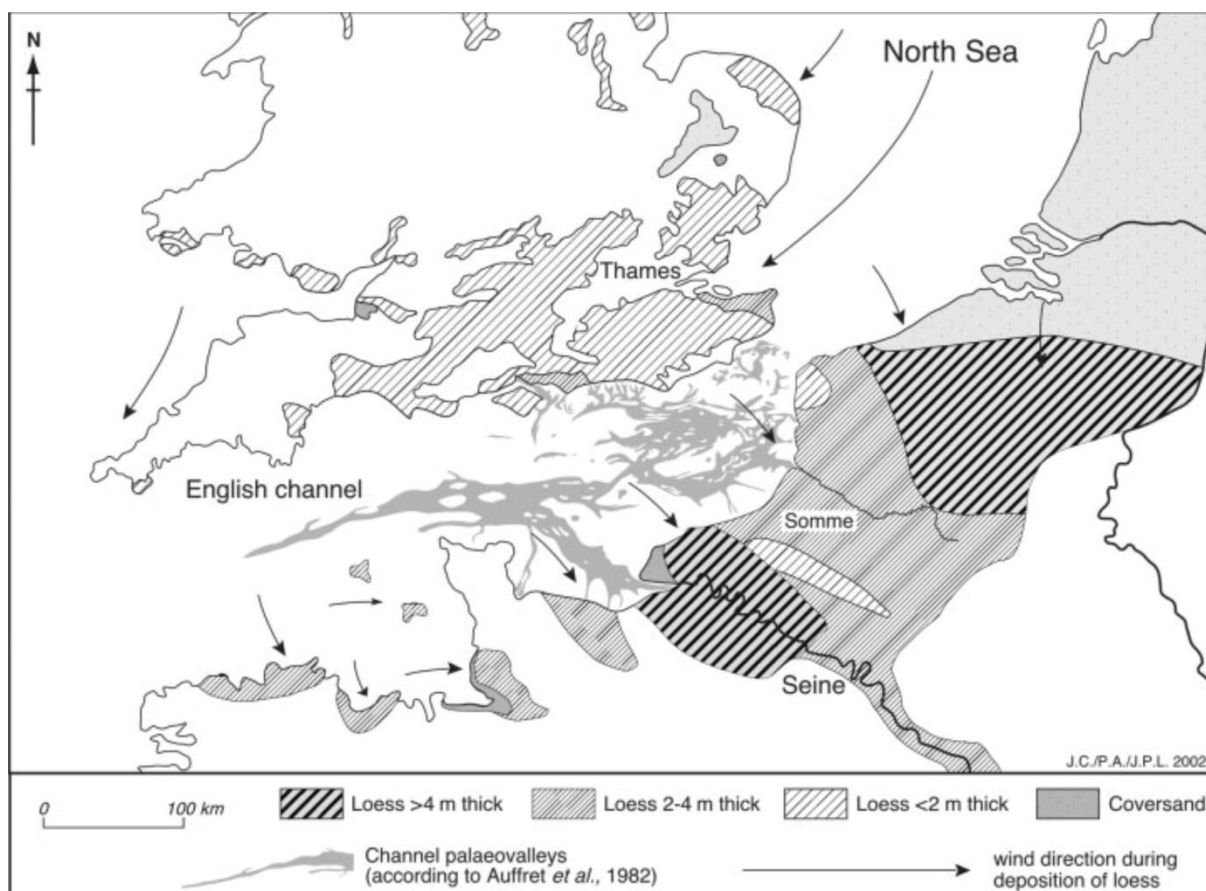


Figure 3-8 : Couverture du loess dans le NO de l'Europe (d'après Antoine *et al.*, 2003). La carte illustre également les aires de déflation ainsi que les directions des vents dominants.

De manière plus précise, la localisation de la couverture lœssique belge se corrèle assez bien avec la région de Moyenne Belgique (Figure 3-9). En outre, la couche de lœss est en général plus importante en Hesbaye et aux alentours de Mons (Haesaerts *et al.*, 2016). Au nord de la région de Moyenne Belgique, les terrains ont également été recouverts par des dépôts éoliens weichséliens mais de nature plus grossière. Un granoclassement y est observé avec la présence de lœss sableux en bordure nord de la couverture lœssique puis par du sable, plus au nord (Haesaerts *et al.*, 2011a). La Figure 3-9 localise également les principaux sites étudiés à des fins stratigraphiques et archéologiques en contexte lœssique (sauf pour le site d'Ében-Émael qui ne fait pas l'objet d'études archéologiques). Trois d'entre eux feront l'objet d'une analyse plus détaillée qui sera développée dans le chapitre 4 de ce rapport. Il s'agit des sites de Remicourt (n°5), Rocourt (n°6) et Romont (n°12).

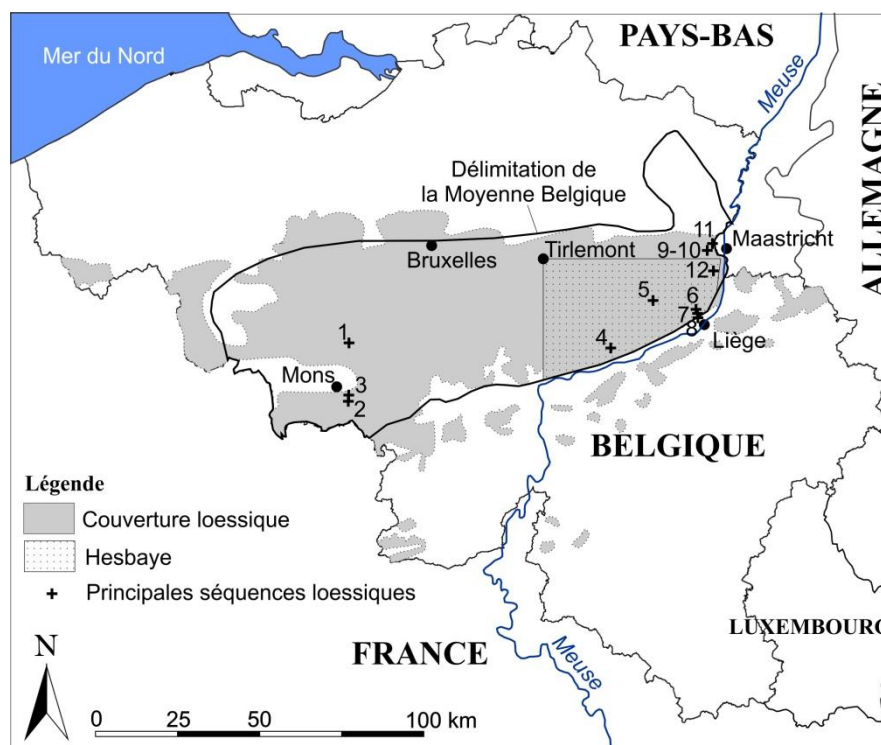


Figure 3-9 : Répartition de la couverture lœssique en Belgique (d'après Haesaerts *et al.*, 2011a, modifié) et localisation des principaux sites étudiés en contexte lœssique à des fins stratigraphiques et archéologiques (modifié, d'après Di Modica, 2011). Légende des sites : 1. Neufvilles (Le Clypot) ; 2. Harmignies (Cuesta) ; 3. Saint-Symphorien (carrière Hélin) ; 4. Huccorgne (station de l'Hermitage) ; 5. Remicourt (En Bia Flo I) ; 6. Rocourt (sablière Gritten) ; 7. Liège (Sainte-Walburge) ; 8. Liège (Mont Saint-Martin) ; 9. Kesselt (Op de Schans) ; 10. Kesselt (Briqueterie Nelissen) ; 11. Veldwezelt (Hezerwater) ; 12. Ében-Émael (Carrière de Romont).

#### 4.2. Analyse approfondie en Hesbaye

La Hesbaye est une région naturelle située en Moyenne Belgique. Elle se caractérise par ses terres fertiles propices aux cultures agricoles. La région n'a pas de frontières officiellement définies. Il est toutefois admis de considérer comme frontières sud et est, la vallée de la Meuse (de Heinzelin, 1984). La frontière ouest est approximativement positionnée selon un axe N-S s'étendant depuis la vallée mosane jusqu'à la localité de Tirlemont. La bordure nord consiste en un axe O-E reliant Tirlemont à la vallée mosane à proximité de Maastricht (Figure 3-9).

Une étude approfondie de la séquence lœssique a été réalisée à une échelle régionale, en Hesbaye, le long d'une section de 18 km de longueur de la ligne TGV Liège-Bruxelles. La campagne d'investigation et les résultats à la suite de leur analyse sont présentés dans cette section et ont fait l'objet d'une publication (Delvoie *et al.*, 2016a).

#### 4.2.1. Contexte géologique régional

En Hesbaye, les dépôts antérieurs au Maastrichtien ont une influence considérée ici comme négligeable sur la couche de lœss de surface. C'est pourquoi il ne sera pas fait mention de couches géologiques plus anciennes dans ce travail. Par ailleurs, une échelle chronostratigraphique reprenant les périodes, séries et étages mentionnés dans ce travail est présentée à la Figure 3-10. Les dépôts maastrichtiens sont principalement composés de craies blanches et grises incluant une série de niveaux continus de nodules de silex. Il s'agit de la Formation de Gulpen (Robaszynski, 2006). Dans l'est de la Hesbaye, la Formation de Maastricht, composée de calcarénite, surmonte la Formation de Gulpen (Robaszynski, 2006). Une régression marine à la fin du Maastrichtien permet l'érosion et la dissolution de la partie supérieure des craies et des calcarénites, engendrant la formation d'un niveau de conglomérat à silex au sommet de la Formation de Gulpen. La mer recouvra à nouveau la partie est de la Hesbaye au cours du Sélandien et du Thanétien (Paléocène). Cette nouvelle transgression marine engendra le dépôt de la Formation de Heers (sable et marne) (Laga & De Geyter, 1988), et de la Formation de Hannut (argile, sable fin, calcaire siliceux, siltite et grès) (De Geyter, 1988). Durant le Rupélien (Oligocène inférieur), de nouveaux dépôts recouvèrent l'est de la Hesbaye. Ils résultent d'une nouvelle transgression marine et se composent de sable fin, de limon et d'argile appartenant à la Formation de Sint-Huibrechts-Hern (Laga, 1988). La mer se retira définitivement à la fin de l'Oligocène. Les dépôts oligocènes ont ensuite été recouverts par des limons éoliens durant le Quaternaire.

ÈRE	SYSTÈME PÉRIODE	SÉRIE	ÉTAGE	Age (Ma)		
CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE	HOLOCÈNE		0,01		
		PLÉISTOCÈNE		2,6		
	TERTIAIRE	NÉOGÈNE	PLIOCÈNE	Plaisancien	3,6	
				Zancléen	5,3	
		MIOCÈNE		Messinien	7,2	
				Tortonien	11,6	
				Serravallien	13,8	
				Langhien	16,0	
				Burdigalien	20,4	
				Aquitanien	23,0	
			OLIGOCÈNE		Chattien	28,1
					Rupélien	33,9
	PALÉOGÈNE	ÉOCÈNE		Priabonien	38,0	
				Bartonien	41,3	
				Lutétien	47,8	
				Yprésien	56,0	
		PALÉOCÈNE		Thanétien	59,2	
				Sélandien	61,6	
	MÉSO-ZOÏQUE	CRÉTACÉ	SUPÉRIEUR		Danien	66,0
					Maastrichtien	72,1
				Campanien	83,6	
				Santonien	86,3	
				Coniacien	89,8	
				Turonien	93,9	
				Cénomaniens	100,5	

Figure 3-10 : Échelle chronostratigraphique de Belgique (modifié, d'après Foucault *et al.*, 2014 ; Boulvain & Pingot, 2015).

## 4.2.2. Présentation de la campagne d'investigation

Une campagne de reconnaissance géotechnique fut réalisée durant les années 1990 par différentes sociétés publiques et privées de géotechnique. Les reconnaissances étaient liées à la construction des voies ferrées à grande vitesse entre Liège et Bruxelles. Dans ce travail, une attention a été portée à la section de 18 km de longueur de la ligne TGV située entre Bierset et Waremme, qui recoupe les parties est et centrales de la Hesbaye (Figure 3-11). Les résultats de près de 90 forages et 140 CPT ont été compilés dans une coupe géologique synthétique. Ces essais ne sont pas uniformément répartis le long de la coupe. Ils sont en effet plus denses le long du premier kilomètre à partir de Bierset, ainsi que le long de la section située à l'ouest de Waremme, avec une densité d'environ 30 essais par kilomètre. Le reste de la section étudiée est caractérisé par une densité moyenne de 8 essais par kilomètre. La profondeur d'investigation atteinte par ces essais est répartie entre 4 et 32 m, avec une valeur moyenne de 13 m. En raison de la résistance à la pénétration très élevée caractérisant la couche de conglomérat à silex, aucun essai de pénétration n'a réussi à atteindre la couche de craie sous-jacente. La plupart des essais recourent la séquence lœssique dans son entièreté.

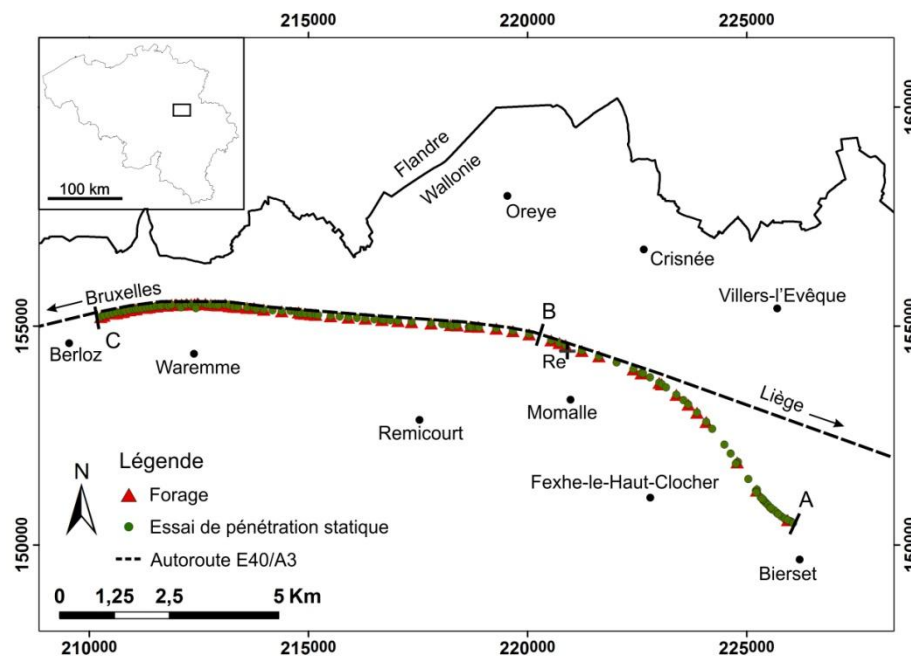


Figure 3-11 : Localisation des essais réalisés le long de la ligne TGV Liège – Bruxelles (tronçon Bierset – Waremme). Coordonnées en Lambert belge 72. Abréviations : Re = site archéologique de Remicourt. Les points A, B et C situés le long du tronçon constituent des points de référence arbitraires également mentionnés sur la coupe (Figure 3-12).

## 4.2.3. Résultats

La coupe synthétique issue de l'interprétation des résultats d'essais réalisés le long de la ligne TGV est présentée à la Figure 3-12. Le sous-sol a été subdivisé en 5 unités sur base de la description d'échantillons prélevés lors des forages et à la suite de l'interprétation des CPT. La couche de conglomérat à silex s'avère être un niveau aisément identifiable en raison de sa résistance à la pénétration très élevée. La résistance au cône y atteint d'ailleurs systématiquement la valeur maximale (60 MPa) autorisée par les pointes utilisées. La couche de craie sous-jacente est dès lors identifiée uniquement sur base des forages. La distinction entre les alluvions récentes, les lœss quaternaires et les sables, marnes et argiles tertiaires est

également principalement basée sur les résultats de forage en raison de leur plus grande fiabilité par rapport aux résultats de CPT.

L'épaisseur de la couche de conglomérat à silex diminue progressivement vers l'ouest. L'altitude moyenne du sommet de cette couche diminue également vers l'ouest. L'inclinaison atteint un pendage apparent de 0,3 % selon l'orientation de la coupe (entre les points A et C, Figure 3-12). Des mesures de l'inclinaison de la base des dépôts oligocènes rencontrés dans la région du Pays de Herve, à l'est de Liège, réalisées par A. Demoulin (1995), révélèrent un pendage de 0,6 % orienté vers le NNO. Lorsque ce pendage est projeté selon l'orientation de la coupe étudiée entre Bierset et Waremme, la valeur obtenue devient 0,25 %. La valeur d'inclinaison de l'interface dépôts oligocènes/maastrichtiens obtenue en Hesbaye confirme bien celle obtenue par A. Demoulin dans le Pays de Herve. Cette inclinaison résulterait du soulèvement du Massif ardennais qui s'opère depuis le Paléocène inférieur (Demoulin, 1995, 1998).

À l'est de Waremme, les dépôts tertiaires sont discontinus et se composent principalement de sables fins et d'argiles de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern. À partir de Waremme, vers l'ouest, ces dépôts deviennent continus et s'épaississent rapidement, atteignant des épaisseurs de près de 10 m. Ils sont représentés par des argiles, des sables et des marnes des Formations de Heers, Hannut et Sint-Huibrechts-Hern.

La couche de dépôts loessiques quaternaires est caractérisée par une variabilité importante de son épaisseur, pouvant atteindre localement plus de 20 m. À cette échelle d'étude, il n'est toutefois pas envisageable de distinguer différents horizons au sein de la séquence loessique. La mise en place du réseau hydrographique actuel a débutée à la fin du Tertiaire, lorsque la mer s'est retirée en direction du NO. Il en résulte que la plupart des cours d'eau de la région s'écoulent globalement du sud vers le nord. La coupe met en évidence quelques-unes de ces vallées N-S. La plupart de ces vallées sont aujourd'hui sèches mais devaient probablement être humides à la fin du Weichsélien.

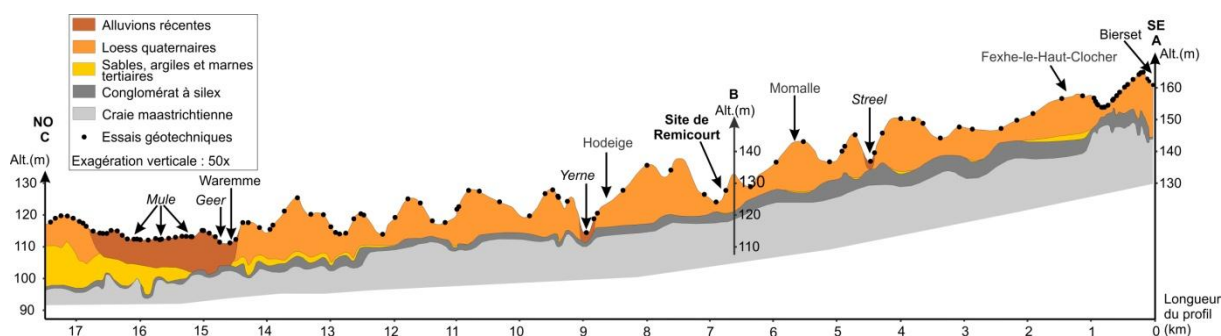


Figure 3-12 : Coupe géologique synthétique de la partie est de la Hesbaye, le long de la ligne TGV Liège – Bruxelles (tronçon Bierset – Waremme). L'échelle verticale a été exagérée de 50x afin de mettre en évidence les variations d'altitude. Les données d'altitude de la surface topographique sont issues des cartes IGN au 1/10.000<sup>e</sup>. Les points A, B et C constituent des points de référence arbitraires et sont également renseignés sur la figure de localisation (Figure 3-11).



## 5. La stratigraphie de la séquence lœssique

Dans cette section, la stratigraphie de la séquence lœssique de Belgique est décrite et illustrée de manière approfondie. La compilation de différentes séquences lœssiques belges a récemment conduit à l'établissement d'une séquence synthétique de référence pour la région (Haesaerts *et al.*, 2016). Quelques corrélations de la stratigraphie des lœss sont ensuite présentées, d'abord à l'échelle de la Belgique, puis entre les régions limitrophes, et enfin étendues à l'Eurasie.

### 5.1. Description de la séquence lœssique de Belgique

La stratigraphie des lœss de Moyenne Belgique est devenue de plus en plus détaillée grâce aux nombreuses études qui lui sont consacrées depuis plus d'un siècle (cf. Gullentops, 1954 ; Pirson, 2007). Bien que depuis de nombreuses années il n'y ait plus de doute quant à l'origine éolienne des limons quaternaires de Moyenne Belgique, ce ne fut pas toujours le cas au cours de l'histoire. En effet, ce sujet fut fort débattu dans la littérature scientifique de la fin du XIXe et du début du XXe siècle. C'est E. Van den Broeck (1887) qui fut le premier à proposer une origine éolienne pour les lœss de Moyenne Belgique, comme cela avait déjà été démontré par F. von Richthofen, quelques années plutôt, en 1882. Une avancée majeure dans la compréhension du schéma stratigraphique des limons quaternaires de Moyenne Belgique fut ensuite apportée par les travaux de F. Gullentops (1954) au moyen d'une approche paléoclimatique. L'auteur définit ainsi trois unités (lœss hennuyen, lœss hesbayen et lœss brabantien) délimitées par deux paléosols majeurs : le Sol de Rocourt (appelé plus tard Pédocomplexe de Rocourt) et le Sol de Kesselt. Ce dernier marqueur stratigraphique sera par la suite abandonné car il correspond à l'horizon de décalcification du Sol de Rocourt, comme ce fut démontré sur le site de Kesselt par Juvigné *et al.* (1996). Il a été remplacé par l'Horizon à Langues de Nagelbeek (Haesaerts *et al.*, 1981), antérieurement connu sous le nom de « Horizon à langues de Kesselt » dont la confusion avec le « Sol de Kesselt » a été signalée (Haesaerts *et al.*, 1981). Dans le courant de la seconde moitié du XXe siècle, d'autres auteurs ont largement contribué à l'amélioration des connaissances de la séquence lœssique de Moyenne Belgique. Ainsi, R. Paepe est le premier à dater la séquence par des âges  $^{14}\text{C}$  (Paepe, 1967, Paepe et Vanhoorne, 1967). B. Bastin (1969 ; 1971) précisa les connaissances paléoenvironnementales de la séquence par des analyses polliniques. Par la suite, E. Juvigné étudia la composition minéralogique des lœss et son évolution stratigraphique (Juvigné, 1978) et fait grandement progresser la connaissance des deux niveaux de téphra (Téphra de Rocourt et Téphra d'Eltville) au sein de la séquence lœssique de Hesbaye (Juvigné, 1977 ; Juvigné et Semmel, 1981 ; Juvigné et Gewalt, 1988 ; Pouclet *et al.*, 2008 ; Pouclet et Juvigné, 2009 ; Juvigné *et al.*, 2013). Les nombreux travaux de P. Haesaerts permirent d'affiner encore les connaissances de la séquence lœssique et d'établir des corrélations stratigraphiques entre de nombreuses coupes situées en Moyenne Belgique et dans les pays limitrophes, au moyen d'approches sédimentaire, pédologique et paléoenvironnementale (Haesaerts et Van Vliet-Lanoë, 1981 ; Haesaerts, 1985 ; Haesaerts *et al.*, 1999 ; Haesaerts et Mestdagh, 2000). Plus récemment, des travaux de datation par thermoluminescence ont permis de préciser les âges des différentes unités composant la séquence lœssique de Moyenne Belgique (Frechen *et al.*, 2001 ; Van den Haute *et al.*, 2003).

La séquence stratigraphique synthétique des lœss de Moyenne Belgique a été établie principalement à partir de la compilation de trois sites complémentaires : Harmignies, Maisières-Canal et Remicourt (Haesaerts *et al.*, 2016). Elle est illustrée à la Figure 3-13. Le paragraphe suivant décrit plus en détail cette figure qui demeure importante pour la compréhension de la stratigraphie des lœss belges.

En partant de la gauche (Figure 3-13), la première colonne reprend des informations d'ordre sédimentaire. La séquence a récemment été subdivisée en huit unités morpho-sédimentaires (de A à H) par Haesaerts *et al.* (2016). Une unité morpho-sédimentaire est définie par ces auteurs comme une succession de cycles débutant par une surface de discordance. Chacun de ces cycles est caractérisé par une période d'accumulation de sédiments, suivie par une période de stabilisation avec, si les conditions climatiques le permettent, le développement d'une pédogenèse. La seconde colonne indique l'interprétation lithostratigraphique de la séquence lœssique. Une rapide définition des symboles employés est détaillée dans la légende de la Figure 3-13. L'interprétation en termes d'horizons majeurs est indiquée dans la quatrième colonne. Cette section va être développée dans ce qui suit. La troisième colonne synthétise les données concernant l'interprétation paléoenvironnementale de la séquence. Elle fait référence à différentes conditions climatiques spécifiques introduites par W. Köppen (1936) et complétées par P. Haesaerts (1974). Ces auteurs ont ainsi défini les conditions climatiques suivantes : tempérée (T, climat tempéré sec), boréale (B, climat neigeux avec forêt boréale), froid modéré (MC pour « medium cold »), froid (C pour « cold », climat froid neigeux), périglaciaire avec pergélisol (P, climat avec désert polaire). Cette colonne reprend également des informations concernant la présence de structures liées au gel. Les trois colonnes suivantes reprennent les données de datation obtenues de trois façons différentes : au moyen du  $^{14}\text{C}$ , par thermoluminescence (TL) et par luminescence stimulée optiquement par infrarouge (IRSL). Les âges sont indiqués en ka. Enfin, les deux colonnes de droite reprennent d'une part les périodes chronoclimatiques du Pléistocène supérieur définies précédemment, et d'autre part une indication de la position stratigraphique des interstades du Groenland (GI).

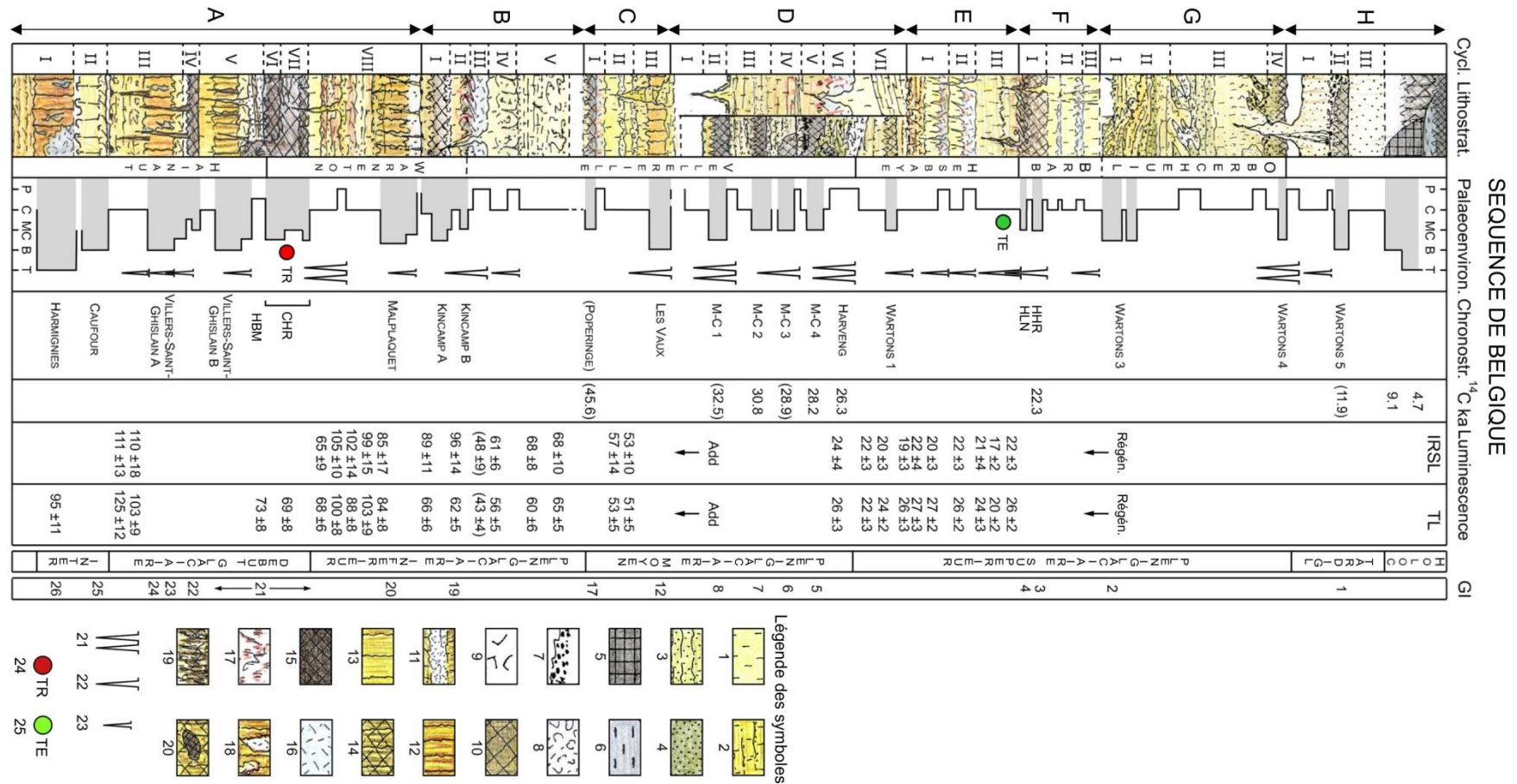


Figure 3-13 : Reconstitution de la séquence lœssique de référence pour les lœss du Pléistocène supérieur de Belgique (modifié, d'après Haesaerts et al., 2016). Légende des symboles : 1. loess ; 2. limon plus ou moins stratifié ; 3. sable ; 4. sable glauconieux ; 5. tourbe ; 6. argile ; 7. gravier ; 8. craie ; 9. remblai ; 10. lœss humifère ; 11. limon blanchâtre ; 12. horizon Bt (sol lessivé) ; 13. horizon B (sol brun ou sol brun lessivé) ; 14. horizon Bth ou Bh (sol gris forestier) ; 15. horizon humifère ; 16. horizon éluvié ou gley de toundra ; 17. oxydes de fer ; 18. langues glossiques ; 19. bioturbations ; 20. krotovines ; 21. coin de glace dans un réseau polygonal ; 22. coin de glace isolé ; 23. fente de cryodessiccation ; 24. Téphra de Rocourt ; 25. Téphra d'Eltville. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; GI = Greenland Interglacial ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HHR = Horizon Humifère de Riemst ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; IRSL = datation par luminescence stimulée optiquement par infrarouge ; M-C = Sol de Maisières-Canal ; TL = datation par thermoluminescence.

Une description détaillée des principaux horizons qui composent la séquence lœssique belge est proposée dans la suite de cette section. La description est articulée selon la subdivision chronoclimatique définie en début de chapitre. Certains de ces horizons sont également illustrés par des photographies à la Figure 3-14. Afin de faciliter la lisibilité de cette section, les horizons majeurs ont été mis en évidence dans le texte.

a. Dernier interglaciaire

Le dernier interglaciaire était caractérisé par des conditions climatiques assez semblables au climat actuel (Gullentops, 1954). La séquence lœssique y a enregistré le **Sol d'Harmignies**, correspondant à un horizon Bt brun à brun-rouge attribué à un luvisol (Haesaerts, 1978). Le sommet du Sol d'Harmignies contient des traces d'un horizon éluvié résultant probablement d'une première dégradation des conditions climatiques à la fin de l'Éemien.

b. Début Glaciaire weichsélien

La période débute avec deux paléosols montrant une transition depuis un luvisol boréal (le **Sol de Villers-Saint-Ghislain A** – VSG-A) vers un greyzem (le **Sol de Villers-Saint-Ghislain B** – VSG-B) (Haesaerts, 1978; Haesaerts *et al.*, 2011a). Cette tendance résulte d'une évolution vers des conditions climatiques plus continentales et plus froides. Le sommet du Sol de VSG-B est caractérisé par un horizon éluvié pouvant atteindre quelques centimètres d'épaisseur et possédant une structure lamellaire bien marquée. Il s'agit de l'**Horizon blanchi de Momalle** (HBM, Haesaerts *et al.*, 1997a) (Figure 3-14B). Des datations par thermoluminescences indiquent un âge de  $73 \pm 8$  ka pour un horizon situé au sommet de l'HBM (Van den Haute *et al.*, 2003). Le Sol d'Harmignies, les Sols de VSG-A et VSG-B et l'HBM ont été regroupés pour former le **Pédocomplexe de Rocourt** (Figure 3-14A) (PR, Haesaerts *et al.*, 2011a).

L'Horizon blanchi de Momalle est surmonté par un complexe de paléosols sombre gris-brun. Il porte le nom de **Complexe Humifère de Remicourt** (CHR, Haesaerts *et al.*, 1997a) (Figure 3-14B et D). Sa mise en place est liée à des conditions climatiques froides et humides. Cet horizon est classiquement subdivisé en deux pédogenèses. La première a été intensément bioturbée et inclus le **Téphra de Rocourt** dans sa partie supérieure (Juvigné, 1977; Pouclet *et al.*, 2008). La seconde pédogenèse est plus homogène. Le CHR est attribué à la fin du GI-21 (MIS-5a), entre 80 et 78 ka (Juvigné *et al.*, 2013 ; Rasmussen *et al.*, 2014).

Même si le caractère éluvié de l'Horizon blanchi de Momalle semble admis par la communauté scientifique, son origine fait toujours l'objet de débats. Sur base d'observations menées initialement à Remicourt, Haesaerts *et al.* (1999, 2016) considèrent que cet horizon serait lié à une remobilisation (par cryoreptation) de la partie sommitale du Sol de Villers-Saint-Ghislain B en lien avec des conditions climatiques froides. L'eau de fonte aurait alors percolé au sein de l'horizon pour engendrer son caractère éluvié. Cela se serait produit avant le dépôt de la partie inférieure du Complexe Humifère de Remicourt. Gullentops et Meijs (2002) attribuent l'Horizon blanchi de Momalle à un pseudogley blanchâtre formé en conditions périglaciaires. H. Mestdagh (2005) considère que l'Horizon blanchi de Momalle s'est formé à partir du matériau composant la partie sommitale du Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Celui-ci aurait alors été sujet à des cycles de gel-dégel, avec formation de lentilles de glace en période de gel, puis de la fonte de la glace en période de dégel, avec production d'une quantité d'eau ayant percolé au sein de l'horizon, engendrant ainsi l'éluviation. Ce phénomène est mis en lien, par l'auteur, avec un environnement périglaciaire. Une autre hypothèse a également été avancée par Vancampenhout *et al.* (2013b). Ces derniers se basent essentiellement sur des observations détaillées réalisées sur le site de Veldwezelt-Hezerwater (Belgique). Pour eux, l'horizon éluvié se serait formé au départ d'un horizon A (appelé A4) et

du sommet d'un horizon B sous-jacent. Ces différents horizons auraient été soumis à un gel saisonnier profond ou à un pergélisol. L'horizon A superficiel constituerait la couche active du pergélisol, caractérisée par des cycles de gel-dégel saisonniers. Durant les phases de gel, l'horizon A serait formé de lentilles de glace, pouvant engendrer la compaction du matériau situé entre les lentilles. Durant les phases de dégel, la fonte de la glace entraîne la formation d'eau à l'état liquide, responsable de l'éluviation de l'horizon A et du sommet de l'horizon B, pour former l'horizon E éluvié, correspondant à l'Horizon blanchi de Momalle.

#### c. Pléniglaciaire inférieur weichsélien

Les conditions climatiques continuent de se détériorer au cours du Pléniglaciaire inférieur weichsélien. La séquence lœssique correspondante débute par une épaisse couche de dépôts hétérogènes stratifiés (Figure 3-14E) combinant des apports éoliens, d'autres liés au ruissellement, et d'autres encore engendrés par la gélifluxion (Haesaerts *et al.*, 2016). Cette couche enregistre un premier épisode de pergélisol caractérisant les séquences lœssiques belges. Un horizon brun, bioturbé et illuvié, correspondant à un sol boréal, le **Sol de Malplaquet** (MAL, Figure 3-14C), surmonte le complexe stratifié (Haesaerts and Van Vliet, 1974). Des datations par thermoluminescence indiquent un âge de  $80 \pm 8$  ka (Frechen *et al.* 2001), ce qui permet de relier le Sol de Malplaquet au GI-20, aux alentours de 76 ka (Haesaerts *et al.*, 2011b). Deux horizons humifères (**Kincamp A** et **Kincamp B**) sont également rencontrés plus haut, dans les séquences belges. Ils seraient liés à la présence d'une couverture herbacée relativement dense en relation avec des conditions climatiques caractérisées par un froid modéré (Haesaerts and Van Vliet, 1974). Les lœss qui surmontent l'horizon Kincamp A sont les premiers lœss carbonatés rencontrés dans la séquence. La deuxième partie du Pléniglaciaire inférieur weichsélien est caractérisée par des conditions climatiques froides et assez sèches, favorisant le dépôt de lœss continu.

#### d. Pléniglaciaire moyen weichsélien

Les séquences de l'ouest de l'Europe sont, d'une manière générale, caractérisées par une baisse du taux de sédimentation lœssique (Antoine *et al.*, 2001). Les dépôts correspondants sont classiquement hétérogènes et stratifiés, incluant des limons ruisselés, en alternance avec des sols boréaux à arctiques formés durant les interstades principaux. Le **Sol des Vaux** se localise dans la partie inférieure des séquences belges. Il correspond à un sol boréal brun-rouge, positionné aux alentours de ca 40 et ca 42 ka BP ( $^{14}\text{C}$ , Pirson *et al.*, 2006). Une série de sols humifères (M-C 1 à M-C 4, issus de Maisières-Canal), formés sous un couvert herbacé en condition de froid modéré, sont attribués à la partie supérieure de la séquence. Le Pléniglaciaire moyen de la séquence belge se termine par le **Sol d'Harveng**, correspondant à un gley de toundra associé à un réseau polygonal de profonds coins de glace (Haesaerts *et al.*, 2016). Le Sol d'Harveng est positionné aux alentours de ca 26 ka BP ( $^{14}\text{C}$ , Haesaerts *et al.*, 2016).

#### e. Pléniglaciaire supérieur weichsélien, Tardiglaciaire weichsélien et Holocène

Les apports de grandes quantités de lœss ont repris durant le Pléniglaciaire supérieur weichsélien. Les dépôts correspondants sont principalement composés de niveaux de lœss assez hétérogènes interstratifiés avec quelques paléosols. Parmi ces derniers, **l'Horizon à Langues de Nagelbeek** (Figure 3-14F) (NTH; Haesaerts et Van Vliet-Lanoë, 1981; Haesaerts *et al.*, 2011a), constitue un niveau repère important dans la stratigraphie des séquences belges ainsi que du NO de l'Europe en raison de sa relative continuité latérale (Lautridou, 1985; Van Vliet-Lanoë, 1992). Il consiste en un paléosol gris humifère caractérisé par une base formée de langues cryoturbées inclinées et très développées. Des mesures de datation attribuent à l'HLN un âge autour de 22 ka uncal BP ( $^{14}\text{C}$ , Haesaerts *et al.*, 1981). La base de l'HLN définit la transition entre les loess hesbayens sous-jacents et les



loess brabantiens sus-jacents. Le **Téphra d'Eltville** (Figure 3-14G) est habituellement situé à environ un mètre sous la base de l'HLN. Il consiste en un dépôt sombre de 1 à 2 mm d'épaisseur et représente lui aussi un horizon repère pour le Pléniglaciaire supérieur des séquences de Belgique, d'Allemagne et des Pays-Bas (Semmel, 1967 ; Meijs *et al.*, 1983). Le Téphra d'Eltville se serait mis en place il y a  $24,1 \pm 1,9$  ka (par thermoluminescence ; Zens *et al.*, 2017)

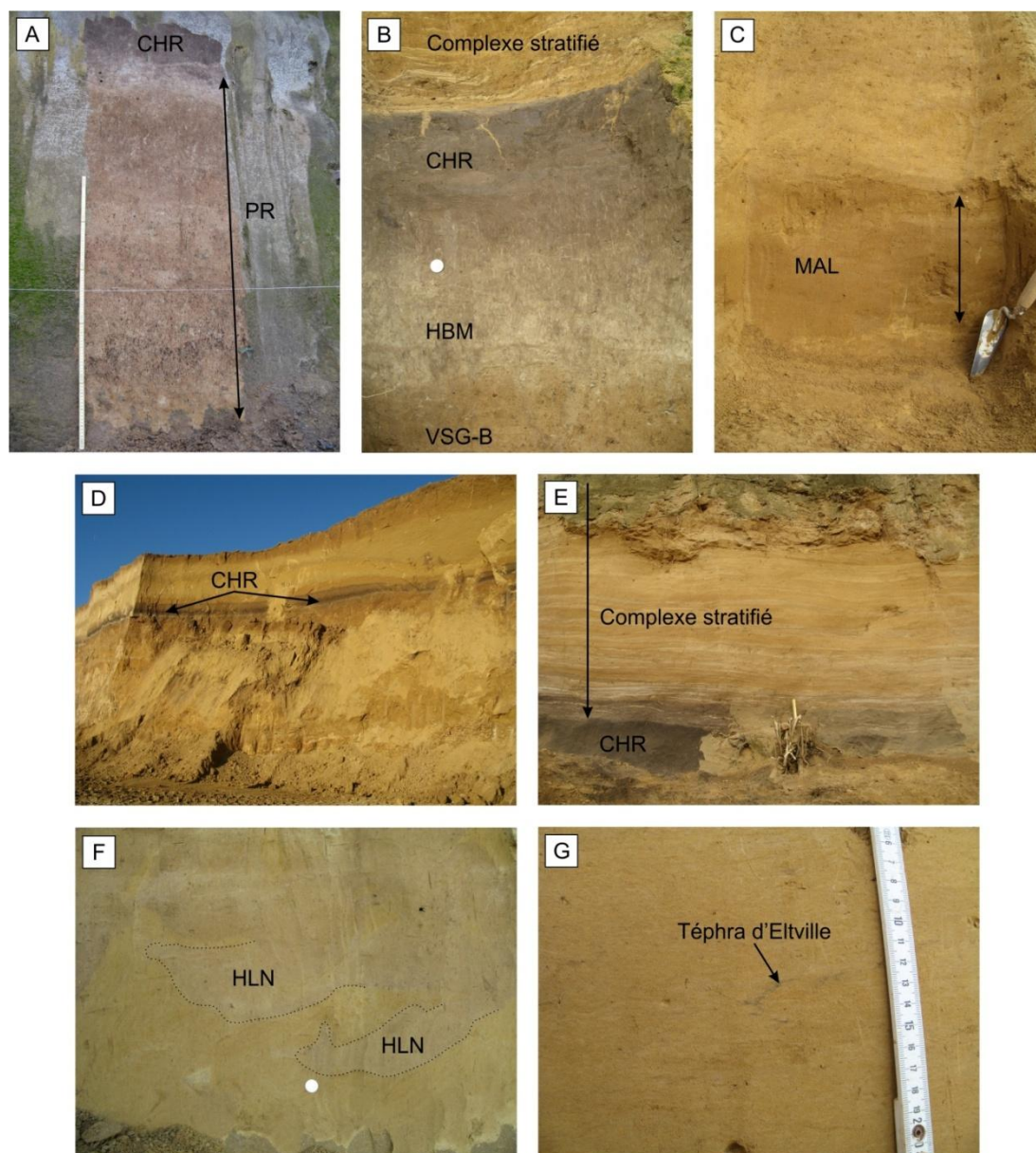


Figure 3-14 : Illustration de quelques horizons au sein de la séquence stratigraphique de Belgique. (A) Romont (photo du 27/11/2014) ; (B) Romont (photo du 23/11/2016) ; (C) Romont (photo du 04/10/2016) ; (D) Romont (photo du 28/11/2016) ; (E) Romont (photo du 03/03/2015) ; (F) Romont (photo du 21/11/2014) ; (G) Rocourt (photo du 02/09/2016). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; MAL = Sol de Malplaquet ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Photographies prises par S. Delvoie.

La séquence correspondant à la partie supérieure du Pléniglaciaire supérieur et au Tardiglaciaire n'a été retrouvée que sur le site de Maisières-Canal. La partie supérieure de la séquence lœssique est partout influencée par la formation du sol holocène actuel. Une limite de décarbonatation (LD) est souvent rencontrée vers 1 à 2 m de profondeur. Elle résulte de la décarbonatation des lœss superficiels à la suite de la percolation des eaux de surface au sein de la couche de lœss.

## 5.2. Les corrélations stratigraphiques

### 5.2.1. Corrélations à l'échelle régionale

De nombreuses études ont mis en évidence l'existence d'horizons pédo- et lithostratigraphiques comparables issus de différents sites de Moyenne Belgique (Gullentops, 1954 ; Paepe and Vanhoorne, 1967 ; Haesaerts, 1974 ; Haesaerts and Van Vliet-Lanoë, 1981 ; Pouclet *et al.*, 2008 ; Pirson *et al.*, 2009 ; Pouclet and Juvigné, 2009 ; Haesaerts *et al.*, 2016). Ces observations ont permis d'établir de nombreuses corrélations stratigraphiques au sein de la séquence lœssique à une échelle régionale. Ces corrélations sont d'ailleurs à l'origine de l'établissement de la séquence de référence pour les lœss de Moyenne Belgique (Haesaerts *et al.*, 2016).

La Figure 3-15 souligne les corrélations stratigraphiques entre plusieurs horizons de la partie inférieure du Pléistocène supérieur issus de différentes séquences de Moyenne Belgique. Deux d'entre-elles se localisent en Hesbaye (Rocourt et Remicourt) et les autres se trouvent à proximité de Mons (Harmignies et Hélin). D'autres corrélations stratigraphiques de la partie supérieure du Pléistocène supérieur ont également été établies de manière similaire.

### 5.2.2. Corrélations aux échelles interrégionale et eurasiatique

Les séquences lœssiques belges sont souvent comparées avec celles provenant du nord de la France et celles issues du NO de l'Allemagne (région du Rhin inférieur). La Figure 3-16 suivante indique la couverture lœssique au droit de ces trois régions, ainsi que les principaux sites étudiés offrant une section de la séquence lœssique.

La Figure 3-17 suivante synthétise les corrélations stratigraphiques établies entre les séquences lœssiques des trois régions concernées, pour le début du Pléistocène supérieur (Émien, Début Glaciaire weichsélien et début du Pléniglaciaire inférieur weichsélien). Cette figure permet aisément d'y observer les nombreuses corrélations stratigraphiques. Ces dernières sont possibles en raison de la relative constance des faciès lœssiques des différents horizons, et grâce à la présence d'horizons stratigraphiques repères. Cependant, chaque séquence régionale de référence est établie à partir des affleurements de la région correspondante. C'est pourquoi des horizons comparables ont été nommés différemment d'une région à l'autre, rendant plus compliquées les analyses interrégionales. Une harmonisation de la nomenclature permettrait de simplifier les débats...

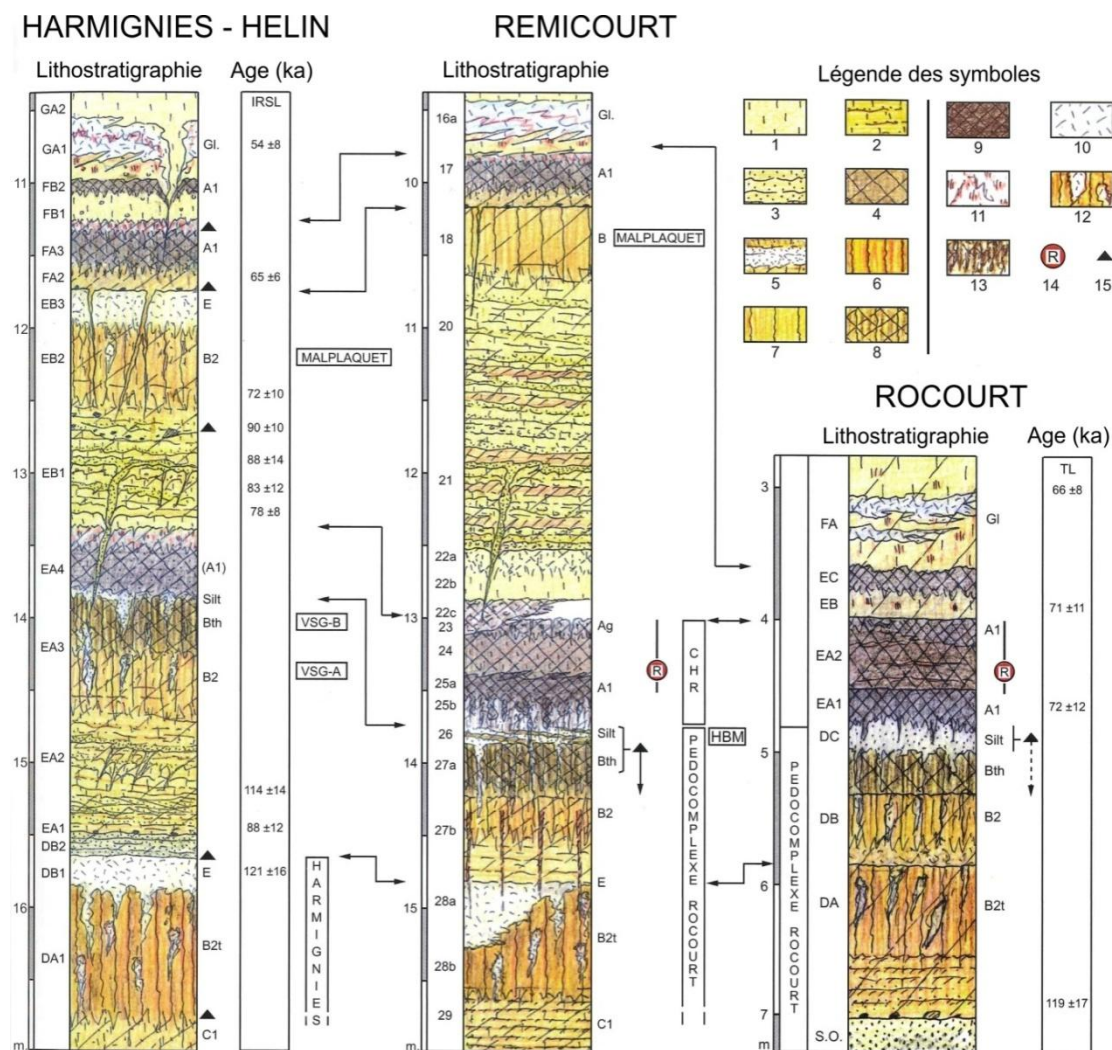


Figure 3-15 : Corrélations stratigraphiques de la partie supérieure du Pléistocène moyen et de la partie inférieure du Pléistocène supérieur, entre trois séquences issues de Moyenne Belgique (modifié, d'après Haesaerts et al., 2011b). Dessins originaux réalisés par P. Haesaerts et infographie réalisée par E. Dermience (IRSNB). Datations par thermoluminescence (TL) d'après Van den Haute et al. (2003). Datations par luminescence stimulée optiquement par infrarouge (IRSL) d'après Frechen et al. (2001). Légende des symboles : 1. læss ; 2. limon plus ou moins stratifié ; 3. sable ; 4. læss humifère ; 5. limon blanchâtre ; 6. horizon Bt (sol lessivé) ; 7. horizon B (sol brun ou sol brun lessivé) ; 8. horizon Bth ou Bh (sol gris forestier) ; 9. horizon humifère ; 10. horizon éluvié ou gley de tundra ; 11. oxydes de fer ; 12. langues glossiques ; 13. bioturbations ; 14. Téphra de Rocourt ; 15. artéfact. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Gl = Gley de tundra ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; VSG = Sol de Villers-Saint-Ghislain.



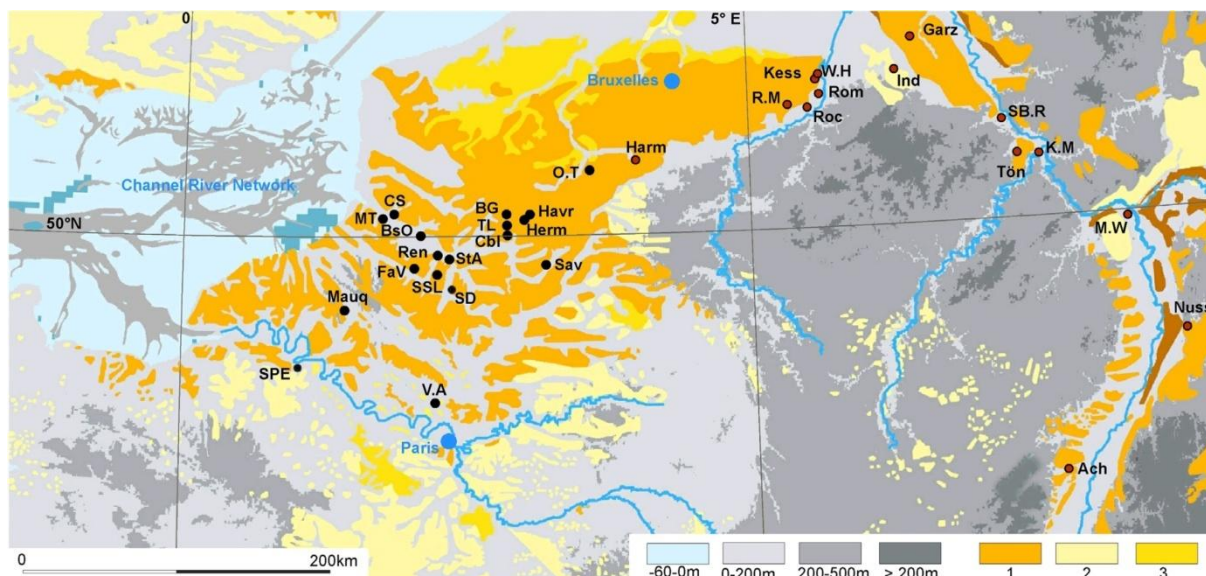


Figure 3-16 : Couverture lœssique simplifiée du nord de la France, de Belgique et d'Allemagne de l'ouest (d'après Antoine *et al.*, 2016). Légende : 1. lœss d'épaisseur supérieure à 2 m ; 2. lœss d'épaisseur inférieure à 2 m ; 3. lœss sableux. Abréviations des sites : Ach = Achenheim ; BG = Beugnâtre ; BsO = Bettencourt-Saint-Ouen ; Cbl = Combles-TGV ; CS = Caours ; FaV = Fresnoy-au-Val ; Garz = Garzweiler ; Harm = Harmignies ; Havr = Havrincourt ; Herm = Hermies ; Ind = Inden ; Kess = Kesselt ; K.M. = Koblenz-Metternich ; Mauq = Mauquenchy ; MT = Mautort ; M.W. = Mainz-Weisenau ; Nuss = Nussloch ; O.T. = Onnaing-Toyota ; R.M. = Remicourt-Momal ; RNC = Renancourt ; Roc = Rocourt ; Rom = Romont ; Sav = Savy ; SB.R. = Schwalbenberg-Remagen ; SD = Sourdon ; SPE = Saint-Pierre-lès-Elbeuf ; SSL = Saint-Saufliou ; StA = Saint-Acheul ; T.B. = Tönchesberg ; TL = Transloy-TGV ; V.A. = Villiers-Adam ; W-H = Veldwezelt-Hezerwater.

Le Sol d'Harmignies, correspondant à l'Émien, est l'équivalent stratigraphique du Sol d'Elbeuf au nord de la France (Lautridou, 1985) et du Sol d'Erbach dans la région du Rhin inférieur (Schönhals *et al.*, 1964). Ce paléosol se termine par un horizon éluvié reconnu dans les trois régions, qui marque l'entrée dans le Début Glaciaire weichsélien. Les Sols de Villers-Saint-Ghislain A et B peuvent être corrélés respectivement avec le Sol de Bettencourt et la base du Complexe de Sols de Saint-Saufliou (SS1) du nord de la France (Antoine *et al.*, 1994), et avec le Sol de Pesch et le Sol de Holz décrits en Allemagne (Schirmer, 1999). L'Horizon blanchi de Momalle est également bien visible dans les régions limitrophes. Il est connu en Allemagne sous le nom de « Holz White Band » (Schirmer, 2016). Le Complexe Humifère de Remicourt qui surmonte l'HBM pourrait être comparable à la partie supérieure du Complexe de Sols de Saint-Saufliou (SS2 et SS3) du nord de la France (Antoine *et al.*, 1994), et aux « Holz Humus Zone » et « Titz Humus Zone » du NO de l'Allemagne (Schirmer, 2000). Malgré ces corrélations stratigraphiques bien établies, le schéma chronostratigraphique entre le CHR et son équivalent du nord de la France diffère en raison de données de datation divergentes. En France, la phase de sol steppique (SS2 et SS3) est datée entre 76,4 et 69,4 ka, et est attribuée aux GI-20 et GI-19 (Antoine *et al.*, 2016), alors qu'en Belgique, le CHR est corrélé avec le GI-21 (Juvigné *et al.*, 2013 ; Haesaerts *et al.*, 2016).

Le Pléniglaciaire inférieur weichsélien débute partout par une importante surface de discordance, suivie par un complexe de lœss stratifiés dénommé « complexe de colluvions litées d'Hermies » dans le nord de la France (Antoine *et al.*, 2016), et par la « Niedereschbach Zone » dans la région du Rhin inférieur (Semmel, 1968 ; Antoine *et al.*, 2001 ; Schirmer, 2016). Le Sol de Malplaquet semble être l'équivalent latéral des limons bruns d'Havrincourt

du NO de la France (Antoine *et al.*, 2016) et du Sol de Jackerath du NO de l'Allemagne (Schirmer, 2000).

Plus haut dans la séquence, l'Horizon à Langues de Nagelbeek est également rencontré dans les séquences du NO de la France ainsi qu'en Allemagne, où il est interprété comme étant issu de deux phases de pédogenèse qui portent les noms de « Belmen Soil » et « Elfgen Soil » (Schirmer, 2016).

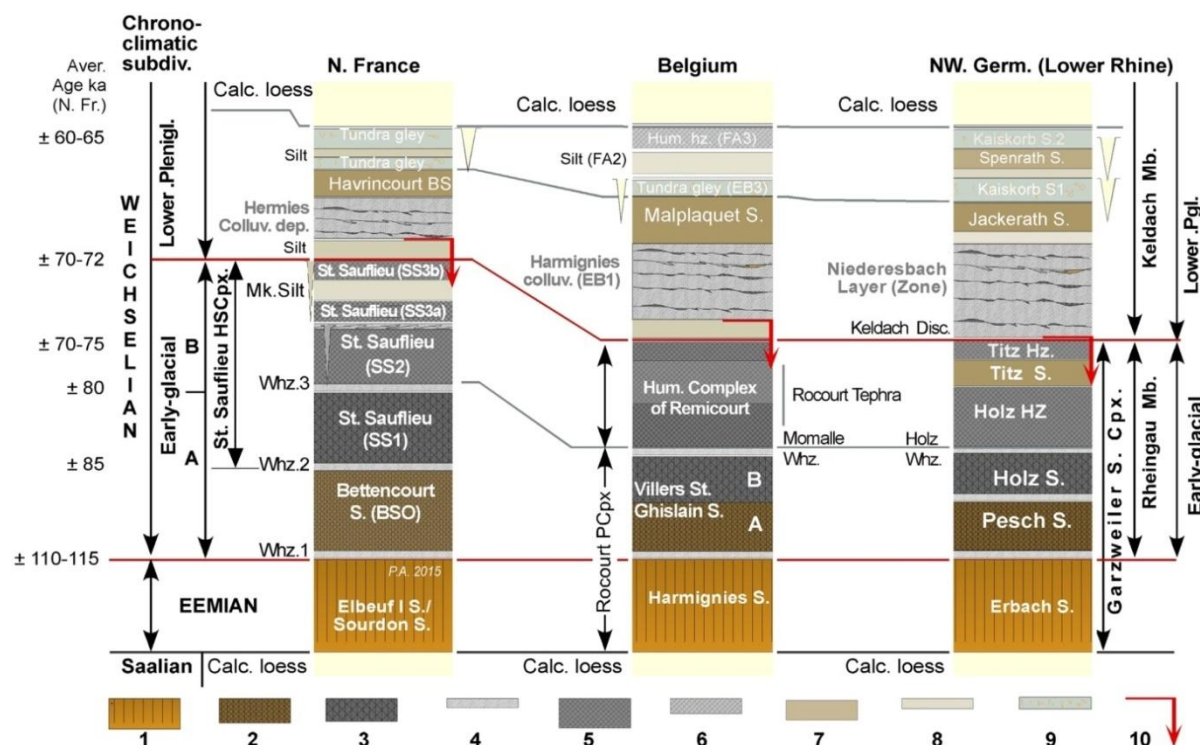


Figure 3-17 : Corrélation stratigraphique des principaux horizons de la partie inférieure du Pléistocène supérieur relatifs aux séquences compilées du nord de la France, de Belgique et d'ouest de l'Allemagne (région du Rhin inférieur) (modifié, d'après Antoine *et al.*, 2016). Légende des symboles : 1. horizon Bt (sol brun lessivé) ; 2. horizon Bt ou Bth (intermédiaire entre un sol brun lessivé et un sol gris forestier) ; 3. horizon Bth (sol gris forestier) ; 4. horizon lessivé blanchâtre ; 5. horizon Ah d'un sol steppique ; 6. horizon humifère ; 7. sol brun plus ou moins bien développé/horizon Bw (cambisol) ; 8. limon éolien non carbonaté ; 9. gley de tundra ; 10. surface d'érosion majeure (base des dépôts stratifiés).

Des corrélation stratigraphiques similaires ont également été étendues à l'échelle eurasiatique entre le NO de l'Europe, l'Europe centrale, l'Europe de l'est et la Sibérie (Haesaerts *et al.*, 2003, 2005, 2009, 2016 ; Antoine *et al.*, 2013, 2016). La Figure 3-18 suivante compile quelques corrélation stratigraphiques établies entre la séquence de Belgique et celle d'Ukraine centrale (à Vyazivok, situé à environ 200 km au SE de Kiev).

De manière plus étendue donc, le Sol d'Harmignies peut être corrélié avec le Pédocomplexe Kaydaky d'Ukraine centrale (Rousseau *et al.*, 2001), avec la base du PK III de République Tchèque (Demek et Kukla, 1969) et avec la base de Sol de Salyn de Russie centrale (Velichko, 1990). Les Sols de Villers-Saint-Ghislain A et B ainsi que le Complexe Humifère de Remicourt sont également décrits dans la séquence de Vyazivok et sont repris dans le Pédocomplexe Pryluky 1 (Haesaerts *et al.*, 2016). Un horizon limoneux lessivé présentant une structure lamellaire très développée, séparant l'horizon Bh du sol gris forestier

et l'horizon A1 du sol steppique, est également décrits dans la séquence ukrainienne. Il s'agit de l'équivalent stratigraphique de l'Horizon blanchi de Momalle (Figure 3-14B et Figure 3-18). Sans aller plus dans le détail, d'autres corrélations entre la séquence belge et les séquences d'Europe et d'Asie ont notamment été proposées pour le Sol des Vaux, les Sols de Maisières-Canal 1 à 4, le Sol d'Harveng et l'Horizon à Langues de Nagelbeek (Haesaerts *et al.*, 2005, 2016).

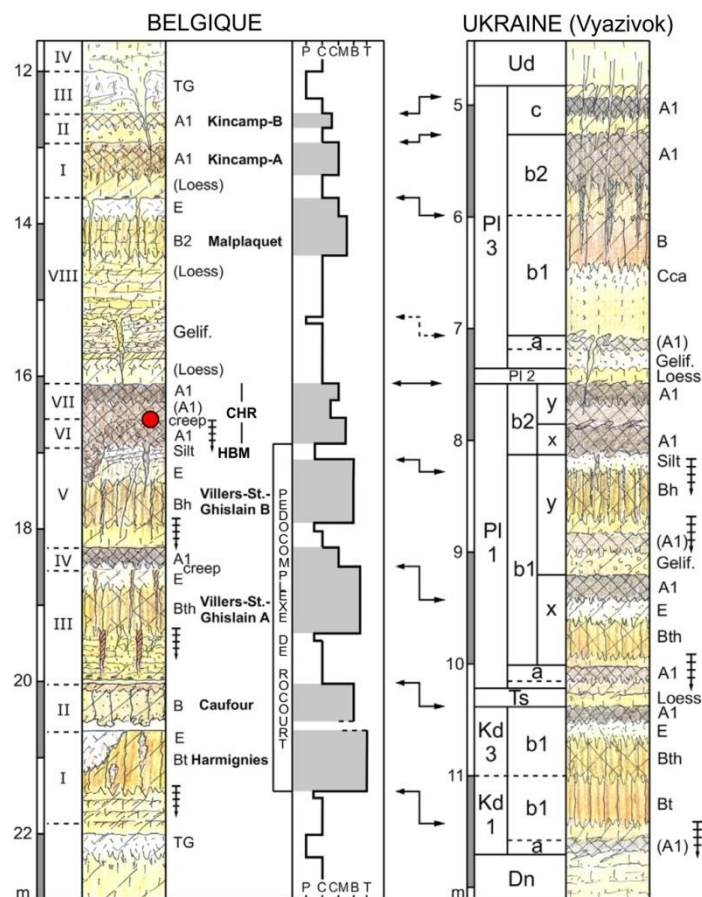


Figure 3-18 : Corrélations stratigraphiques entre la séquence de Vyazivok (Ukraine centrale) et celle de Belgique, pour les lœss du la partie inférieure du Pléistocène supérieur (modifié, d'après Haesaerts *et al.*, 2016). La légende des symboles utilisés est indiquée à la Figure 3-13. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Dn = loess du sommet du Pléistocène moyen surmontant des dépôts morainiques du Dnieper ; Gelif = gélifluction ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; Kd = Kaydaky ; Pl = Pryluky ; TG = gley de tundra ; Ud = Uday. Dessin réalisé par N. Gerasimenko & P. Haesaerts (2015).

## 6. Conclusions intermédiaires

Des estimations ont montré que le lœss couvre près de 10 % de la surface des continents. Ces dépôts éoliens peuvent atteindre jusqu'à plus de 300 m d'épaisseur en Chine. Ils se distribuent essentiellement dans l'hémisphère nord, entre les latitudes de 30° et 60°. En Europe, leur mise en place est liée aux dernières périodes glaciaires, et surtout à la dernière glaciation, au Weichsélien, qui eut lieu entre 111 et 12 ka BP, où les lœss sont localisés en marge de l'extension maximale des grands inlandsis eurasiatiques. En Belgique, ces dépôts se rencontrent en Moyenne Belgique, et plus particulièrement aux alentours de Mons et en Hesbaye, où ils atteignent localement une épaisseur de plus de 20 m. Une coupe synthétique le long de la ligne de TGV Liège - Bruxelles, entre Bierset et Waremme, souligne également la très grande variabilité de l'épaisseur de ces dépôts.

Les études réalisées aux échelles globale, continentale et même régionale ne permettent toutefois pas de caractériser les différents horizons, qui composent la séquence lœssique, du point de vue de leur extension spatiale. Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier la séquence à une échelle locale, c'est à dire à l'échelle de l'affleurement. Il devient alors possible d'y observer la succession d'horizons lœssiques et de paléosols qui caractérisent les séquences lœssiques dans leur ensemble. C'est ainsi qu'en Belgique, une série d'horizons repères ont été décrits en détail. En partant du bas de la séquence correspondant au Pléistocène supérieur, une succession de paléosols indiquent un refroidissement progressif du climat au début du Weichsélien (Début Glaciaire weichsélien). Ces paléosols sont d'abord représentés par le Sol d'Harmignies (correspondant au sol en place au cours de l'Éemien, dernier interglaciaire) et les Sols de Villers-Saint-Ghislain A et B. Chacun d'eux se caractérise, dans la partie supérieure, par un horizon éluvié interprété comme une phase de refroidissement plus intense. L'horizon éluvié rencontré au sommet du Sol de Villers-Saint-Ghislain B est particulièrement bien développé dans les séquences de Belgique et porte le nom d'Horizon blanchi de Momalle. Le Début Glaciaire se termine par le Complexe Humifère de Remicourt. La suite de la séquence lœssique belge se compose de dépôts remaniés ou en place intercalés entre d'autres paléosols (Sol de Malplaquet, Kincamp A et B, Sol des Vaux, Sol d'Harveng, Horizon à Langues de Nagelbeek).

Cette analyse à l'échelle locale sera présentée dans le chapitre 4, pour trois sites d'étude différents. Il sera alors possible d'y observer précisément les différents horizons qui composent la séquence lœssique de Moyenne Belgique, ainsi que leur extension spatiale et leur variabilité latérale. La nomenclature des horizons décrits dans ce chapitre sera également abordée dans les chapitres suivants de la thèse.

La comparaison entre les séquences lœssiques décrites à différents endroits a montré qu'il existe de nombreuses corrélations stratigraphiques entre affleurements. Ces corrélations ont été mises en évidence à l'échelle régionale, en Moyenne Belgique, mais également à une échelle continentale, entre des lœss du Nord de la France et de Sibérie.

**Chapitre 4 :**  
**Étude à l'échelle locale**





## 1. Introduction

L'analyse réalisée au chapitre 3, a montré qu'à l'échelle régionale, il est difficile de distinguer l'extension spatiale et les variabilités latérales des différents horizons qui composent la séquence lœssique de Moyenne Belgique. Ce niveau de détail peut, par contre, être atteint lorsque les dépôts lœssiques sont étudiés à une échelle plus grande, à l'échelle locale, c'est-à-dire celle de l'affleurement ou celle du site d'étude. Pour ce faire, trois sites localisés en Hesbaye, au nord de Liège, ont fait l'objet d'une analyse détaillée par une approche géotechnique couplée à une approche géologique. Les sites investigués correspondent au site de Remicourt (En Bia Flo I), au site de Romont (carrière de Romont, Ében-Émael), et au site de Rocourt (sablière Gritten). Ils offrent chacun une séquence lœssique particulièrement bien développée et présentent un intérêt scientifique majeur pour la géologie du Quaternaire et pour l'archéologie. Un affleurement recoupant la séquence lœssique y est également présent (à Romont et à Rocourt), ou a existé par le passé et a été étudié en détail (à Remicourt). Les horizons présents au sein de la séquence lœssique, peuvent alors être comparés avec les données issues d'une campagne d'investigation, réalisée à proximité immédiate de l'affleurement. Ceci constitue la démarche expérimentale qui est à l'origine des analyses développées dans ce chapitre. Celles-ci se positionnent donc à une échelle locale. L'essai qui est au cœur de l'investigation in situ est l'essai de pénétration statique (CPT). D'autres essais, tels que des forages, des tomographies de résistivité électrique et des mesures sur la paroi au moyen d'un pénétromètre de poche, viennent en appui aux CPT afin de compléter les données obtenues et de préciser les analyses s'y rapportant. Parmi les trois sites investigués, celui de Romont correspond au site principal, faisant l'objet d'une étude plus poussée.

Certains passages de ce chapitre ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques ou actes de conférence :

- Delvoie, S., Boulvain, F., Charlier, R. & Collin, F., 2016a. Detailed characterization of the Late Pleistocene loess sequence stratigraphy of Remicourt (Hesbaye region, Belgium) with cone penetration tests. *Geologica Belgica*, **19**, 281-289.
- Delvoie, S., Charlier, R. & Collin, F., 2016b. In situ and laboratory mechanical characterization of a loess sequence from Middle Belgium. *Proceedings of the "34èmes Rencontres de l'AUGC"*, University of Liège, Liège, Belgium, 25-27 May.
- Delvoie, S., Pirson, S., Charlier, R. & Collin, F., 2016c. Étude de la séquence stratigraphique des lœss de la carrière de Romont (Ében-Émael, Belgique) par une campagne géotechnique. *Notae Praehistoricae*, **36**, 5-21.
- Pirson, S., Spagna, P., Bosquet, D., Delvoie, S., Di Modica, K., Haesaerts, P., Juvigné, E. & van der Sloot, P., 2016. La séquence lœssique de la sablière Gritten à Rocourt : nouvelles données sur un site majeur. *Chronique de l'archéologie wallonne*, **24**, 144-148.

D'autres passages de ce chapitre font également l'objet de publications en cours de préparation :

- Delvoie, S., Collin, F. & Pirson, S. Assessment of cone penetration testing as investigation tool for estimating Middle Palaeolithic archaeological potential of sites in loess context: compiling results from three sites in Belgium (Remicourt, Romont and Rocourt). *Journal of Archaeological Science*.

- Pirson, S., Spagna, P., Haesaerts, P., Delvoie, S., Di Modica, K., Bosquet, D., Juvigné, E. & van der Sloot, P. Nouvelles recherches à la sablière Gritten à Rocourt. *Notae Praehistoricae*.

### 2. Démarche expérimentale suivie

L'étude présentée dans ce chapitre a pour objectif principal d'investiguer la séquence lœssique au moyen d'outils géotechniques, afin d'identifier d'éventuels horizons repères sur base de leurs propriétés mécaniques. Cette approche peu commune permet en effet de s'affranchir des rares affleurements présents en contexte lœssique pour préciser la stratigraphie de la couche lœssique. Le chapitre 3 montre qu'il existe une série d'horizons lœssiques et de paléosols au sein des séquences lœssiques de Moyenne Belgique. Certains d'entre eux ne sont épais que d'une dizaine de centimètres, et même parfois moins. L'étude géotechnique doit dès lors être capable de caractériser ces dépôts le plus finement possible, en vue d'identifier ces horizons très peu épais.

La méthode d'investigation géotechnique choisie est l'essai de pénétration statique. De manière à pouvoir connaître précisément la succession d'horizons investigués par la pointe, il a été préféré de réaliser ces essais en arrière d'affleurements recoupant la séquence lœssique. Une description détaillée des horizons observables à l'affleurement permet alors d'interpréter les résultats de l'essai CPT d'un point de vue stratigraphique, en lien avec cet affleurement. Cette analyse stratigraphique est renforcée par des mesures mécaniques réalisées directement sur l'affleurement, au moyen d'un pénétromètre de poche, quand celles-ci ont été possibles. Cet outil mesure en effet une résistance du matériau suite à l'enfoncement d'un poinçon. Il n'existe cependant pas de relation physique directe entre les mesures réalisées au moyen du CPT et celles effectuées au pénétromètre de poche. Il n'est donc pas possible d'attribuer une certaine valeur de la résistance au cône du CPT à partir de la résistance mesurée au pénétromètre de poche dans le même horizon, et inversement. Cependant, les résultats des deux essais peuvent être comparés sur base de leurs valeurs relatives. Il est en effet prévisible que, lorsque la résistance au cône du CPT augmente dans un horizon donné, la résistance à l'enfoncement du pénétromètre de poche suive une tendance similaire dans cette même couche. Le pénétromètre de poche est utilisé dans cette étude comme un moyen de valider les éventuelles corrélations stratigraphiques établies entre, d'une part les observations réalisées sur l'affleurement, et d'autre part les mesures acquises par l'essai de pénétration statique.

Le choix des sites étudiés est fortement contraint par le faible nombre d'affleurements recoupant la séquence lœssique en Moyenne Belgique. Lorsque sont ajoutés à cette première contrainte, d'autres paramètres restrictifs tels que l'accessibilité du site (autorisation, proximité, faisabilité), et la qualité de la séquence lœssique (épaisseur, degré de remaniement, horizons en présence, intérêt scientifique), les possibilités de choix de sites diminuent considérablement. Au total, trois sites d'intérêt scientifique important ont été investigués dans le cadre de cette thèse : la carrière de Romont à Ében-Émael, la sablière Gritten à Rocourt et le site archéologique En Bia Flo I à Remicourt (Figure 4-1). Ils se localisent tous en Hesbaye. Parmi ces sites, la carrière de Romont a fait l'objet d'une campagne d'investigation plus poussée.

La suite de ce chapitre présente d'abord les différentes méthodes expérimentales in situ mises en œuvre. Ensuite, les résultats issus de l'investigation à l'échelle de ces trois sites sont développés. Le site de Remicourt est d'abord présenté. Puis, le site de Romont est développé de manière plus approfondie. Finalement, le site de Rocourt souligne quelques limitations liées à l'approche expérimentale. Les résultats obtenus pour les trois sites d'étude sont également discutés dans leur ensemble à la fin de ce chapitre.



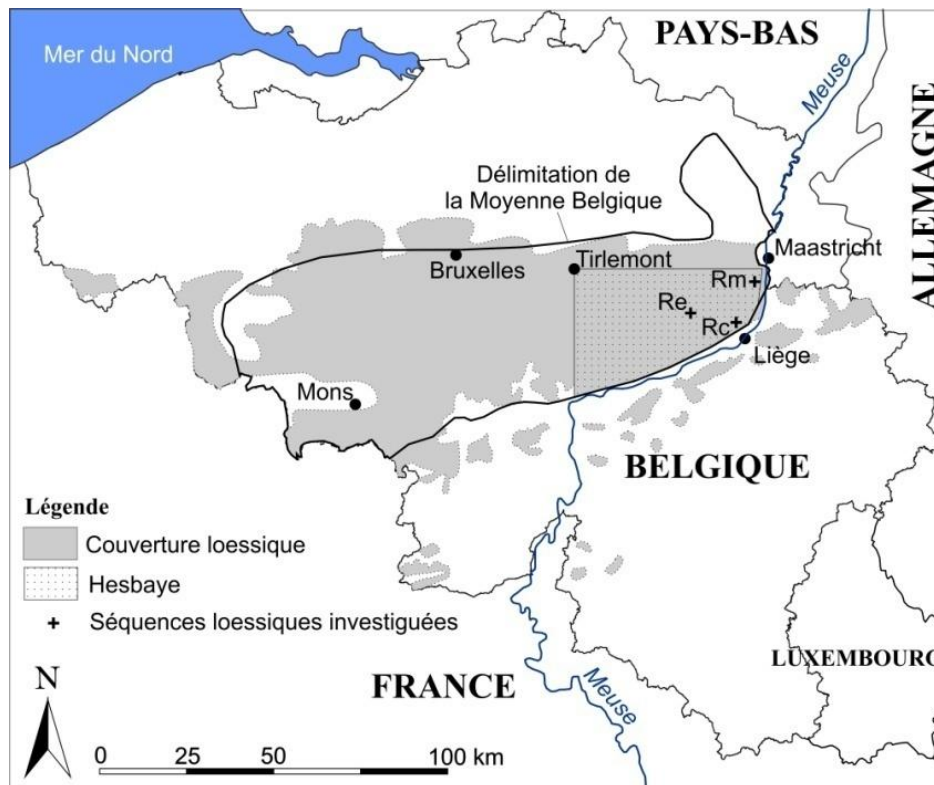


Figure 4-1 : Répartition de la couverture loessique en Belgique (modifiée, d'après Haesaerts et al., 2011a) et localisation des sites investigués dans le cadre de cette étude. Légende des sites : Rc = Rocourt (sablière Gritten) ; Re = Remicourt (En Bia Flo I) ; Rm = Ében-Émael (Carrière de Romont).

Le Tableau 4-1 suivant synthétise les différents essais qui ont été réalisés ou dont les résultats sont disponibles dans la littérature scientifique, pour les trois sites étudiés (Remicourt, Romont et Rocourt).

Tableau 4-1 : Indication des investigations réalisées ou disponibles pour chacun des trois sites d'étude. Les chiffres entre parenthèses mentionnent le nombre d'essais. Abréviations : CPT = essai de pénétration statique ; ERT = tomographie de résistivité électrique ; PP = pénétromètre de poche.

		Remicourt	Romont	Rocourt
Levé géologique de la paroi		x	x	x
CPT	Pointe M1	x (24)	x (3)	-
	Pointe M2	-	x (4)	-
	Pointe E	-	x (9)	x (10)
Forage	Carotté	-	x (3)	-
	Tarière manuelle	-	x (1)	x (1)
ERT		-	x (3)	-
PP		-	x (1285)	x (540)

### 3. Méthodes expérimentales principales

#### 3.1. Essai de pénétration statique

L'essai de pénétration statique consiste à enfoncer une pointe conique et un train de tiges et de tubes dans le sous-sol, à une vitesse constante de 2 cm/s. Le déroulement général d'un essai de pénétration statique est développé en détail dans le chapitre 2. Les campagnes d'essai ont été réalisées au moyen de l'équipement dont dispose le Laboratoire de Géotechnologies de l'Université de Liège. Il se compose d'un camion d'une masse approximative de 25 T (Figure 4-2 (a)) équipé d'un pénétromètre HYSON pouvant atteindre une force à l'enfoncement de 200 kN, développé par la société A.P. van den Berg. La force nécessaire pour enfoncer la pointe et les tubes est exercée par un système hydraulique qui utilise le poids propre du camion. La pression du système hydraulique est alors mesurée au moyen de deux manomètres, l'un pour les valeurs entre 0-20 MN/m<sup>2</sup> et l'autre pour les mesures entre 20-200 MN/m<sup>2</sup> (Figure 4-2 (b)). Les pointes utilisées possèdent des dimensions standardisées. La section à la base du cône est de 10 cm<sup>2</sup> (pour un diamètre de 35,7 mm) et l'apex vaut 60°.

Trois types de pointes ont été utilisés (Figure 4-2 (c)). La pointe mécanique de type M1 (ou cône à jupe) est un équipement robuste et pratique utilisé depuis les années 1950. Cependant, seule la résistance au cône ( $q_c$ ) est le paramètre accessible, mesurée tous les 20 cm en fonction de la profondeur. La résistance de frottement latéral total ( $Q_{st}$ ) est également mesurée par la pointe M1, mais celle-ci est peu exploitée dans l'interprétation des données. La résistance de frottement latéral local ( $f_s$ ), qui constitue l'autre paramètre intéressant pour l'interprétation des résultats, est accessible au moyen de la pointe mécanique de type M2 (ou cône de Begemann). L'enfoncement est également réalisé de manière discontinu, avec un cycle de mesure répété tous les 20 cm en fonction de la profondeur. La troisième pointe utilisée dans le cadre de ce travail est un piézocône. Ce dernier consiste en une pointe électrique permettant de mesurer des pressions interstitielles en milieu saturé. Étant donné que les milieux investigués sont tous partiellement saturés, les résultats du piézocône ont été exploités comme des résultats issus d'une pointe électrique classique. Cette pointe permet de mesurer en continu, c'est-à-dire tous les centimètres en fonction de la profondeur, la résistance au cône ainsi que la résistance de frottement latéral local. Elle donne également accès à la mesure de l'inclinaison de la pointe en cours d'enfoncement, au moyen d'un inclinomètre situé en arrière du cône. Dans le cas de l'utilisation d'une pointe électrique, les mesures sont automatiquement enregistrées par un ordinateur, au moyen du logiciel d'acquisition CPTest 3.21, commercialisé par la société Geomil Equipment (Figure 4-2 (d)). Les procédures d'essai appliquées dans ce travail suivent les normes internationales ASTM D3441-05 (2005) et ASTM D5778-12 (2012), respectivement pour l'utilisation d'une pointe mécanique et d'une pointe électrique. Chacune des pointes susmentionnées, ainsi que les paramètres mesurés sont décrits en détail dans le chapitre 2.

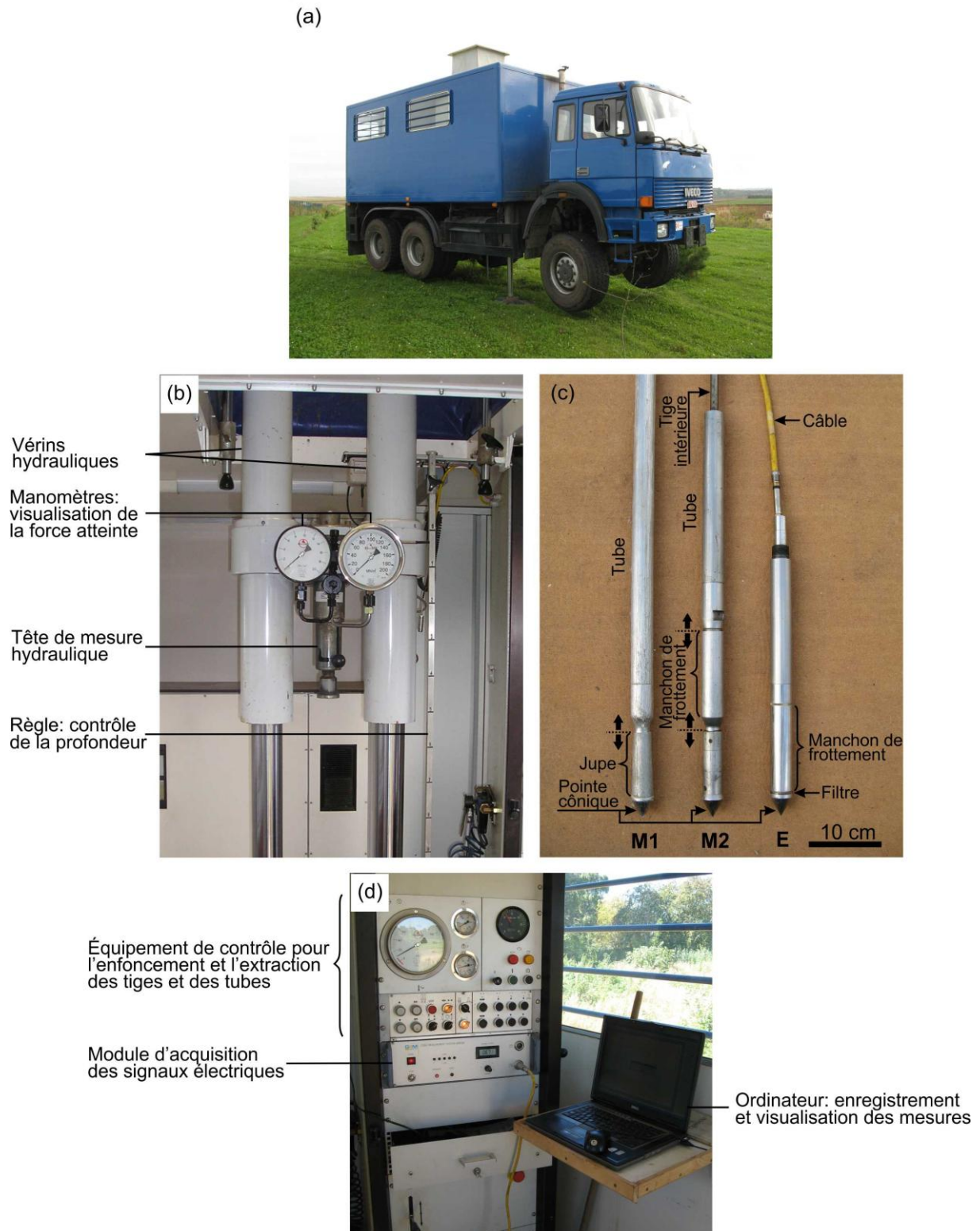


Figure 4-2 : Équipement mis en œuvre pour les essais de pénétration statique. (a) Camion CPT. (b) Équipement utilisé à l'aplomb des tiges et des tubes, servant à leur enfoncement et à leur extraction. La tête de mesure est utilisée uniquement avec les pointes mécaniques (M1 ou M2). (c) Illustration des différentes pointes utilisées (M1, M2 et E). (d) Équipement utilisé pour l'acquisition des données au moyen d'une pointe électrique (E). Photographies prises par S. Delvoie.

### 3.2. Pénétromètre de poche

Le pénétromètre de poche est un outil léger, très facile d'utilisation qui permet une estimation rapide de la résistance en compression simple d'un matériau non pulvérulent, grâce à une calibration préalable du constructeur. L'outil se compose d'une tige de section circulaire et d'un piston interne relié à un manomètre (Figure 4-3 (a)). Ce dernier affiche la valeur maximale atteinte lors de l'enfoncement de la partie frontale de la tige dans le sol. L'enfoncement est exercé perpendiculairement à la surface investiguée, sur une profondeur de pénétration de 6 mm. Un repère est tracé sur la tige afin de respecter cette profondeur de 6 mm pour chaque enfoncement. Cette valeur correspond également au diamètre de la tige. Les mesures qu'il est possible d'atteindre par ce dispositif, s'échelonnent entre 0 et 14 kg/cm<sup>2</sup> (entre 0 et 1,4 MPa). L'enfoncement peut être réalisé sur des carottes de forage ou directement sur le matériau affleurant en place.

Dans le cadre de ce travail, le pénétromètre de poche a été utilisé directement sur les séquences de loess-paléosols observées à l'affleurement. Cependant, les conditions météorologiques (ensoleillement, précipitation, gel), ainsi que d'autres paramètres (végétation, formation de l'affleurement), ont certainement affectés les propriétés mécaniques originelles du matériau rencontré à la surface des affleurements étudiés. Afin de tenter d'évaluer cette influence, des mesures issues de la même section ont été réalisées dans des tranchées de trois profondeurs différentes : de 2 à 5 cm, 10 cm et 15 cm (Figure 4-4). Pour la tranchée de 10 cm de profondeur, quatre mesures ont été prises pour chaque point de la courbe. Les valeurs minimum, maximum et moyenne sont ainsi représentées sur le graphique. Dans l'ensemble, les trois courbes suivent des tendances comparables. Elles évoluent également de la même manière au passage de la limite de décarbonatation (LD) des loess superficiels, et se marquent par une augmentation rapide de la résistance à l'enfoncement. Toutefois, la courbe relative à la tranchée la plus superficielle présente des valeurs globalement supérieures aux autres tranchées. Cette couche superficielle est plus sujette aux variations météorologiques. Or, les essais ont été réalisés durant une période de relative sécheresse, qui pourrait avoir engendré une diminution de la teneur en eau à la surface de la paroi, en lien avec une augmentation de la résistance mécanique. La réalisation de la paroi, au moyen d'une pelle mécanique, pourrait également avoir compacté plus ou moins localement la couche superficielle de la paroi. Il a dès lors été préféré de réaliser les mesures au pénétromètre de poche dans des tranchées d'au moins 10 cm de profondeur. Celles-ci ont été réalisées manuellement.

L'investigation a alors été réalisée à différentes profondeurs stratigraphiques de la séquence loessique, au départ de la surface nouvellement créée par la tranchée (Figure 4-3 (b)). Une distance maximale de 10 cm sépare les mesures issues de deux profondeurs stratigraphiques successives. Quatre mesures ont été effectuées à chaque profondeur stratigraphique afin d'évaluer l'hétérogénéité des propriétés mécaniques du matériau (Figure 4-3 (c)). Ces mesures au sein d'une même profondeur stratigraphique ont été réalisées avec un espacement de plusieurs centimètres entre deux points successifs, afin d'éviter une influence mutuelle.

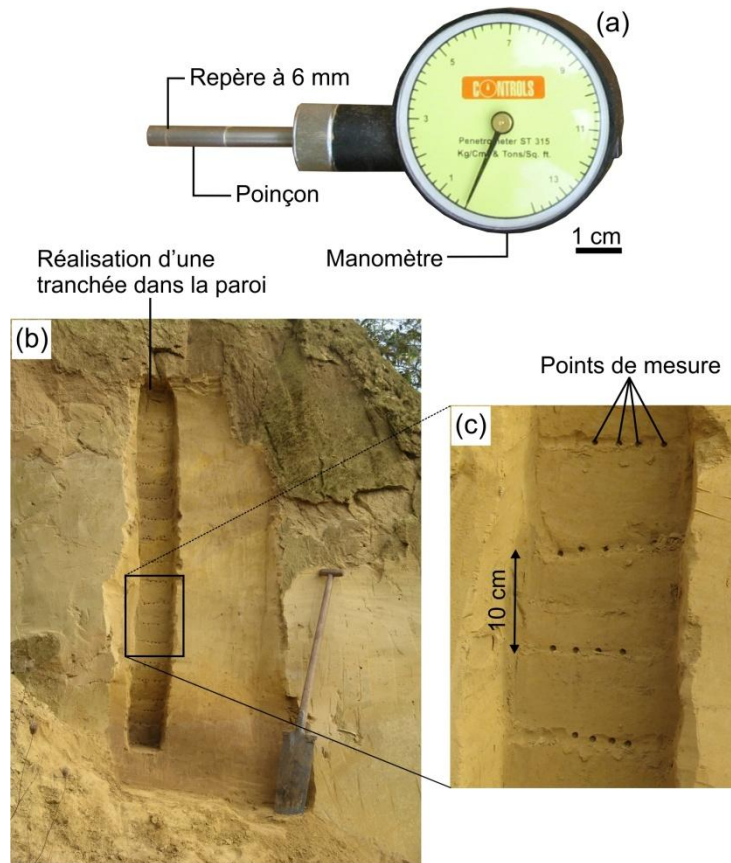


Figure 4-3 : (a) Illustration du pénétromètre de poche utilisé dans le cadre de ce travail. (b) Réalisation d'une tranchée dans la paroi pour y réaliser les essais (carrière de Romont). (c) Configuration type de points de mesure au pénétromètre de poche (carrière de Romont). Photographies prises par S. Delvoie.

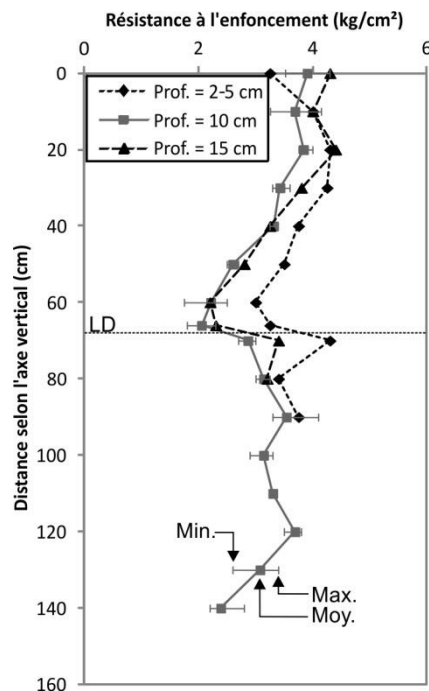


Figure 4-4 : Vérification de l'influence de la profondeur de la tranchée sur les mesures de la résistance à l'enfoncement du pénétromètre de poche. Les mesures ont été réalisées sur le site de Romont, au voisinage de la limite de décarbonatation (LD).

### 3.3. Tomographie de résistivité électrique

Une tomographie de résistivité électrique est une méthode d'investigation non destructive, qui fournit une image de la distribution de la résistivité électrique dans le sous-sol. La valeur de la résistivité électrique est influencée par différents paramètres tels que la teneur en eau, la porosité, la proportion de minéraux argileux, la nature de la matrice, la cimentation des grains, la température et la salinité (Telford *et al.*, 1990). La conduction du courant électrique dans un milieu géologique peut avoir différentes origines. La conduction électrolytique permet de conduire le courant électrique grâce aux ions dissous dans l'eau contenue dans un milieu saturé ou partiellement saturé. Une seconde façon concerne essentiellement les milieux sédimentaires contenant des minéraux argileux. Ces derniers ont la particularité de conduire le courant électrique à leur surface. On parle alors de la conductivité de surface. Enfin, de manière plus anecdotique dans le cas de cette étude, la conduction électrique peut être assurée par la présence de minéraux conducteurs comme les sulfures, les oxydes et le graphite.

La réalisation d'une tomographie de résistivité électrique consiste à injecter un courant électrique dans le sol en imposant une différence de potentiel électrique connue entre deux électrodes colinéaires connectées au sol (électrodes de courant). La distribution du potentiel électrique résultant est alors mesurée par une autre paire d'électrodes (électrodes de potentiel). L'ensemble de ces deux paires d'électrodes forme un quadripôle. La mesure correspondante donne une valeur de la résistivité apparente du sous-sol. Une tomographie de résistivité électrique complète nécessite de répéter cette mesure pour un grand nombre de quadripôles différents. Une pseudo-section est alors obtenue en reportant au centre du quadripôle, à une profondeur dépendant de l'écartement utilisé entre électrodes, la valeur de résistivité apparente mesurée. Cependant, cette représentation conduit à une image fictive où ni les valeurs de résistivité, ni celles de profondeur ne sont correctes.

Pour obtenir une image quantitative, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section pour représenter les variations de résistivité locale réelle (et non apparente) en fonction de la profondeur vraie. L'inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui vise à minimiser l'écart entre la pseudo-section mesurée et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à atteindre une concordance acceptable entre les données mesurées et celles calculées, ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Les données sont calculées sur base d'un modèle à deux dimensions qui est supposé constant dans la troisième direction.

Le matériel utilisé consiste en un dispositif de 64 électrodes espacées de 2 m. Le profil représente alors une longueur totale de 126 m (Figure 4-5). La profondeur d'investigation atteinte est d'environ 20 m, dans la partie centrale du profil.



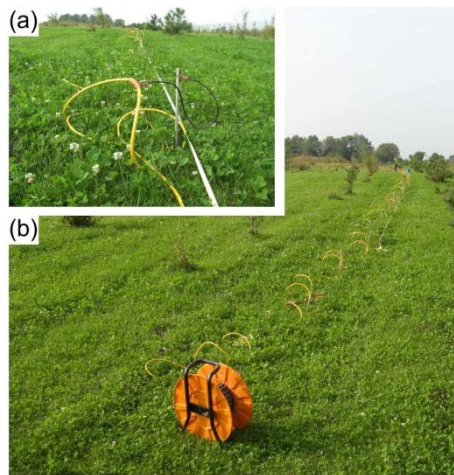


Figure 4-5 : Matériel utilisé pour la réalisation de tomographie de résistivité électrique. (a) Électrode en place. (b) Vue d'ensemble d'un profil. Photographies prises par S. Delvoie sur le site étudié de Romont.

### 3.4. Forage

Les forages qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail sont de deux types. D'une part, les forages carottés ont été effectués au moyen de la foreuse Comacchio GEO305 dont dispose le Laboratoire de géotechnologies de l'Université de Liège. La technique de carottage utilisée fonctionne par battage (Figure 4-6 (a)). L'enfoncement d'un carottier est exercé par un mouton positionné dans l'axe du forage, avec une fréquence de battage de 50 coups/minute. Le carottier utilisé permet de prélever des échantillons non remaniés d'une longueur de 50 cm et d'un diamètre de 100 mm dans une gaine en PVC (Figure 4-7 (b)). Afin d'éviter que l'échantillon prélevé ne retombe dans le trou du forage lors de son extraction, une pièce métallique, appelée panier (Figure 4-7 (b)), est placée à l'entrée du carottier. La tête du carottier se compose d'une trousse coupante, servant à faciliter la pénétration du carottier, en remaniant le moins possible le sol en présence. Les échantillons ainsi prélevés feront l'objet d'analyses détaillées dans les chapitre 5 et chapitre 6. D'autre part, un forage à la tarière manuelle a été réalisé au moyen d'une tarière Edelman (Figure 4-7 (c) et Figure 4-7 (d)), en collaboration avec la Direction de l'archéologie du Service public de Wallonie. Cette technique ne permet cependant pas un prélèvement d'échantillons non remaniés et atteint difficilement des profondeurs supérieures à 6-7 m. Ses avantages résident dans la rapidité d'exécution et dans la simplicité de la technique, ne nécessitant pas la mobilisation d'une foreuse.

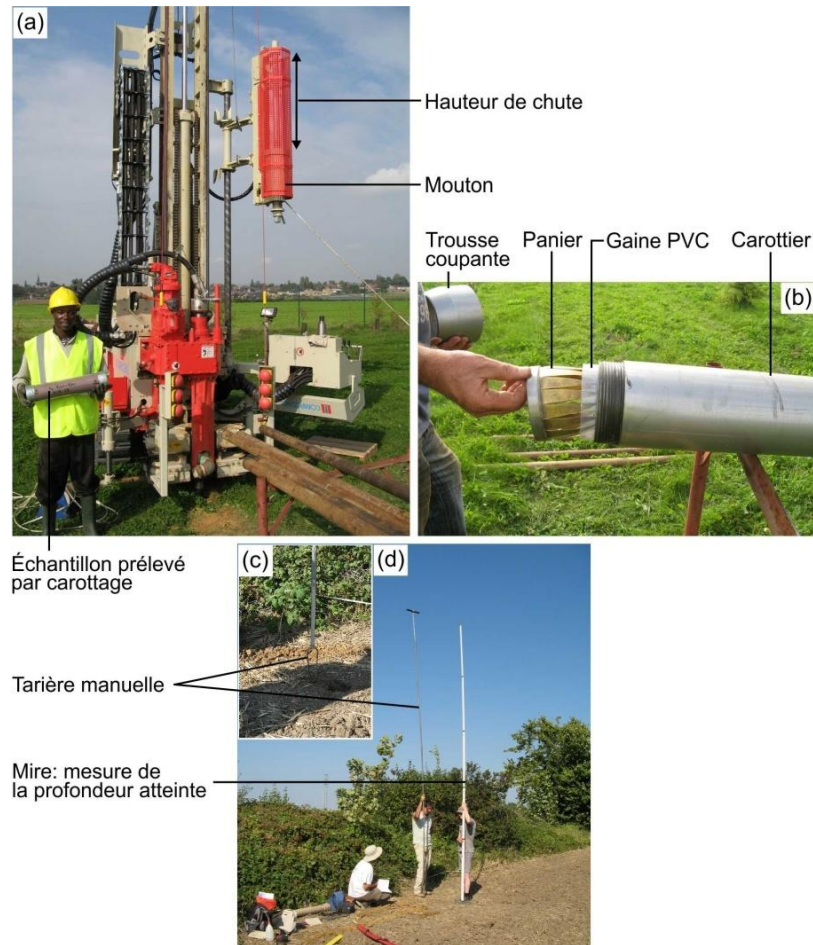


Figure 4-7 : Équipement employé pour la réalisation des forages. (a) Foreuse utilisée avec vue sur le dispositif de battage (site de Romont). (b) Différentes parties qui composent le carottier utilisé pour le prélèvement d'échantillons non remaniés (site de Romont). (c) Tarière manuelle Edelman (site de Rocourt). (d) Forage à la tarière manuelle en cours de réalisation (site de Rocourt). Photographies prises par S. Delvoie.



## 4. Étude du site de Remicourt

### 4.1. Présentation du site de Remicourt

L'investigation géotechnique du site de Remicourt est liée à la campagne d'essais de reconnaissance réalisée pour la construction de la ligne de TGV reliant Liège à Bruxelles. Un total de 24 essais de pénétration statique a été réalisé en 1994 à un emplacement qui est maintenant occupé par les voies ferrées, à proximité des localités de Momalle et de Remicourt. Les essais sont distribués spatialement selon un maillage régulier très resserré interdistant de 2,5 m et couvrant une superficie de 17,5 x 5 m<sup>2</sup>. Les CPT ont été effectués au moyen d'une pointe mécanique de type M1.

Le site de Remicourt est également bien connu des archéologues qui y ont découverts près de 400 silex taillés, attribués au Paléolithique moyen (Bosquet *et al.*, 2004, 2011). Des fouilles archéologiques ont été menées entre 1997 et 1998. Une série de tranchées discontinues, creusées à la pelle mécanique, ont été réalisées dans le cadre de ce chantier de fouille (Haesaerts *et al.*, 1997a, 1997b). Certaines d'entre elles (C9 et C11) se localisent à moins de 20 m au sud du site investigué par les essais de pénétration statique (Figure 4-8). Ces investigations, localement complétées par des forages à la tarière manuelle, ont permis de recouper l'entièreté de l'épaisseur de la séquence lœssique, qui y atteint des valeurs importantes, proches de 20 m. Un relevé stratigraphique précis et détaillé de la séquence fut alors réalisé au départ des excavations. Les résultats de cette étude ont été compilés par Haesaerts *et al.* (1997a, 1999). Ces auteurs mirent en évidence la présence d'une dune lœssique dont l'axe est orienté N-S. La campagne géotechnique a été réalisée sur le flanc ouest de cette dune. La base de la séquence se compose de lœss appartenant au Pléistocène moyen, et dont la partie supérieure est représentée par la base du Pédocomplexe de Rocourt. Vers le haut, la suite de la séquence inclut une épaisse couche de lœss du Pléistocène supérieur, où sont rencontrés notamment, les Sols de Villers-Saint-Ghislain A et B, l'Horizon blanchi de Momalle, le Complexe Humifère de Remicourt, le Sol de Malplaquet, le Sol des Vaux, l'Horizon à Langues de Nagelbeek, une limite de décarbonatation sous la surface topographique, et le sol holocène. Certains de ces horizons sont inclinés vers l'est et possèdent une forme lenticulaire (Figure 4-9 (a) et Figure 4-9 (b)). Les dépôts lœssiques surmontent une couche de conglomérat à silex. La séquence de Remicourt constitue une séquence de référence pour les lœss de Moyenne Belgique (Haesaerts *et al.*, 2016). Les tranchées ont été par la suite comblées préalablement aux travaux de la ligne TGV. Aucun échantillon carotté n'est aujourd'hui disponible pour de nouvelles analyses complémentaires. Les mesures au moyen du pénétromètre de poche n'ont pu être réalisées sur le site de Remicourt.

### 4.2. Résultats

Les résultats de la campagne géotechnique sont illustrés à la Figure 4-9 au travers de deux coupes, l'une est parallèle aux tranchées (coupe 1, Figure 4-9 (c)) et l'autre est perpendiculaire (coupe 2, Figure 4-9 (d)). L'analyse de la résistance au cône souligne quatre marqueurs stratigraphiques (annotés MS1 à 4 (Re)) au sein de la séquence lœssique de Remicourt. Depuis la surface topographique, le premier marqueur stratigraphique (MS1 (Re)) se caractérise par un minimum local de la résistance au cône, suivi par une légère augmentation. Ce marqueur est relativement parallèle à la surface topographique. Par comparaison avec les relevés stratigraphiques réalisés à partir des tranchées, le MS1 (Re) occupe une position stratigraphique similaire à celle correspondant à la limite de décarbonatation ou à l'Horizon à Langues de Nagelbeek. Ces deux horizons occupent des positions stratigraphiques très proches l'une de l'autre dans cette partie de la dune lœssique.

Le MS2 (Re) est défini par de très faibles valeurs du  $q_c$ , souvent inférieures à 1 MPa, et ce sur une épaisseur de 40 à 70 cm. Le marqueur stratigraphique est légèrement incliné vers l'est, tout comme les horizons du Pléistocène supérieur qui composent cette partie de la dune. Le MS2 (Re) est corrélé avec le Complexe Humifère de Remicourt. Le MS3 (Re) est situé directement sous le MS2 (Re). Il se caractérise par une rapide augmentation du  $q_c$ , atteignant même les valeurs les plus élevées rencontrées dans l'entièreté de la séquence, aux alentours de 5 à 10 MPa. Sa position stratigraphique se corrèle avec celle qu'occupe l'Horizon blanchi de Momalle, qui compose le sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Enfin, le quatrième marqueur stratigraphique (MS4 (Re)) est identifié de manière discontinue par une rapide augmentation du  $q_c$ . Le MS4 (Re) pourrait correspondre aux lèss saaliens très compacts décrits par Haesaerts *et al.* (1999), attribués aux dépôts mis en place durant la glaciation à la fin du Saalien (avant-dernière glaciation). La transition entre les dépôts lèssiques et le conglomérat à silex sous-jacent est très facilement identifiable sur base des résultats des essais de pénétration statique. Elle se marque par une augmentation brutale de la résistance au cône, atteignant des valeurs largement supérieures à 10 MPa.

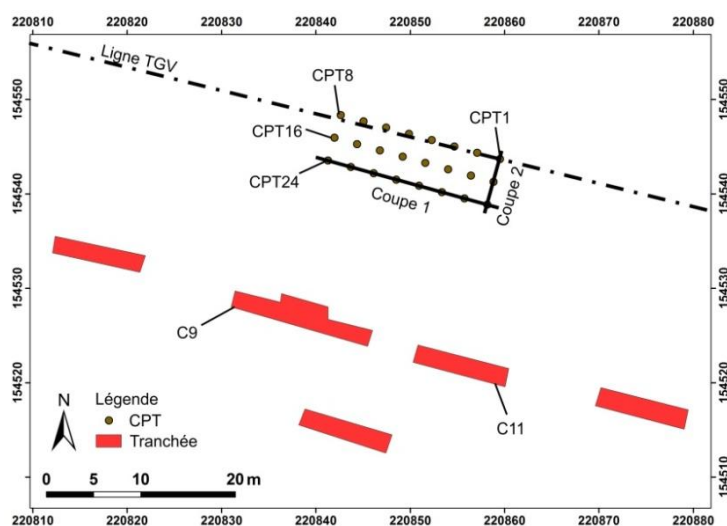


Figure 4-8 : Carte de localisation des investigations menées sur le site de Remicourt. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72. Les coordonnées géographiques de chaque essai sont renseignées en annexe 2.

L'identification des marqueurs stratigraphiques au moyen de la résistance au cône du CPT confirme la forme lenticulaire des horizons qui composent le flanc ouest de la dune lèssique de Remicourt (Coupe 1, Figure 4-9 (c)). La coupe 2, perpendiculaire aux tranchées, précise également que les horizons qui composent cette partie de la dune sont légèrement inclinés en direction du Nord (Coupe 2, Figure 4-9 (d)).

Ces résultats montrent qu'il est donc possible de repérer des horizons au sein de la séquence lèssique au moyen de la résistance au cône du CPT. À l'échelle du site, ces marqueurs stratigraphiques possèdent une signature comparable entre les différents essais géotechniques. Cependant, l'attribution d'horizons pédo- et lithostratigraphiques précis aux marqueurs stratigraphiques mis en évidence par le CPT est encore hypothétique, en raison de la distance qui sépare les essais géotechniques des tranchées archéologiques. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser les essais au plus près de l'affleurement, voir même de compléter l'analyse par des mesures directement sur la paroi. La construction de la ligne TGV ne permet pas de réaliser ces mesures complémentaires sur le site de Remicourt. Par contre, cette démarche a été entreprise sur les sites d'étude de Romont et de Rocourt. Ces derniers permettront en outre de voir si la résistance au cône mesurée au droit des marqueurs

stratigraphiques, suit une tendance comparable à celles observées à Remicourt. Ils permettront également de savoir si des marqueurs stratigraphiques supplémentaires peuvent être mis en évidence au moyen du CPT.

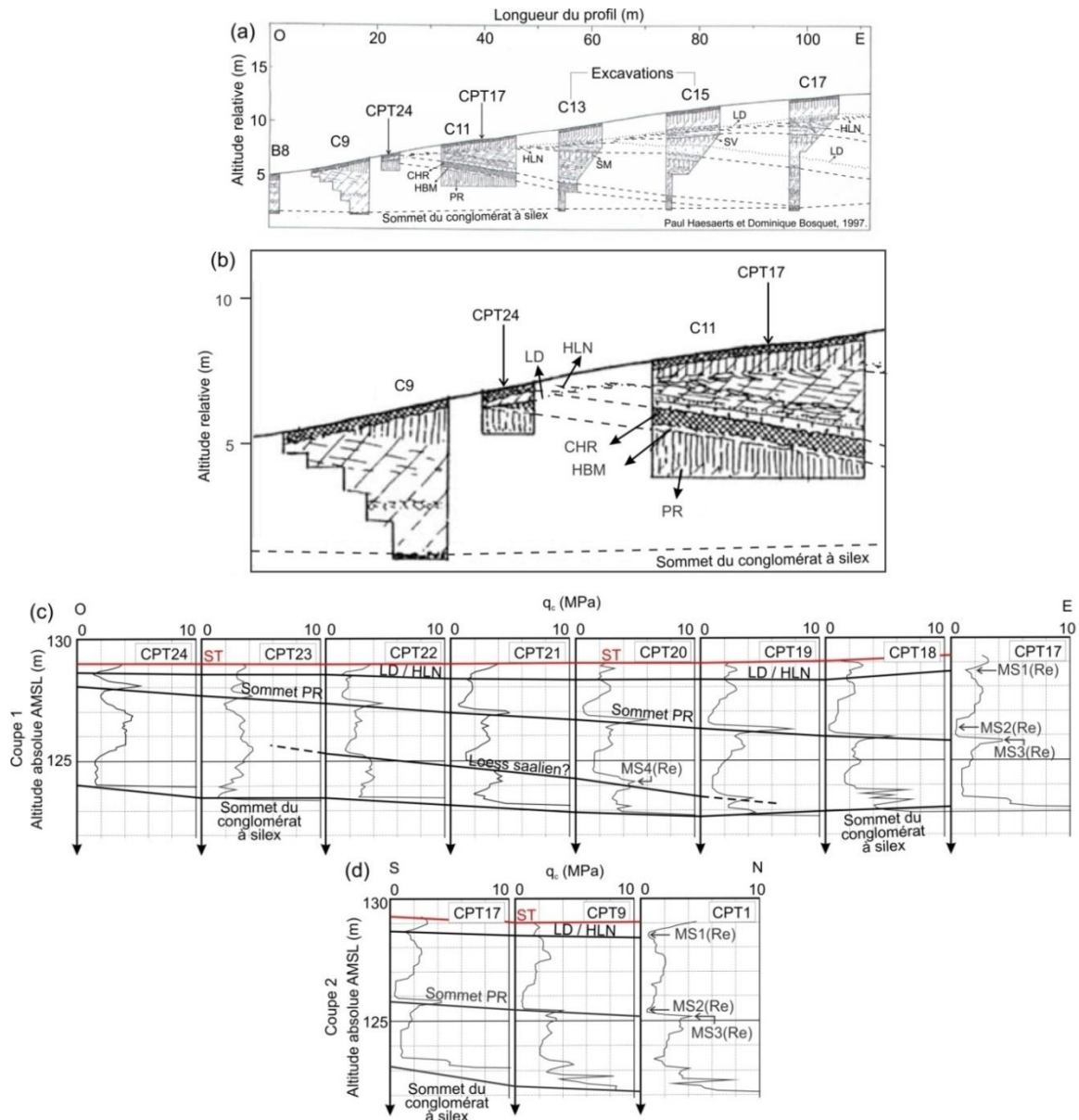


Figure 4-9 : Coupes de la partie ouest de la dune loessique du site de Remicourt. (a) Coupe géologique de la section de la dune loessique utilisée comme référence pour l'interprétation des résultats de la campagne géotechnique (modifié, d'après Haesaerts et al., 1999). L'altitude mentionnée se réfère à une valeur arbitraire. (b) Agrandissement de la coupe géologique au droit des tranchées C9 et C11. L'altitude mentionnée se réfère à une valeur arbitraire. (c) Coupe 1 passant par un série de CPT distribués parallèlement aux tranchées (voir la Figure 4-8 pour la localisation). L'altitude mentionnée se réfère à la hauteur moyenne de la surface de la mer (AMSL). (d) Coupe 2 passant par un série de CPT distribués perpendiculairement aux tranchées (voir la Figure 4-8 pour la localisation). L'altitude mentionnée se réfère à la hauteur moyenne de la surface de la mer (AMSL). Abréviations mentionnées : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MS = marqueur stratigraphique ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; SM = Sol de Malplaquet ; ST = surface topographique ; SV = Sol des Vaux.

## 5. Étude détaillée du site de Romont

La carrière de Romont (commune d'Ében-Émael) est exploitée par la société CBR depuis 1974 pour y extraire la calcarénite et la craie. Elle se localise sur le plateau situé dans l'interfluve entre la Meuse et le Geer, à l'extrémité est de la Hesbaye (Figure 4-10). Le site étudié se localise en arrière du front de taille de la carrière. Une bande de terrain d'une quarantaine de mètres de largeur est disponible pour y implanter les essais. Une tranchée réalisée dans le front de taille permet d'accéder, depuis le haut de la paroi, au pied d'une séquence lœssique d'une dizaine de mètres de puissance (Figure 4-11 (a) et Figure 4-11 (b)). Le site de Romont offre à la fois, une séquence lœssique particulièrement bien développée et observable par la présence d'affleurements continus, et un site accessible à proximité immédiate pouvant accueillir une campagne d'essais géotechniques in situ. Pour ces raisons, ce site fait l'objet, dans le cadre de ce travail, d'une analyse plus poussée que les deux autres sites.

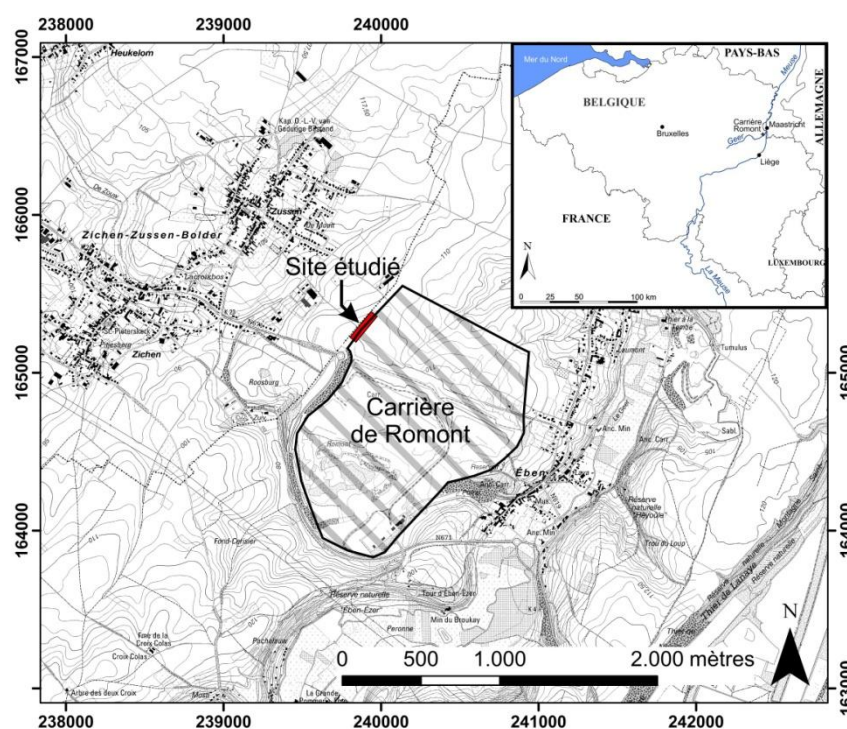


Figure 4-10 : Localisation de la carrière de Romont (Ében-Émael), ainsi que du site étudié, en bordure nord-ouest de la carrière. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72.

### 5.1. Contexte géologique du site de Romont

La carrière de Romont recoupe depuis sa base le Membre de Lanaye récemment classé dans la Formation de Maastricht (Mottequin & Marion, 2012). Celui-ci se compose de craie grossière blanchâtre, lithologiquement très proche d'une calcarénite, incluant de nombreux lits subhorizontaux de silex bleu-gris (Robaszynski, 2006 ; Mottequin & Marion, 2012). Le sommet du Membre de Lanaye est habituellement caractérisé par un amoncellement de nodules de silex suite à la dissolution de la matrice carbonatée. Le conglomérat à silex n'est pas clairement présent dans la carrière de Romont, probablement car la calcarénite a été surmontée, rapidement après son dépôt, par les autres membres de la Formation de Maastricht (Robaszynski, 2006). Ceux-ci se composent d'environ 5 m d'épaisseur de calcarénite jaunâtre incluant également des nodules de silex. La Formation de Maastricht s'est mise en place au cours du Maastrichtien supérieur. La calcarénite est surmontée par une couche de sable fin



marin oligocène (Juvigné, 1992) qui s'est mis en place lors de la dernière transgression marine ayant recouvert l'est de la Belgique. Ces dépôts appartiennent à la Formation de Sint-Huibrechts-Hern (Laga, 1988 ; Laga *et al.*, 2001). Au droit de la coupe étudiée, la couche représente une épaisseur de quelques mètres, alors qu'à l'emplacement actuel de la carrière, la couche atteignait jusqu'à 22 m d'épaisseur (Juvigné, 1992). Après le retrait de la mer vers la fin de l'Oligocène, le réseau hydrographique commença à s'installer. Des dépôts lenticulaires de terrasses fluviales qui surmontent les dépôts oligocènes et qui, parfois, reposent directement sur la calcarénite, sont rencontrés de manière discontinue à l'emplacement de la carrière de Romont. Ces dépôts ont été attribués à la présence du Geer et de la Meuse et se composent essentiellement de galets plus ou moins bien roulés (Juvigné, 1992 ; Juvigné & Renard, 1992 ; Juvigné *et al.*, 2008). De nombreuses évidences de dissolution de la calcarénite et plus localement du sommet de la craie sont également présentes (Figure 4-11 (c), Juvigné, 1992 ; Willems *et al.*, 2010).

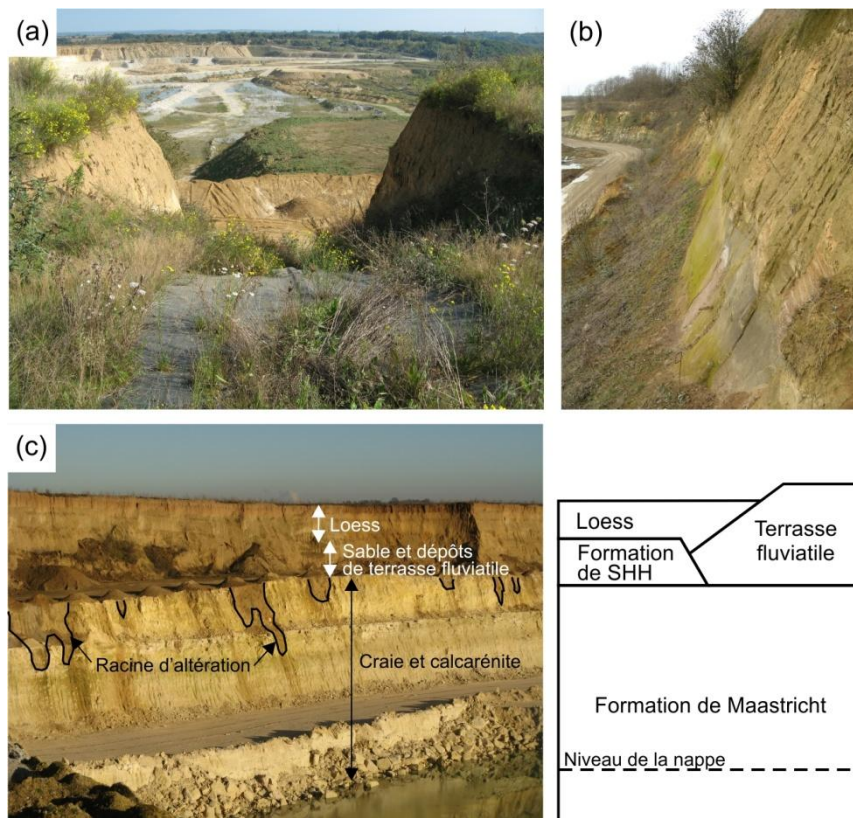


Figure 4-11 : Photographies de la carrière de Romont. (a) La tranchée d'accès recoupant le front de taille (photo du 17/04/2014). (b) Vue du pied de la séquence lœssique (partie SO de la section étudiée ; photo du 03/03/2015). (c) Interprétation géologique des principales unités visibles sur les fronts de taille de la carrière de Romont (photo du 10/12/2013). Abréviations : SHH = Formation de Sint-Huibrechts-Hern. Photographies prises par S. Delvoie.

Les dépôts oligocènes et les dépôts de terrasses ont ensuite été recouverts par une couche de limon éolien d'une dizaine de mètres d'épaisseur à l'emplacement de la carrière de Romont. Les lœss appartiennent essentiellement au Pléistocène supérieur. Des lœss du Pléistocène moyen ont également été rapportés ; en dehors de certains secteurs spécifiques, ils se cantonnent essentiellement dans les fonds de vallons et les poches de dissolution qui affectent les dépôts maastrichtiens (Juvigné, 1992 ; Meijs, s.d.). La séquence lœssique correspondant à la fin du Pléistocène moyen et au Pléistocène supérieur est particulièrement bien développée à Romont. Plusieurs horizons de référence y sont observables :

Pédocomplexe de Rocourt, Complexe Humifère de Remicourt, Sol de Malplaquet, Horizon à Langues de Nagelbeek (Juvigné *et al.*, 2008, Haesaerts *et al.*, 2016 ; Figure 4-12). Par ailleurs, le front de taille situé en bordure NO de la carrière a atteint son extension maximale. Il en résulte que la paroi actuellement visible devrait perdurer pendant de nombreuses années. Ces différents facteurs font de cette paroi un affleurement de référence (stratotype) pour les lœss de Moyenne Belgique (Haesaerts *et al.*, 2011a).

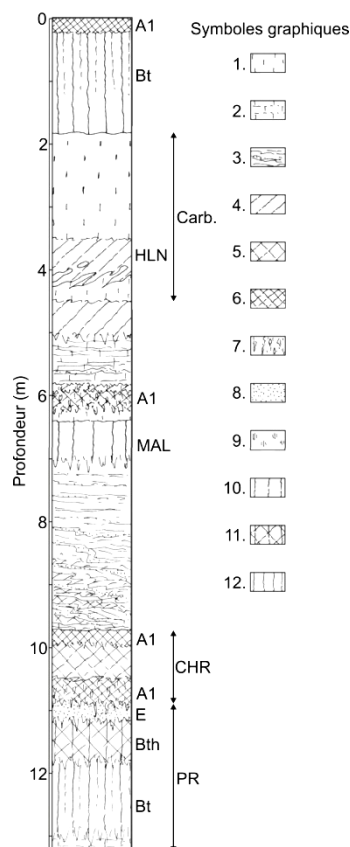


Figure 4-12 : Colonne lithostratigraphique synthétique de la séquence lœssique de la carrière de Romont, établie à proximité du site étudié (modifié, d'après Juvigné *et al.*, 2008). Abréviations : Carb. = lœss carbonaté ; CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt. Légende des symboles : 1. lœss ; 2. lœss finement lité ; 3. lœss hétérogène lité ; 4. horizon brunifié ; 5. limon humifère ; 6. horizon humifère ; 7. horizon bioturbé ; 8. horizon blanchi ; 9. hydroxyde de fer ; 10. sol brun (horizon B2) ; 11. sol gris forestier (horizon Bth) ; 12. sol lessivé (horizon Bt).

## 5.2. Présentation de la campagne expérimentale in situ

La campagne d'investigation in situ combine différents essais qui sont couramment utilisés lors d'investigations du sous-sol. Ils ont été réalisés en arrière d'une section du front de taille de 100 m de longueur. Cette section se localise à proximité de celle qui avait déjà fait l'objet d'une étude approfondie de la séquence lœssique et dont les résultats ont été publiés par É. Juvigné *et al.* en 2008 (Figure 4-12). Les essais sont situés à une distance de 15 à 30 m en arrière de la paroi. La distribution de la campagne d'investigation réalisée à Romont est présentée à la Figure 4-13. Au total, trois tomographies de résistivité électrique (ERT), 16 essais de pénétration statique (CPT), trois forages carottés avec prélèvement d'échantillons non remaniés et un forage à la tarière manuelle ont été réalisés sur le site étudié. La position des profils tomographiques a été choisie de manière à recouper les autres essais réalisés sur le site, et ce, afin d'en faciliter la comparaison. Les CPT ont été réalisés au moyen de différents types de pointes : M1 (n=3), M2 (n=4) et électrique (n=9).

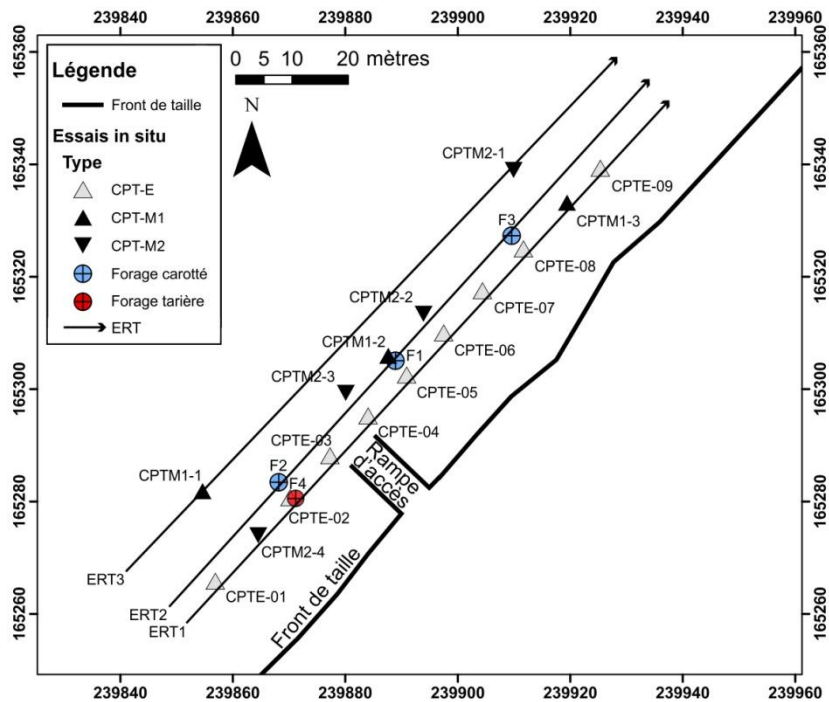


Figure 4-13 : Distribution des essais réalisés dans le cadre de la campagne d'investigation in situ du site de Romont. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72. Les coordonnées géographiques de chaque essai sont renseignées en annexe 2.

Parallèlement, la section du front de taille, située au droit de la zone investiguée, a également fait l'objet d'analyses. Une rampe permet d'accéder à la base de la séquence lœssique depuis le sommet de la paroi (Figure 4-11 (a)). Sa présence offre deux parois orientées perpendiculairement au front de taille, qui recoupent la partie sommitale des loëss du Pléistocène supérieur. Un levé géologique détaillé du front de taille a d'abord été réalisé, de manière à vérifier la continuité latérale des horizons observés. Des mesures au pénétromètre de poche ont ensuite été effectuées dans une série de tranchées complémentaires creusées manuellement dans la paroi.

### 5.3. Résultats

L'ensemble des résultats issus de la campagne d'investigation réalisée sur le site de Romont, sont présentés ci-après.

#### 5.3.1. Coupe géologique du front de taille

Une section d'une centaine de mètres de longueur du front de taille a été levée et décrite en détail. L'emplacement de cette section se trouve au droit de la campagne d'essais réalisée en arrière, sur le site en contre-haut. La Figure 4-14 synthétise, d'un point de vue stratigraphique, l'interprétation des observations qui y ont été réalisées. Les horizons situés à la base de la séquence lœssique ont pu être recoupés de manière presque continue sur de grandes distances. Il en résulte que leur positionnement sur la coupe est assez fiable et précis. Pour une raison d'accessibilité, les horizons présents dans la partie supérieure de la paroi n'ont pu être recoupés qu'à quelques endroits, et ce de manière ponctuelle. Le positionnement stratigraphique de ces horizons au-delà des parties observées présente dès lors une plus grande incertitude. Les parois latérales bordant la rampe d'accès ont permis d'observer en détails ces horizons de la partie supérieure de la séquence. La Figure 4-14 différencie les zones qui ont

été levées, de celles qui ne l'ont pas été. Une description géologique détaillée des observations réalisées pour chaque horizon stratigraphique de la paroi est présentée à l'annexe 1 de cette thèse. Quelques-uns des horizons mentionnés sur la coupe sont illustrés par des photographies à la Figure 3-14.

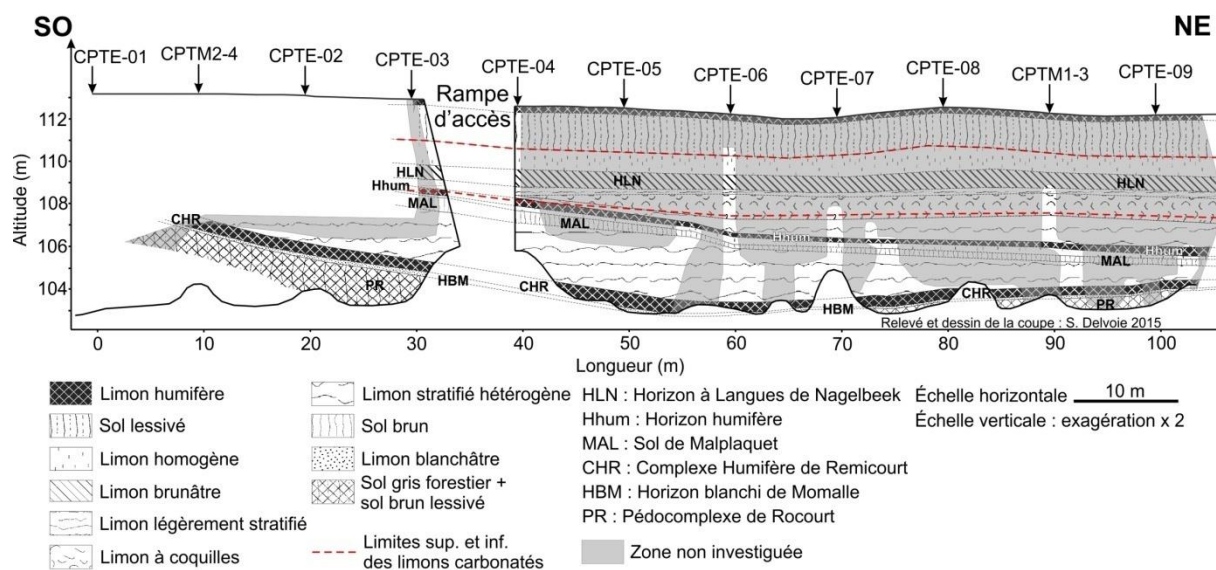


Figure 4-14 : Coupe géologique synthétique issue du levé détaillé de la section étudiée du front de taille de la carrière de Romont (Ében-Émael). Les essais de pénétration statique les plus proches de la paroi sont également localisés sur la coupe.

Le Pédocomplexe de Rocourt sert de niveau de base à cette étude. Il se caractérise par des limons argileux compacts bruns à brun-rouge, particulièrement bien développés à Romont. Au sein de ce pédocomplexe, trois pédogenèses distinctes, avec illuviation, ont été décrites dans plusieurs séquences de Moyenne Belgique : Sol d'Harmignies et Sols de Villers-Saint-Ghislain A et B (Haesaerts & Van Vliet-Lanoë, 1981 ; Haesaerts *et al.*, 1999, 2011b ; Pirson *et al.*, 2009 ; Meijs, 2011). Le sommet du Pédocomplexe de Rocourt est caractérisé par un horizon décimétrique blanchâtre, l'Horizon blanchi de Momalle, bien visible à Romont.

Le Complexe Humifère de Remicourt (CHR) représente l'unité la plus aisément identifiable à l'affleurement. Il se caractérise par une couleur noire à brun foncé. À l'emplacement de la coupe étudiée, le CHR s'est formé dans un paléovallon asymétrique. Le flanc NE possède une inclinaison moyenne de 2,5 % alors que le flanc opposé est incliné de 8,5 %. L'épaisseur du CHR n'est pas constante le long de la section du paléovallon. Elle atteint une valeur maximale de 85 cm dans le creux du paléovallon, alors qu'elle possède une épaisseur assez constante au niveau du flanc SO, équivalant à 55 cm. Au niveau du flanc NE, l'épaisseur du CHR décroît progressivement depuis le fond du paléovallon pour n'atteindre plus que 40 cm à l'extrémité NE de la section étudiée. D'autres observations réalisées en direction du NE, légèrement au-delà de la section étudiée, indiquent que l'épaisseur du CHR continue de décroître jusqu'à disparaître à une distance de 75 m par rapport au fond du paléovallon.

Ensuite, le CHR est directement surmonté par un complexe stratifié (complexe stratifié inférieur) caractérisé par des loess et paléosols remaniés. La partie inférieure du complexe stratifié inférieur se compose d'ailleurs des horizons pédologiques sous-jacents érodés et remobilisés, représentés par le Pédocomplexe de Rocourt et le CHR. Ce complexe stratifié se présente sous une forme lenticulaire. Son épaisseur est maximale au droit du fond du paléovallon où elle atteint près de 3 m, alors qu'elle ne représente plus que 70 cm à



l'extrémité NE de la section étudiée. Comme le CHR, le complexe stratifié inférieur tend à disparaître vers le NE. Sa présence comble pratiquement totalement le paléovallon mentionné précédemment.

Le Sol de Malplaquet repose au-dessus du complexe stratifié inférieur. Il s'agit d'un sol brun positionné dans la première partie du Pléniglaciaire inférieur. Il possède une épaisseur relativement constante, entre 30 et 60 cm, sur l'ensemble de la section étudiée, et une légère inclinaison vers le NE, qui s'accroît toutefois dans la moitié SO de la section. Le petit horizon humifère qui le surmonte suit assez fidèlement le sommet du Sol de Malplaquet. Plus haut dans la séquence, cet horizon humifère est surmonté par un second complexe stratifié (complexe stratifié supérieur), qui n'est présent que dans la moitié NE de la section étudiée. Son épaisseur maximale atteint 1,3 m. Un horizon caractérisé par des limons essentiellement brunâtres et incluant de nombreuses coquilles de petits gastéropodes est ensuite présent. Il présente une épaisseur relativement constante aux alentours de 1 m dans la moitié NE de la section étudiée, alors que vers le SO, il diminue pour ne plus être présent sur la paroi sud de la rampe d'accès. Cette unité incluant les coquilles de petits gastéropodes est ensuite surmontée par une couche de quelques décimètres d'épaisseur de limon légèrement stratifié.

Toujours plus haut dans la séquence lœssique, l'Horizon à Langues de Nagelbeek (HLN) est particulièrement bien développé. Il correspond à un horizon grisâtre dont la base cryoturbée est marquée par une série de langues. Au niveau de la section étudiée, l'HLN possède une épaisseur constante de 70 cm jusqu'à la base des langues. L'horizon est légèrement incliné vers le NE, au même titre que la topographie de surface. Enfin, l'horizon de décarbonatation se rencontre vers 2 m sous la surface.

Ces observations confirment les résultats précédemment obtenus par E. Meijs (s.d.) et synthétisés dans une coupe dont la réalisation est datée en 2011 (Figure 4-15). Cette coupe n'a cependant jamais été publiée. Elle représente les différentes unités qui composent la séquence lœssique retrouvée à Romont. Ces unités font référence à un découpage pédo- et lithostratigraphique défini par l'auteur. Pour faciliter la lecture de cette coupe, le Tableau 4-2 relie la nomenclature utilisée par E. Meijs avec celle utilisée dans ce travail, qui est aussi largement utilisée pour décrire les séquences de Moyenne Belgique (Haesaerts *et al.*, 2016). L'emplacement précis de cette coupe n'est pas connu mais une estimation est proposée sur la Figure 4-15. Elle semble inclure entièrement la section de paroi étudiée dans ce travail. Par ailleurs, la coupe ne donne pas d'information sur les endroits qui ont réellement été levés et sur ceux qui ne l'ont pas été. Il est en effet peu probable qu'une telle superficie ait pu être levée précisément, et ce de manière continue. Il faut cependant souligner le niveau de détail élevé qu'a réussi à atteindre E. Meijs pour cette échelle d'étude.

La forme de paléovallon, qui caractérise le CHR, est bien représentée sur la Figure 4-15. Il est particulièrement intéressant de voir que ce paléovallon se serait formé entre la mise en place d'un ensemble de lœss, appelé C-lœss, attribué à une période (MIS-8) globalement froide du Saalien (avant-dernière glaciation), et un autre, appelé B-lœss (MIS-6, fin du Saalien). Le Sol de Heers séparant les deux ensembles n'a pas été observé sur la section levée par E. Meijs. Le Pédocomplexe de Rocourt s'inscrit également dans ce paléovallon. Vers le nord, les différentes unités qui ont comblé le paléovallon, sont biseautées et recoupées par le Sol de Malplaquet (unité 39a). Vers le sud, l'ensemble des horizons déposés entre le Pédocomplexe de Rocourt et le complexe stratifié supérieur (unité 40b) sont recoupés par une importante surface d'érosion, déjà mise en évidence sur le site de Veldwezelt, à l'ouest de Maastricht (unité 42 ; Meijs, 2011). La coupe met également en évidence l'existence de lœss attribués au Saalien et même à la pédogenèse liée à l'Holsteinien et représentée par le Sol de Pottenberg. Un niveau de galets est présent au sommet du Sol de Pottenberg. L'ensemble de la séquence lœssique présente à Romont atteint donc localement une épaisseur de près de

14 m, incluant des dépôts lœssiques attribués au Saalien, et même à l'interglaciaire antérieur, l'Holsteinien (MIS-11), période datée entre 364 et 427 ka.

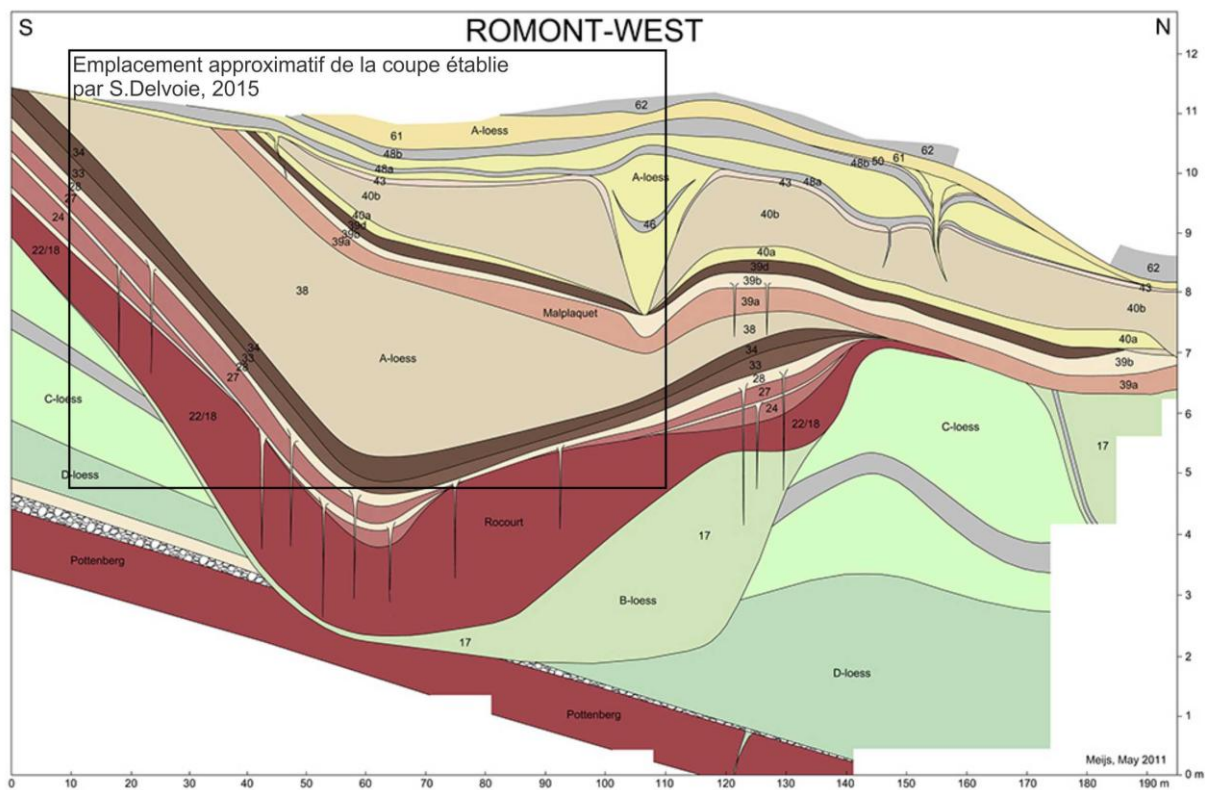


Figure 4-15 : Coupe synthétique étendue de la section étudiée du front de taille de la carrière de Romont (modifié, d'après Meijs, s.d.). Les unités principales référencées sur cette coupe sont décrites dans le Tableau 4-2. L'emplacement approximatif de la section levée par S. Delvoie, et illustrée à la Figure 4-14, est également représenté.

Le schéma stratigraphique de la séquence lœssique du site de Romont défini à la Figure 4-14, servira de référence pour la suite de l'analyse stratigraphique des essais géotechniques réalisés à proximité. Il sera également à l'origine du positionnement stratigraphique des échantillons prélevés par forage.

Tableau 4-2 : Corrélation entre la nomenclature utilisée par E. Meijs (2002, 2011) et celle utilisée par Haesaerts et al. (2016) pour le découpage pédo- et lithostratigraphique de la séquence lœssique. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Elst. = Elsterien (glaciaire précédant le Saalien) ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; Holst. = Holsteinien (interglaciaire précédant l'Émien) ; MIS = stade isotopique marin ; VSG-A et B = Villers-Saint-Ghislain A et B.

Chronostratigraphie		MIS	Découpage pédo- et lithostratigraphique d'après Meijs (2002, 2011)	Unité	Corrélation avec le découpage lithostratigraphique d'après Haesaerts et al. (2016).
Pléistocène supérieur	Weichsélien	2-4	A-lœss	62	Pédogenèse responsable de la formation de l'HLN
				40b	Phase de colluvionnement avec formation de limon stratifié
				39d	Pédogenèse responsable de la formation de Kincamp-A ?
				39a	Pédogenèse responsable de la formation du Sol de Malplaquet
	5a-5e	38	Phase de colluvionnement avec formation de limon stratifié		
		34-35	Pédogenèse et dépôts lœssiques responsables de la formation de la partie supérieure du CHR		
Émien	5a-5e	Pédocomplexe de Rocourt	30-33	Pédogenèse et dépôts lœssiques responsables de la formation de la partie inférieure du CHR. Le sommet de l'unité 30 présente le maximum de la concentration du Téphra de Rocourt.	
			28	Formation de l'HBM	
			27	Pédogenèse responsable de la formation du Sol de VSG-B	
Pléistocène moyen	Saalien	6-10	24	Pédogenèse responsable de la formation du Sol de VSG-A	
			18	Pédogenèse responsable de la formation du Sol d'Harmignies	
			8	C-lœss	
			7	Sol de Heers	
Holst.	11	11	Sol de Pottenberg		
			6	B-lœss	
Elst.	12	12	E-lœss		
			9	Sol de Montenaken	
10	10	10	D-lœss		

### 5.3.2. Tomographie de résistivité électrique

Les trois tomographies de résistivité électrique réalisées sur le site de Romont montrent des résultats très similaires. La Figure 4-16 illustre les résultats obtenus et l'interprétation géologique pour l'ERT 1. Les résultats des ERT 2 et ERT 3 sont consultables à l'annexe 3 de la thèse. Par ailleurs, à titre informatif, la Figure 4-17 reprend les valeurs approximatives de résistivité électrique atteintes pour une sélection de sols et de roches. Sur le profil tomographique, la couche de loess possède des valeurs de résistivité comprises entre 20 et 60  $\Omega\text{m}$ . Il est intéressant de souligner la présence d'une couche plus résistive entre 2 et 5,5 m de profondeur. La position stratigraphique correspond à celle des loess carbonatés représentés sur la coupe à la Figure 4-14. Une augmentation de la résistivité électrique en lien avec une augmentation de la teneur en carbonate, dans un matériau argileux ou limoneux, a déjà été mise en évidence expérimentalement (Lui *et al.*, 2008 ; Cai *et al.*, 2015). Cependant, une plus faible valeur de la teneur en eau peut également être responsable de cette augmentation de la résistivité électrique. Des analyses complémentaires à l'échelle de l'échantillon sont nécessaires afin d'évaluer les variations de teneur en eau et de teneur en carbonate au sein de la séquence loessique. Ces résultats sont présentés dans les chapitre 5 (étude à l'échelle macroscopique) et chapitre 6 (étude à l'échelle microscopique), respectivement. La calcarénite et la craie sont également clairement identifiables sur base des résultats obtenus. Ces dépôts apparaissent aux alentours de 15 m de profondeur. Les valeurs de résistivité électrique correspondantes valent entre 100 et 200  $\Omega\text{m}$ .

Par contre, les résultats obtenus par tomographie de résistivité électrique ne mettent pas en évidence clairement la présence d'une couche de sable fin de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern à l'interface entre le loess et la calcarénite/craie. En outre, les variabilités spatiales au sein de la séquence loessique, observées sur la paroi, ne sont pas visibles sur les profils de résistivité électrique. Par exemple, la forme de paléovallon, qui caractérise une partie des loess de la base du Pléistocène supérieur, n'est pas identifiable.

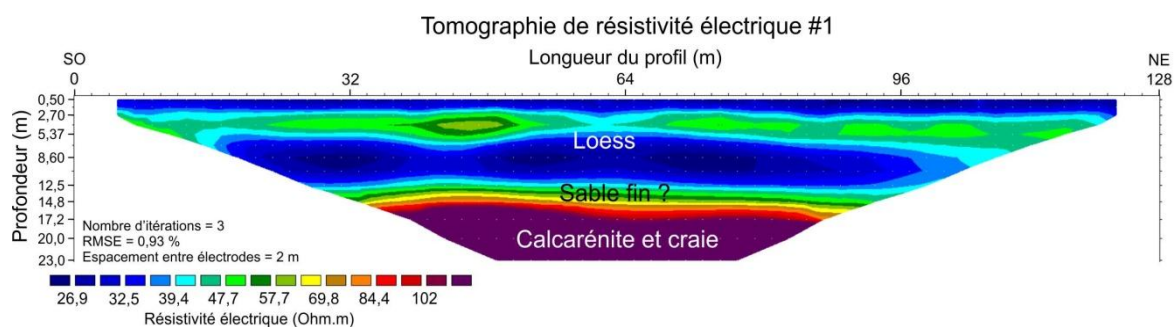


Figure 4-16 : Résultats de la tomographie de résistivité électrique #1 (ERT 1) obtenus sur le site de Romont.

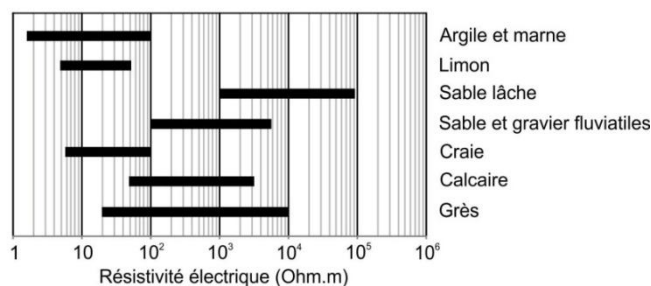


Figure 4-17 : Gamme de valeurs approximatives de la résistivité électrique dans différents milieux géologiques (modifié, d'après Cnudde, 1989).

### 5.3.3. Essai de pénétration statique

L'essai de pénétration statique représente la méthode d'investigation principale réalisée sur le site d'étude de Romont. L'utilisation de différents types de pointe (M1, M2 et électrique), ainsi que la distribution des essais sur le site d'investigation, offrent de nombreuses possibilités d'analyse. L'interprétation des résultats issus des CPT se répartit selon deux axes principaux. Le premier axe abordé dans cette section, se focalise sur l'interprétation des CPT en termes de stratigraphie. Une analyse globale des différentes couches rencontrées est d'abord proposée. Ensuite, l'étude se tourne vers l'identification de marqueurs stratigraphiques au sein de la couche de lœss, de manière comparable à l'analyse réalisée pour le site de Remicourt. Les CPT sont-ils capables de retrouver certains horizons présents au sein de la séquence lœssique ? Cependant, les résultats obtenus ne sont pas comparés, dans cette section, à ceux provenant du site de Remicourt. Cela fait l'objet d'une analyse plus approfondie qui est discutée à la section 7 de ce chapitre. Le second axe développé, concerne une analyse plutôt tournée sur la comparaison des mesures obtenues par les différents types de pointe. En d'autres termes, le choix du type de pointe influence-t-il les valeurs des paramètres mesurés ?

#### Analyse stratigraphique

L'analyse stratigraphique présentée commence par les résultats issus des trois essais réalisés au moyen de la pointe M1. Ils apportent quelques indications sur le contexte stratigraphique des couches recoupées. Le CPT-M1-1 intercepte un niveau de galets (dépôts de terrasse fluviatile) vers 8,5 m de profondeur (Figure 4-18 (a)). Cela se marque par une augmentation brutale de la résistance au cône, atteignant des valeurs élevées de l'ordre de 50 MPa, et par une augmentation accrue de la résistance de frottement latéral total. La traversée de niveaux graveleux se caractérise également par des « craquements » audibles à la surface lors de l'enfoncement de la pointe. Le CPT-M1-2 (Figure 4-18 (b)) rencontre d'abord le limon puis, une couche très résistante ( $q_c > 60$  MPa) correspondant probablement au sommet des calcarénites et craies de la Formation de Maastricht. Une couche de quelques mètres d'épaisseur de sable fin pourrait être présente entre le limon et la Formation de Maastricht. Elle se caractérise par une légère augmentation du  $Q_{st}$  en fonction de la profondeur. La présence de sable se marque également habituellement par une augmentation du  $q_c$ . Or, ce deuxième critère n'est pas rencontré par le CPT-M1-2. C'est pourquoi la couche de sable ne peut être validée sur base des résultats de cet essai. Enfin, le CPT-M1-3 est plus aisé à interpréter (Figure 4-18 (c)). Il met en évidence une couche de limon d'une quinzaine de mètres d'épaisseur, suivie par les dépôts de la Formation de Maastricht.

Ces résultats sont concordants avec l'analyse des tomographies de résistivité électrique qui indique la présence du sommet des calcarénites et craies vers 15 m de profondeur. Les dépôts graveleux interceptés par le CPT-M1-1 ne sont pas situés dans la zone investiguée par les tomographies.

Les neuf essais de pénétration statique réalisés au moyen de la pointe électrique complètent l'analyse pour la couche de limon. En effet, ils n'ont pas atteint une profondeur supérieure à 16 m et ne permettent donc pas de localiser précisément le sommet des calcarénites et des craies. En ce qui concerne la présence d'une éventuelle couche de dépôts marins sous le limon éolien, une analyse plus poussée sera menée dans le chapitre 5. Cette étude sera réalisée au travers des diagrammes de classification des sols issus des données du CPT, parallèlement aux courbes granulométriques obtenues en laboratoire, et à l'utilisation de la classification internationale des sols (USCS, ASTM D2487-06, 2006).

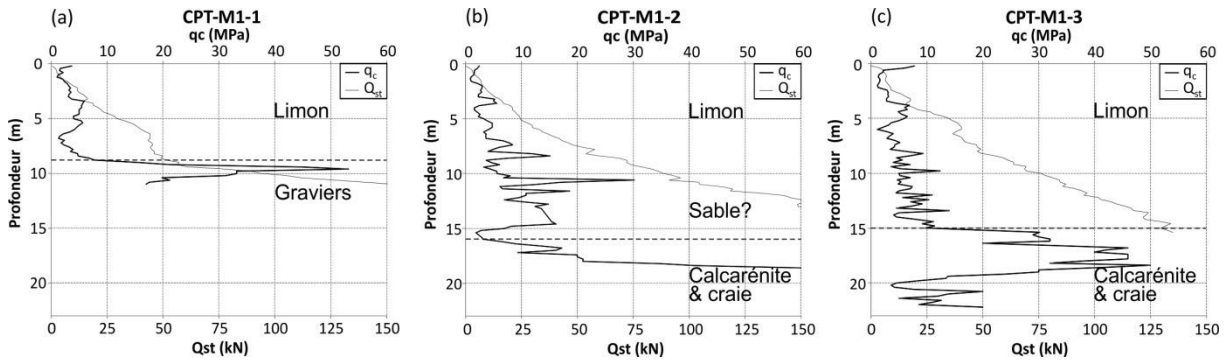


Figure 4-18 : Évolution de la résistance au cône ( $q_c$ ) et de la résistance au frottement latéral total ( $Q_{st}$ ) en fonction de la profondeur, pour la pointe de type M1 utilisée sur le site de Romont. (a) CPT-M1-1. (b) CPT-M1-2. (c) CPT-M1-3.

La figure suivante montre les courbes moyennes du  $q_c$  (Figure 4-19 (a)) et du  $f_s$  (Figure 4-19 (b)), ainsi qu'une indication de leur dispersion au moyen de l'écart-type. La dispersion est très faible jusqu'à 3,5 m de profondeur. Cette observation indique des caractéristiques mécaniques latéralement peu variables, du moins en termes de  $q_c$  et de  $f_s$ . En-dessous, la dispersion augmente considérablement. Ces résultats peuvent être comparés au levé géologique du front de taille (Figure 4-14). Ce dernier indique en effet une très faible variabilité latérale des horizons supérieurs, jusqu'aux alentours de l'Horizon à Langues de Nagelbeek. Sous cet horizon, la paroi laisse affleurer des horizons lenticulaires (comme les complexes stratifiés supérieur et inférieur, par exemple), ainsi que des surfaces de discordance.

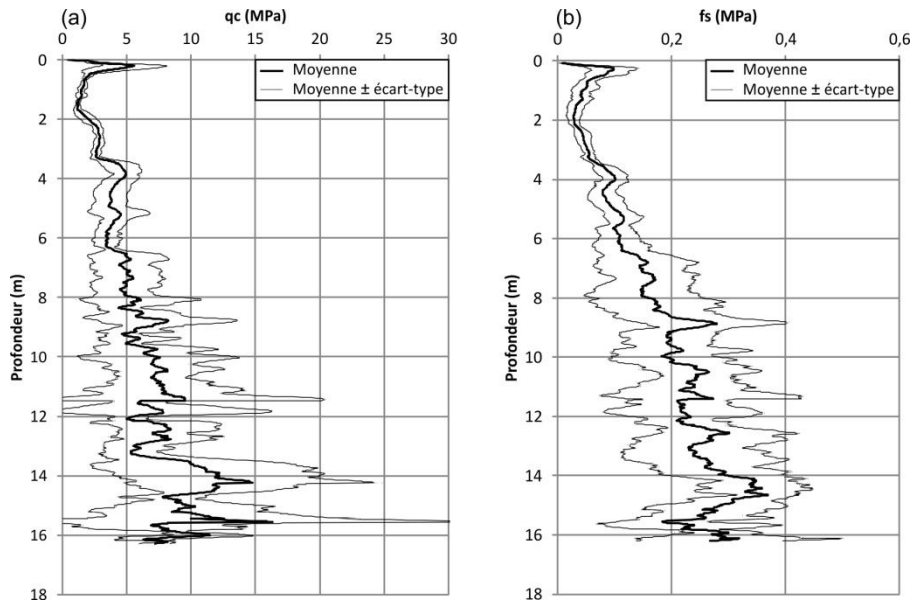


Figure 4-19 : Intégration de l'ensemble des CPT réalisés au moyen d'une pointe électrique sur le site de Romont. (a) Évolution de la résistance au cône ( $q_c$ ) avec la profondeur. (b) Évolution du frottement latéral local ( $f_s$ ) en fonction de la profondeur.

L'essai de pénétration est toujours considéré comme parfaitement vertical. Or, cela n'est en réalité jamais le cas, ce qui peut mener à une interprétation stratigraphique erronée. La pointe électrique utilisée sur le site de Romont est équipée d'un inclinomètre permettant de mesurer l'inclinaison de la pointe au cours de son enfoncement. À titre indicatif, la Figure 4-20 représente cette donnée pour les neuf essais réalisés avec la pointe électrique. Une inclinaison limite de  $15^\circ$  a été fixée pour la réalisation des essais, comme le précise la norme

relative au CPT muni d'une pointe électrique (ASTM D5778-12, 2012). Si cette valeur est dépassée, l'essai est arrêté. Seul un essai a été interrompu par cette condition (CPTE-05). Les autres ont été arrêtés lorsque la force maximale d'enfoncement autorisée par la pointe, à savoir 100 kN, a été atteinte. À 10 m de profondeur, l'inclinaison moyenne atteint une valeur de 6°. Ceci engendre, pour une déviation constante de 6° depuis la surface, un biais de 5 cm sur la valeur réelle de la profondeur, soit une erreur de 0,5 % sur la profondeur. De la même manière, à 14 m, l'inclinaison moyenne atteinte vaut 10°. Elle engendre un décalage de 20 cm à cette profondeur, soit une erreur de 1,4 % sur la profondeur. L'inclinaison progressive de la pointe en cours d'essai n'a donc que peu d'influence sur la valeur réelle de la profondeur atteinte, au regard des applications mentionnées dans ce travail. En outre, les valeurs de profondeurs considérées dans l'analyse des résultats issus des pointes électriques, correspondent à des valeurs réelles qui tiennent compte de la déviation de la pointe.

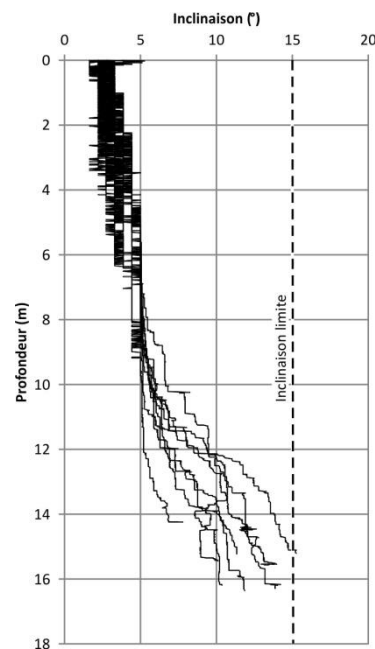


Figure 4-20 : Évolution de l'inclinaison de la pointe électrique au cours de son enfoncement, pour les CPT réalisés sur le site de Romont.

L'analyse qui suit s'intéresse maintenant à l'identification d'horizons au sein de la couche lœssique. Une série d'essais de pénétration statique a été réalisée parallèlement au front de taille. Il est dès lors possible d'établir une coupe interprétative à partir des résultats obtenus par ces CPT et de les comparer à la description géologique du front de taille. Les CPT ont été réalisés à une quinzaine de mètres en arrière de la paroi, et sont espacés de 10 m. Leur localisation précise est illustrée à la Figure 4-13. D'une manière générale, la résistance au cône caractérisant la séquence lœssique se situe majoritairement dans une gamme de valeurs entre 0,5 et 5 MPa. Sur base de l'analyse du  $q_c$ , quatre marqueurs stratigraphiques peuvent être défini (Figure 4-21 (a) ; annotés MS1 à 4 (Rm)). Depuis la surface, les MS1 (Rm) et MS2 (Rm) sont disposés parallèlement à la surface topographique. Ils sont tous les deux caractérisés par une légère augmentation du  $q_c$ , de l'ordre de 1 à 3 MPa. Le MS1 (Rm) occupe une position stratigraphique comparable à celle correspondant à la limite de décarbonatation des lœss superficiels, vers 2 m de profondeur. Le MS2 (Rm) pourrait être corrélé avec la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek (HLN), aux alentours de 3 à 3,5 m de profondeur. Il soulignerait ainsi la transition entre les lœss brabantiens et les lœss hesbayens. Ces derniers seraient plus résistants à la pénétration que les lœss brabantiens. Le troisième marqueur stratigraphique (MS3 (Rm)) est caractérisé par de relativement faibles valeurs du  $q_c$ , de 1 à

2 MPa, responsables d'un minimum local de la courbe d'évolution du  $q_c$  en fonction de la profondeur. Le marqueur stratigraphique souligne la morphologie d'une paléovallée. Sa position stratigraphique correspond à celle du Complexe Humifère de Remicourt (CHR). Le MS3 (Rm) est directement suivi par une rapide augmentation du  $q_c$ , atteignant un maximum pour l'entièreté de la séquence lœssique. Ce marqueur (MS4 (Rm)) est aisément identifiable. La résistance au cône y atteint des valeurs supérieures à 10 MPa, parfois même supérieure à 20 MPa. De telles valeurs de  $q_c$  sont particulièrement élevées dans un matériau limoneux. Le MS4 (Rm) est relativement parallèle au marqueur stratigraphique précédent, et décrit une morphologie de paléovallée. Sa position stratigraphique se corrèle avec celle du sommet du Pédocomplexe de Rocourt (PR).

Une analyse similaire peut également être réalisée à partir du rapport de frottement ( $R_f$ ) (équation 2-5). Les quatre marqueurs stratigraphiques décrits ci-dessus se retrouvent également sur les graphiques exprimant le  $R_f$  en fonction de la profondeur (Figure 4-21 (b)), mais de façon moins visible qu'avec le  $q_c$ . Le MS1 (Rm) est clairement identifiable par une diminution rapide du  $R_f$ . Le MS2 (Rm) est moins marqué. Il se caractérise par une légère augmentation du  $R_f$ , formant un maximum local sur la courbe. Le MS3 (Rm) se marque par des valeurs de  $R_f$  formant un maximum local sur la courbe, et souvent bordés en haut et en bas par deux minima locaux. Le minimum local situé sous le MS3 (Rm) correspond au MS4 (Rm).

L'analyse du  $q_c$  et du  $R_f$  montre par ailleurs que les horizons illustrant le paléovallon à la base de la séquence weichselienne ne sont plus observables sur les graphiques des CPTM2-4 et CPTe-01 situés au SO de la coupe. L'HLN semble, par contre, continu sur l'ensemble des essais réalisés. Il en résulte l'existence d'une surface de discordance à proximité de l'HLN. Cette discordance a déjà été soulignée précédemment à la suite de la description du front de taille.



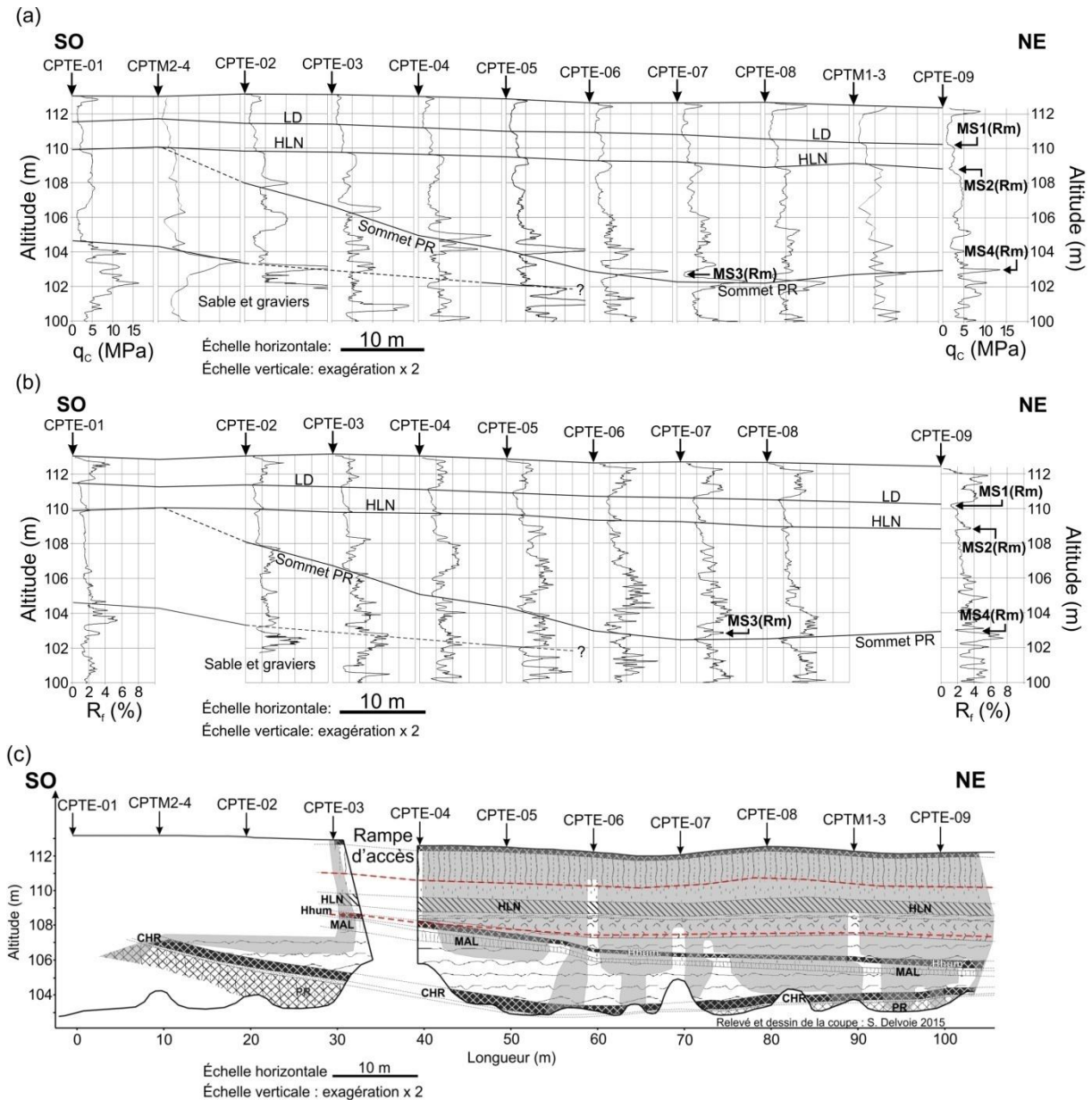


Figure 4-21 : Définition des marqueurs stratigraphiques au sein de la séquence lœssique, sur base des résultats des essais de pénétration statique (résistance au cône ( $q_c$ ) et rapport de frottement ( $R_f$ )) réalisés sur le site de Romont. (a) Interprétation stratigraphique sur base du  $q_c$ . (b) Interprétation stratigraphique sur base du  $R_f$ . (c) Description géologique du front de taille. La légende des symboles utilisés est mentionnée à la Figure 4-14. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Hhum = horizon humifère ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; MS = marqueur stratigraphique.

Dans l'objectif de rendre encore plus visible les marqueurs stratigraphiques définis au moyen de la résistance au cône, le paramètre  $q_c^*$  a été introduit. Il se calcule comme suit :

$$q_c^*(z) = q_c(z) - \bar{q}_c(z) \quad (4-1)$$

où :

- $q_c(z)$  = la résistance au cône à une profondeur  $z$ , exprimée en MPa, et
- $\bar{q}_c(z)$  = la résistance au cône à une profondeur  $z$ , calculée à partir d'une tendance moyenne, exprimée en MPa.

La résistance au cône ainsi modifiée, permet de faire ressortir les minima et les maxima locaux qui s'écartent de la tendance moyenne. La résistance au cône moyenne ( $\bar{q}_c$ ) est calculée indépendamment pour chaque CPT, par régression linéaire de la résistance au cône en fonction de la profondeur (Figure 4-22). La régression est définie pour les huit premiers mètres investigués afin de la limiter à la couche limoneuse. Au-delà de cette profondeur, certains essais de pénétration statique ont rencontrés une couche de galets provenant de dépôts de terrasses fluviales (CPTE-01 et CPTM1-1).

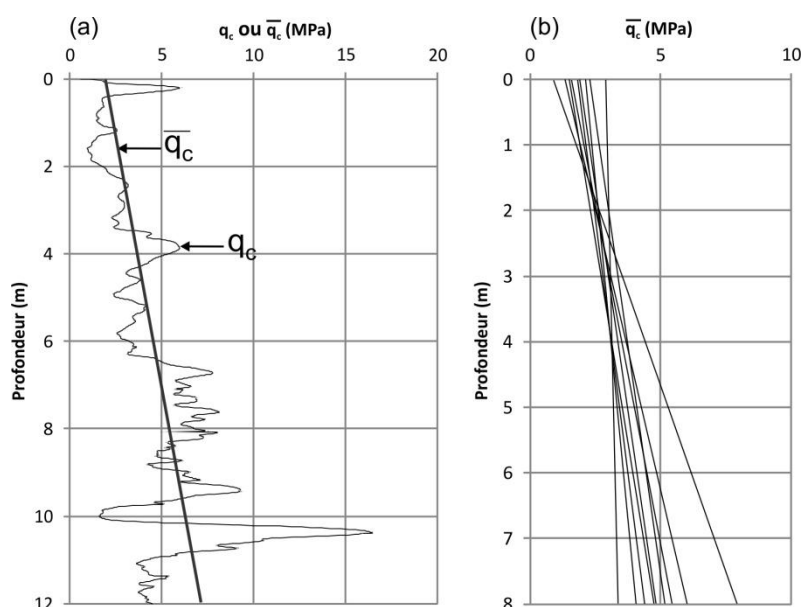


Figure 4-22 : Tendance moyenne de l'évolution de la résistance au cône ( $\bar{q}_c$ ) en fonction de la profondeur, limitée à la couche de limon. (a) Résistance au cône mesurée et tendance moyenne calculée pour le CPTe-07. (b) Tendances moyennes calculées pour les CPT réalisés au moyen de la pointe électrique.

La Figure 4-23 illustre les résultats obtenus à la suite du calcul du  $q_c^*$  pour les essais réalisés avec la pointe électrique. Les marqueurs stratigraphiques définis précédemment sont bien mis en évidence. Parmi ceux-ci, les MS3 (Rm) et MS4 (Rm) sortent particulièrement de la tendance. Le premier correspond souvent à un minimum pour l'ensemble des valeurs de résistance au cône calculée dans la couche loessique. Le second correspond systématiquement au maximum de valeurs de  $q_c^*$  calculées.

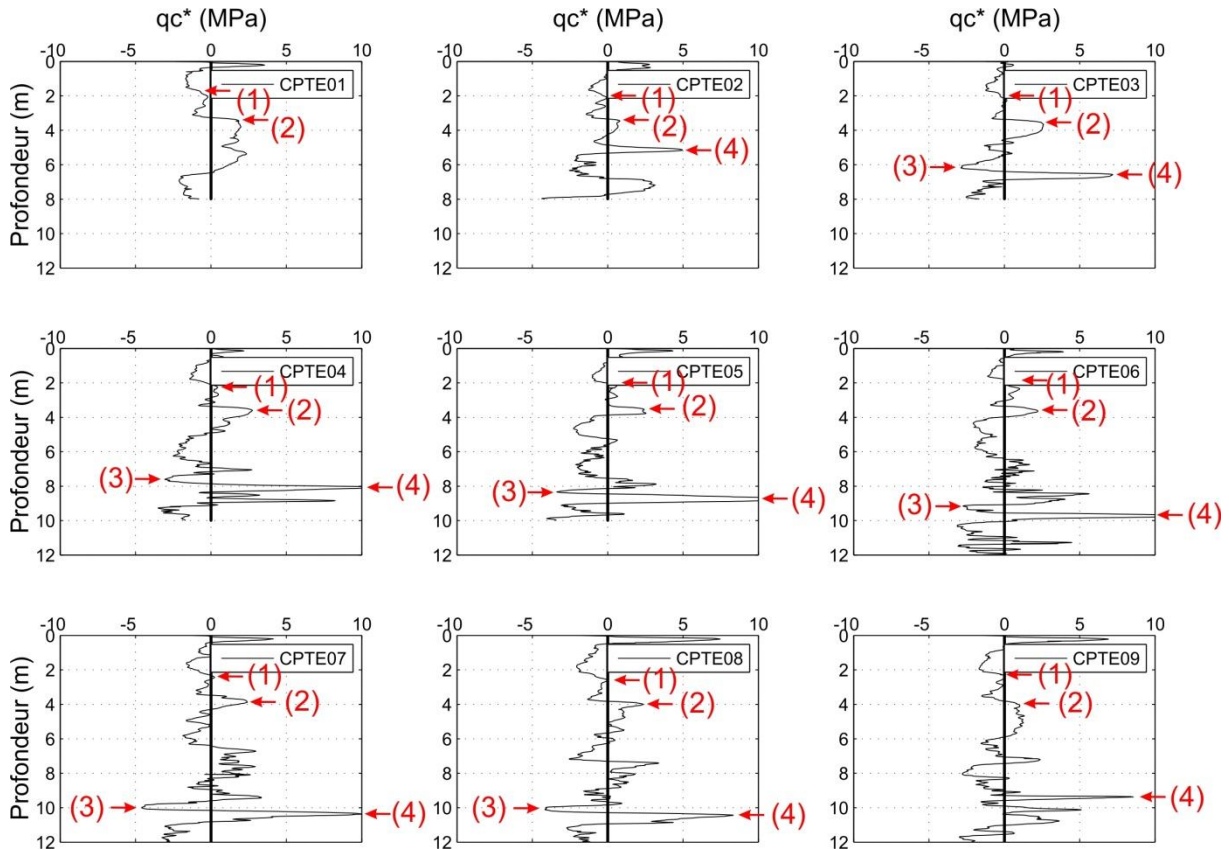


Figure 4-23 : Mise en évidence des marqueurs stratigraphiques définis pour le site de Romont, par le calcul du  $q_c^*$ . Les chiffres entre parenthèses désignent les marqueurs stratigraphiques définis précédemment (MS1 à 4 (Rm)).

L'analyse conjuguée du levé géologique du front de taille et des résultats de la campagne géotechnique permet également de préciser la géométrie du paléovallon présent au sommet du Pédocomplexe de Rocourt (correspondant au MS4 (Rm)). Ce paléovallon possède un axe orienté N-S et l'écoulement se dirige en direction du Nord (Figure 4-24). Ce résultat concorde avec la description morphologique de la topographie présente au droit de la carrière de Romont au moment du dépôt des lœss weichseliens. En effet, É. Juvigné (1992) renseigne l'existence d'une importante butte résiduelle de sable marin oligocène dans la moitié sud de la carrière, connue sous le nom de « colline du Romont ». Cette colline résulte de l'évolution du réseau hydrographique, dont les traces sont conservées sous forme de terrasses fluviales (Juvigné, 1992 ; Juvigné *et al.*, 2008 ; Willems *et al.*, 2010). La présence de ce relief engendre une pente topographique orientée globalement du Sud vers le Nord à l'emplacement de la coupe étudiée. Cette surface a ensuite été recouverte par le limon éolien. La butte sableuse a aujourd'hui pratiquement totalement disparu par l'exploitation de la carrière.

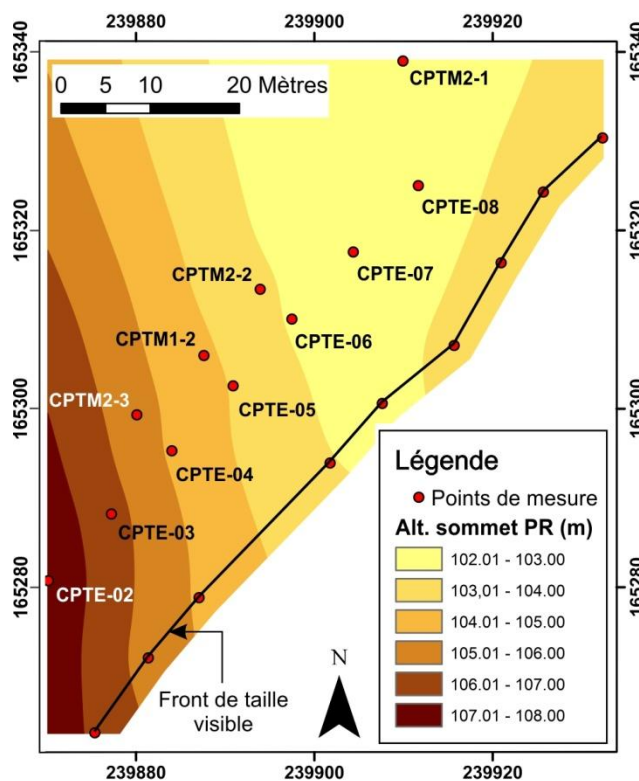


Figure 4-24 : Altitude de la surface correspondant au sommet du Pédocomplexe de Rocourt (PR) pour le site de Romont. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72.

#### Analyse de l'influence du type de pointe

De nombreuses études ont mis en évidence des valeurs de résistance au cône différentes, influencées par le type de pointe, mécanique ou électrique. Ces différences sont essentiellement issues de la géométrie propre à chaque type de pointe (présence d'un manchon de frottement en arrière du cône, diamètre de la partie située directement derrière le cône), et du frottement agissant entre les tiges intérieures et les tubes extérieurs, rencontrés pour les pointes mécaniques (Rol, 1982). Chacun de ces effets possède une influence variable en fonction du type de sol recoupé par la pointe. Une étude réalisée sur différents sites investigués en Belgique, conclut que le rapport entre les valeurs de  $q_c$  obtenues au moyen d'une pointe mécanique (M1 et M2) et une pointe électrique, est légèrement inférieur à l'unité dans le sable (0,90 à 0,97) (Whenham *et al.*, 2004). Une tendance claire apparaît également dans l'argile, où les pointes mécaniques (M1 et M2) obtiennent des valeurs de la résistance au cône de l'ordre de 30 % plus importante qu'avec une pointe électrique (Figure 4-25 ; Mengé, 2001 ; Huybrechts *et al.*, 2002). En présence de matériaux limoneux, la résistance au cône ne semble pas être influencée par le type de pointe. Ces résultats sont à l'origine des valeurs qui caractérisent le facteur  $\omega$  (Tableau 2-7, chapitre 2), utilisé dans les directives belges à l'application de l'Eurocode 7 (CSTC, 2016). Ces dernières encadrent le dimensionnement de pieux en Belgique, à partir de données issues du CPT. Par ailleurs, Kulhawy et Mayne (1990) proposèrent la relation suivante (éq. 4-2) qui lie la résistance au cône mesurée par une pointe mécanique (M) et par une pointe électrique (E), et ce quelque soit le type de sol. Cette relation est établie à partir de résultats issus de pointes mécaniques M1 et M2.

$$\left(\frac{q_c}{p_a}\right)_E = 0,47 \left(\frac{q_c}{p_a}\right)_M^{1,19} \quad (4-2)$$

où :

- $q_c$  = la résistance au cône, exprimée en MPa, et
- $p_a$  = la pression atmosphérique, exprimée en MPa.

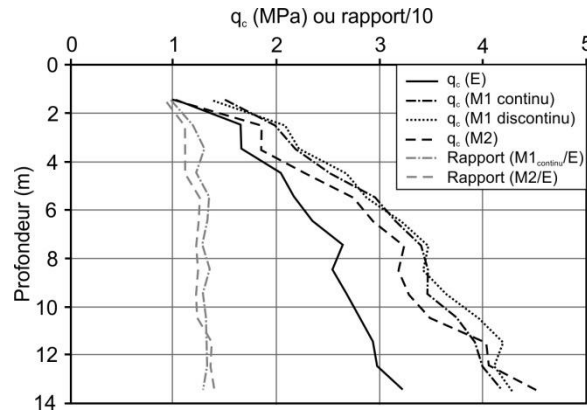


Figure 4-25 : Valeurs moyennes de la résistance au cône ( $q_c$ ) pour différents types de pointes, et du rapport entre les pointes mécanique et électrique. Les résultats ont été obtenus dans l'argile de Boom, sur le site d'investigation de Wavre-Sainte-Catherine, situé entre Bruxelles et Anvers (modifié, d'après Huybrechts et al., 2002).

Le lœss est un matériau limoneux très bien granoclassé, qui comporte généralement entre 50 et 70 % (en poids) de particules comprises entre 10 et 50  $\mu\text{m}$  (Pécsi, 1990). Le caractère limoneux du matériau étudié sera affiné dans le chapitre 5, au moyen de la classification internationale des sols (USCS ; ASTM D2487-06, 2006). Pour ce type de matériau, les valeurs de  $q_c$  mesurées avec une pointe mécanique ou électrique, sont habituellement similaires. En outre, aucune différence n'a été mise en évidence entre les valeurs de  $q_c$  obtenues par une pointe mécanique de type M1 et celles issues d'une pointe de type M2 (Kulhawy & Mayne, 1990 ; Whenham *et al.*, 2004). Les résultats obtenus sur le site de Romont sont en accord avec les études précédentes. La Figure 4-26 (a) représente, pour chaque profondeur, les corrélations entre les  $q_c$  de deux types de pointes (M1 vs E, et M2 vs E). Les valeurs exprimées sont les valeurs moyennes qui englobent l'ensemble des résultats obtenus avec un même type de pointe, pour une profondeur donnée. Les données représentées se rapportent aux huit premiers mètres superficiels. Les points de mesures sont peu dispersés sur le graphique log-log. Ils sont néanmoins distribués aux alentours immédiats de la tendance proposée par Kulhawy et Mayne (1990). Cette dernière a été établie à partir de valeurs de  $q_c$  réparties entre 0,5 et 30 MPa, alors que les mesures réalisées à Romont se distribuent entre 1 et 6 MPa. La Figure 4-26 (b) indique, au moyen des droites de régression linéaire, qu'il y a pratiquement une équivalence du  $q_c$  obtenu avec les pointes mécaniques et la pointe électrique. L'équivalence est également vérifiée entre les pointes mécaniques (M1 et M2) (Figure 4-26 (c)).

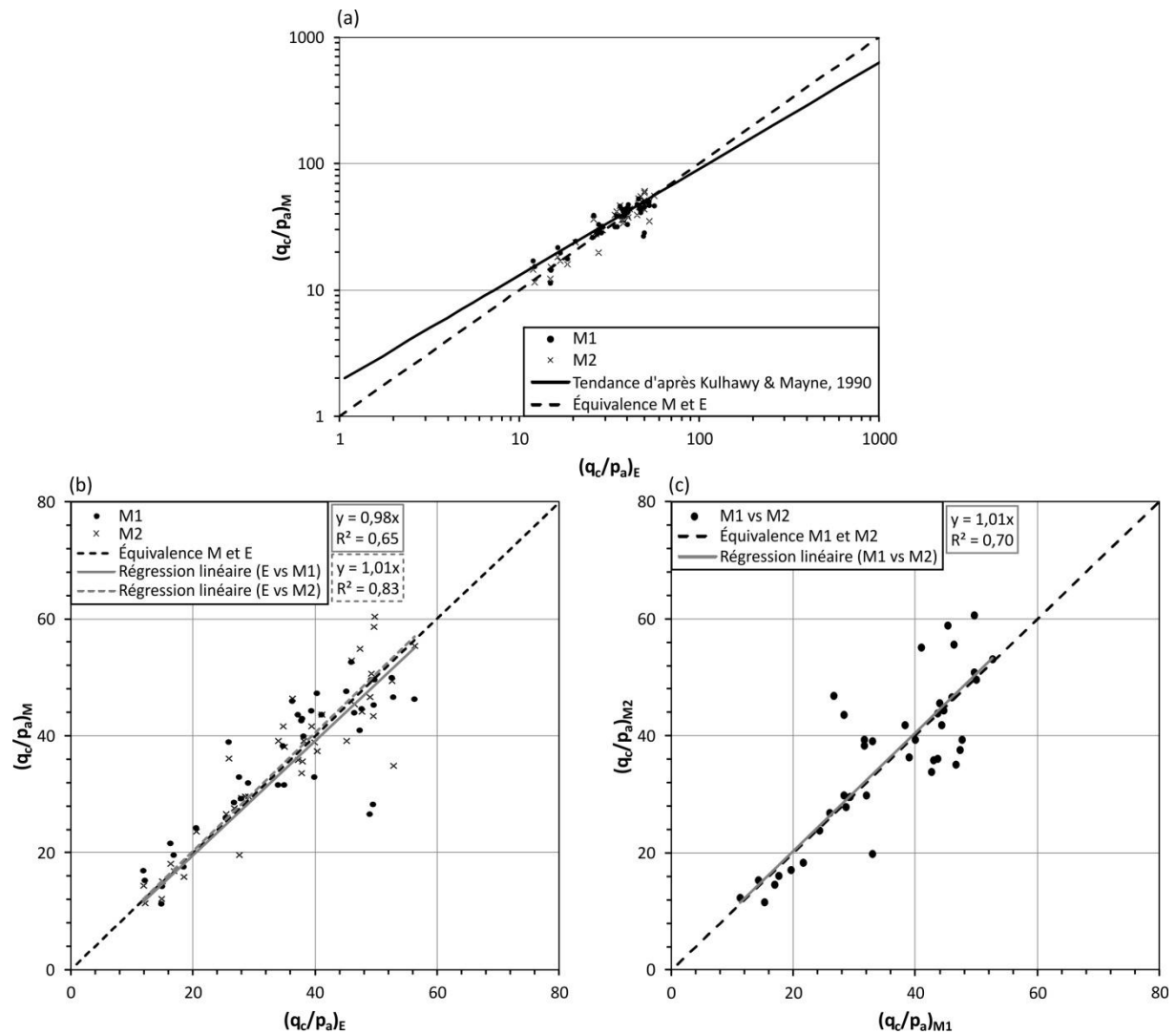


Figure 4-26 : Corrélation entre les valeurs de résistance au cône ( $q_c$ ) obtenues avec une pointe mécanique (M1 ou M2) et celles issues d'une pointe électrique (E), pour le site de Romont. (a) Comparaison avec la tendance de Kulhawy et Mayne (1990). (b) Comparaison entre les corrélations M1 vs E et M2 vs E. (c) Comparaison entre les pointes mécaniques (M1 et M2).

Une autre manière d'apprécier une éventuelle influence du type de cône sur la mesure du  $q_c$  est proposée à la Figure 4-27. Cette dernière exprime les courbes de  $q_c$  moyen obtenues pour les trois types de cône utilisés sur le site de Romont. Les courbes suivent une tendance similaire, et se superposent relativement bien, et ce malgré les variabilités latérales observées au sein de la couche de loëss.

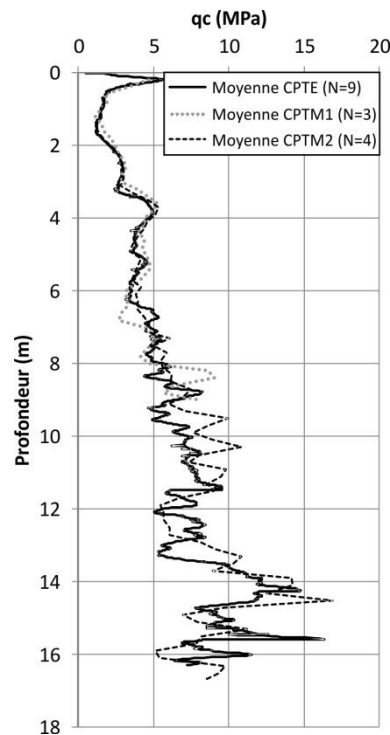


Figure 4-27 : Comparaison de la résistance au cône ( $q_c$ ) moyenne obtenue pour chacun des types de pointe utilisés (M1, M2 et E) sur le site de Romont. Le nombre d'essais ( $N$ ) pris en compte dans la moyenne est mentionné dans la légende du graphique.

L'analyse de la résistance du frottement latéral local ( $f_s$ ) est plus complexe et nettement moins documentée dans la littérature scientifique. L'étude réalisée par Kulhawy et Mayne (1990), a montré que le cône mécanique de type M2 fournit des valeurs de  $f_s$  plus élevées que celles mesurées avec une pointe électrique. Dans le sable, le rapport est de l'ordre de 2, et dans l'argile, ce même rapport varie habituellement entre 2,5 et 3,5. Ces valeurs relatives à l'argile ont également été confirmées par des mesures réalisées dans les argiles tertiaires de Belgique (Figure 4-28 (a) ; Mengé, 2001 ; Huybrechts *et al.*, 2002). Les résultats obtenus à Romont indiquent un rapport situé entre 1 et 2,6 dans la partie supérieure de la couche limoneuse (Figure 4-28 (b)), en bon accord avec les résultats mentionnés dans la littérature. Ce rapport décroît ensuite rapidement sous l'unité au-delà de 9 m de profondeur, en lien avec les (très) faibles valeurs de  $f_s$  enregistrées à partir de cette profondeur, par la pointe mécanique. Cette deuxième partie de la courbe est assez surprenante car elle va à l'encontre des résultats obtenus par d'autres études. De telles valeurs de frottement latéral local, parfois proches de 0 MPa, sont très surprenantes dans le contexte géologique qui caractérise le site de Romont, à savoir des limons et éventuellement des sables fins de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern. Pour comprendre ce qui pourrait être à l'origine de ces observations, il faut se rappeler la façon dont se mesure le frottement latéral local au moyen d'une pointe M2. Ce dernier est obtenu au terme d'un déplacement du manchon de frottement sur une distance maximale de 3,5 cm. Ce déplacement est mesuré à la surface et suppose donc que l'ensemble du train de tiges, servant à enfoncer le manchon, se déplace uniformément sans se déformer. Or, plus l'essai est profond, plus la longueur du train de tiges est grande, et, habituellement, plus la résistance du matériau est également importante. Dans ces conditions, il est tout à fait envisageable que le train de tiges se déplace par rapport à son axe. Si cela se produit, c'est cette déformation qui est d'abord mesurée en surface, alors que le manchon ne s'est pas encore déplacé. Son déplacement se produit finalement mais en bout de course, ce qui pourrait avoir comme conséquence de ne pas mobiliser l'entièreté de la résistance au



frottement le long du manchon. C'est l'hypothèse la plus pertinente qui est proposée pour expliquer les faibles valeurs du frottement latéral local au-delà de 9 m de profondeur. Pour cette raison, les résultats des essais réalisés au moyen de la pointe M2, et incluant la mesure du frottement latéral local, ne sont pas exploités dans la suite de ce travail.

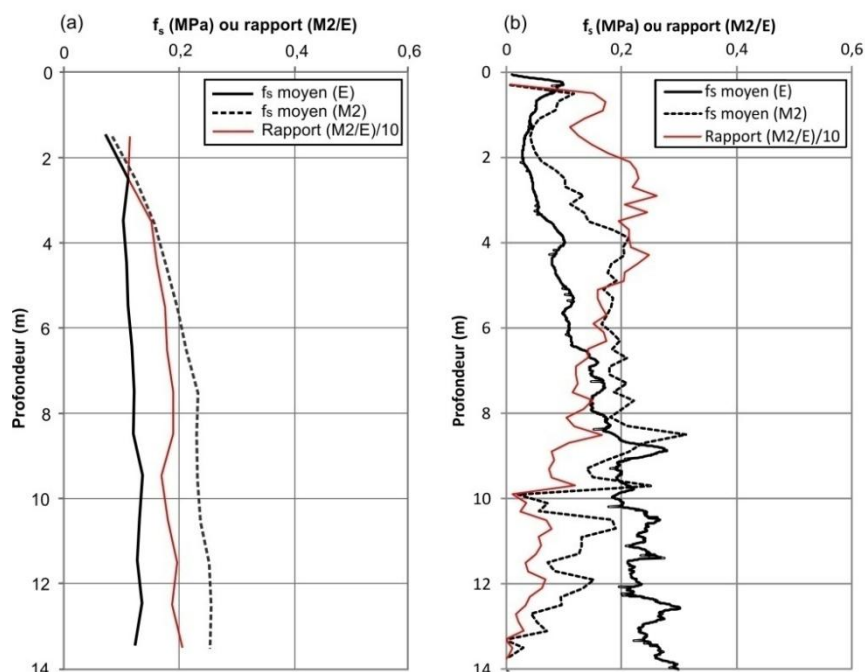


Figure 4-28 : Comparaison des valeurs du frottement latéral local ( $f_s$ ) obtenues par une pointe mécanique de type M2 et une pointe électrique (E). (a) Résultats obtenus dans l'argile de Boom provenant du site d'investigation de Wavre-Sainte-Catherine, situé entre Bruxelles et Anvers (modifié, d'après Huybrechts et al., 2002). (b) Résultats obtenus dans du limon éolien provenant du site d'investigation de Romont.

#### 5.3.4. Pénétromètre de poche

Dans le but de valider la position stratigraphique des marqueurs stratigraphiques définis sur base des résultats issus des CPT, des mesures de résistance ont été réalisées sur la paroi visible au moyen d'un pénétromètre de poche. Au total, 1285 points ont été sondés au moyen du pénétromètre de poche, provenant de huit sections complémentaires permettant d'investiguer l'ensemble de la stratigraphie de la séquence lœssique. Une compilation des résultats acquis au moyen d'une configuration horizontale du pénétromètre, est proposée à la Figure 4-29 (b). Les mesures ont été réalisées avec un intervalle d'un maximum de 10 cm selon un axe vertical. Les points de mesure représentés sur le graphique correspondent à la valeur moyenne obtenue pour l'ensemble des mesures réalisées au sein d'une même unité stratigraphique, définie dans l'annexe 1. Ce point est localisé à la profondeur correspondant à la moitié de l'épaisseur de l'unité. L'écart-type sur ces valeurs est également représenté afin d'illustrer la variabilité de la résistance à la pénétration. Les unités stratigraphiques ainsi sondées sont mentionnées sur le graphique. La colonne pédo- et lithostratigraphique de la Figure 4-29 (a) reprend également, de manière plus synthétique, la position stratigraphique des points de mesures du pénétromètre de poche. Ces données sont ensuite comparées aux valeurs de résistance au cône issues du CPT-05 (Figure 4-29 (c)), qui occupe une position centrale par rapport à l'ensemble des points de mesure réalisés sur la paroi de Romont. Les résultats obtenus au moyen du pénétromètre de poche confirment avec précision la position stratigraphique des marqueurs stratigraphiques définis sur base de l'analyse des CPT. Le



marqueur stratigraphique le plus remarquable correspond à la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt (CHR) et le sommet du Pédocomplexe de Rocourt (PR). Le niveau présentant des résistances à la pénétration très élevées est représenté par l'Horizon blanchi de Momalle (HBM). Une légère augmentation de la résistance à la pénétration est observée lors du passage dans les lœss carbonatés. Une augmentation de la résistance du lœss, en lien avec une augmentation de la teneur en carbonate, a déjà été mise en évidence à partir de mesures avec un pénétromètre de poche (Amorosi *et al.*, 2015). Le Sol de Malplaquet (MAL) se marque également dans la courbe issue du pénétromètre de poche, par des valeurs plus élevées que les horizons environnants. Cette tendance n'a pas pu être mise en évidence sur base du  $q_c$ .

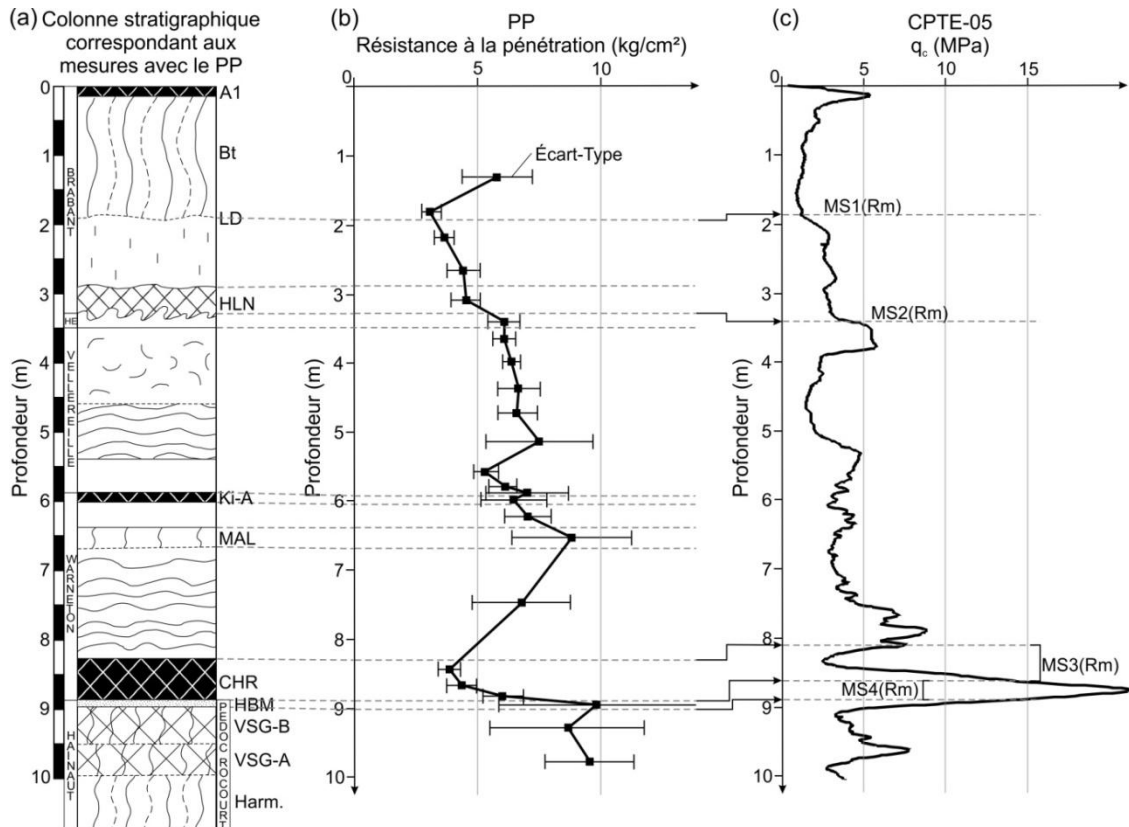


Figure 4-29 : Correlations stratigraphiques entre les résultats obtenus au moyen du pénétromètre de poche (PP) et les valeurs de la résistance au cône ( $q_c$ ) issues du CPT, pour le site de Romont. (a) Colonne pédo- et lithostratigraphique correspondant aux horizons recoupés par le pénétromètre de poche. (b) Résultats des mesures obtenues au moyen du pénétromètre de poche, selon la configuration horizontale. (c) Évolution de la résistance au cône en fonction de la profondeur pour le CPT-05, avec indication des marqueurs stratigraphiques (MS) définis. La légende des symboles utilisés dans la colonne stratigraphique est illustrée à la Figure 4-14. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Harm = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HE = lœss hesbayens ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; Ki-A = Kincamp-A ; LD = limite de décarbonatation ; Rm = Romont ; VSG-A et B = Sols de Villers-Saint-Ghislain-A et B.

Dans l'objectif de déceler une éventuelle anisotropie du matériau, affectant les mesures de résistance à l'enfoncement, le pénétromètre a été positionné selon deux configurations. L'une consiste à sonder le limon horizontalement, en investiguant au travers d'une face verticale. Il s'agit de la configuration horizontale. L'autre disposition (configuration verticale) se rapproche de celle d'un essai de pénétration statique, puisque le pénétromètre de poche est

alors enfoncé du haut vers le bas, au travers d'une paroi horizontale. Cette dernière est réalisée manuellement et doit être recréée à chaque profondeur investiguée. La double configuration du pénétromètre de poche a été réalisée sur trois sections de la paroi de Romont. Les résultats des investigations sont présentés à la Figure 4-30. D'une manière générale, les valeurs obtenues au moyen de la configuration horizontale sont légèrement plus élevées que dans le cas d'une configuration verticale. Le rapport entre les valeurs de résistance obtenues par les deux configurations, fluctue entre 1,1 et 1,2 (Tableau 4-3). R. Matalucci (1969) a constaté sur des loëss du Mississippi, la présence d'une anisotropie dans l'orientation des grains. Ces derniers sont préférentiellement orientés selon la stratification. L'auteur réalisa des essais de cisaillement direct qui montrèrent que la résistance au cisaillement (valeur à la rupture) est légèrement plus importante, d'environ 10 %, lorsque le plan de cisaillement est positionné perpendiculairement à la stratification. Il est toutefois difficile d'attribuer la différence de résistance, mesurée au moyen du pénétromètre de poche, à l'anisotropie seule. En effet, les valeurs obtenues peuvent présenter une grande variabilité, en relation avec l'hétérogénéité du matériau et la reproductibilité de la méthode. Ces trois paramètres (anisotropie, hétérogénéité et reproductibilité) influencent certainement les mesures. Mais, sur base des investigations menées sur la paroi de Romont au moyen du pénétromètre de poche, il n'est pas possible de connaître l'importance de l'influence relative de chacun de ces trois paramètres sur les différences observées entre les deux types de configuration.

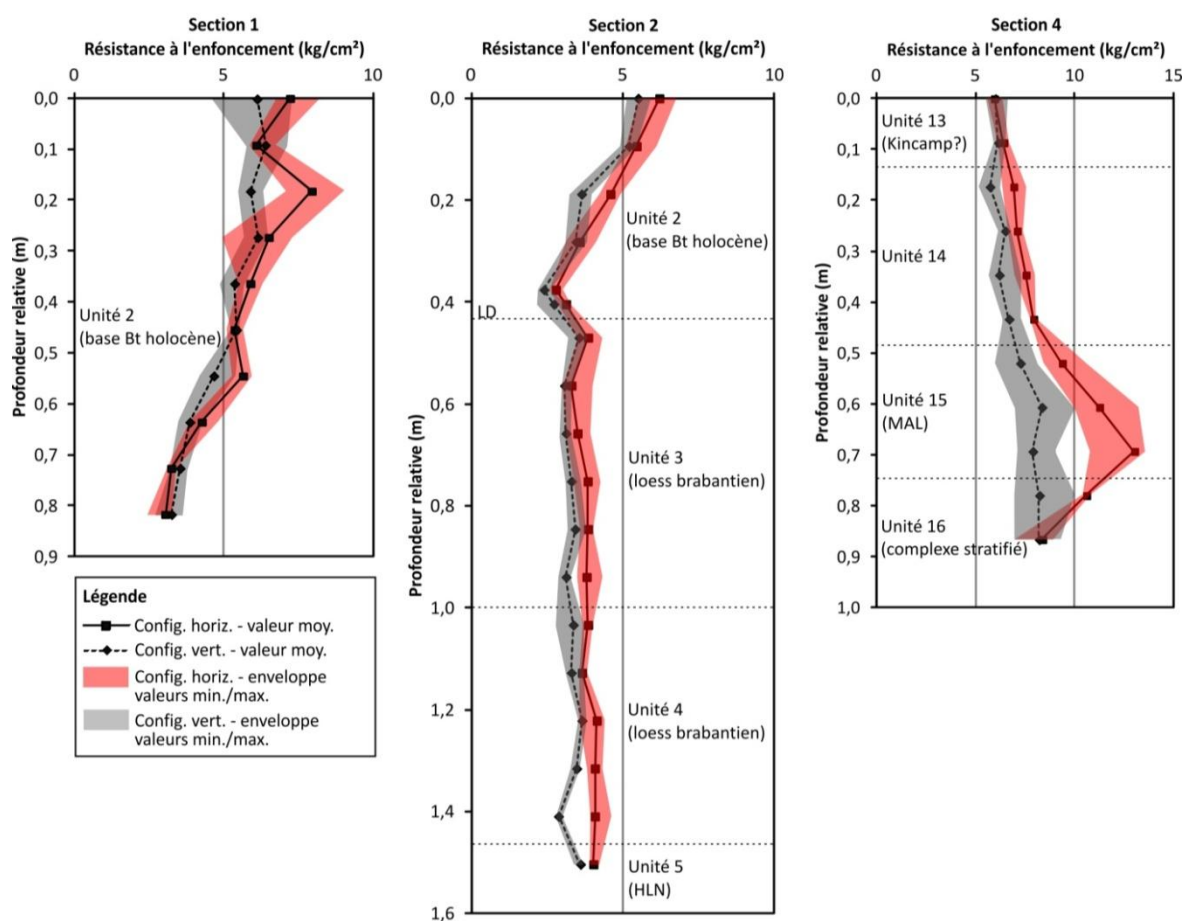


Figure 4-30 : Valeurs de résistance à la pénétration obtenues à la suite des mesures avec le pénétromètre de poche, sur trois sections différentes de la paroi de Romont. Les résultats ont été obtenus selon deux configurations différentes du pénétromètre (horizontale ou verticale). Les unités stratigraphiques investiguées sont également mentionnées (pour la description lithologique, voir l'annexe 1). Abréviations : HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet.

Tableau 4-3 : Valeurs moyennes de la résistance à la pénétration obtenues sur les différentes sections investiguées à Romont, selon une configuration horizontale (H) ou verticale (V) du pénétromètre de poche.

Section	Résistance à la pénétration moyenne (kg/cm <sup>2</sup> )		Rapport H/V
	Config. horiz. (H)	Config. vert. (V)	
Section 1	5,53	5,08	1,09
Section 2	3,98	3,49	1,14
Section 4	8,57	6,99	1,23

### 5.3.5. Forage

Trois forages carottés ont été réalisés sur le site de Romont, interdistants de 30 m, et positionnés au droit de l'ERT 2 (Figure 4-13). Ils ont été effectués dans l'objectif de prélever une série d'échantillons non remaniés afin d'en étudier les propriétés physiques et mécaniques en laboratoire. Cette analyse fait l'objet des chapitre 5 et chapitre 6. Les échantillons ont ainsi été prélevés dans des gaines transparentes en PVC d'une cinquantaine de centimètres de longueur. Un total de 73 échantillons a été collecté. Environ un tiers d'entre eux (21 échantillons) ont été analysés en laboratoire. Il a été choisi de conserver les échantillons restants pour des investigations futures pouvant servir à des fins pédagogiques, par exemple dans le cadre de travaux de fin d'étude d'étudiants ou de travaux pratiques.

Les échantillons analysés en laboratoire ont été décrits et positionnés au sein de la stratigraphie de la séquence lœssique. Ceux qui n'ont pas été investigués ont été préservés dans leur gaine en PVC. Cependant, malgré la transparence de cette dernière, il n'est guère aisé de distinguer les horizons les uns des autres et de les positionner dans leur contexte stratigraphique. Le Tableau 4-4 synthétise les positions stratigraphiques des horizons identifiés. Le forage F1 est à l'origine de la plupart des échantillons étudiés en laboratoire. Il bénéficie donc d'une description plus détaillée.

Tableau 4-4 : Profondeur (en m) des horizons pédo- et lithologiques identifiés au moyen des forages carottés. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet.

Horizon	F1	F2	F3
LD	1,85	1,95	-
HLN	2,80 – 3,20	-	-
MAL	5,45 – 5,70	-	-
CHR	8,00 – 8,45	-	-
HBM	~8,50	-	10,40 – 10,60
Prof. totale	11,05	8,80	13,20

Un quatrième forage (F4), d'une profondeur de 5,78 m, a été réalisé en collaboration avec la Direction de l'archéologie du Service public de Wallonie (S. Pirson, P. van der Sloot et P. Spagna). Ce forage a été effectué à la tarière manuelle. Il a été positionné à proximité immédiate du CPTE-02 afin d'en faciliter les corrélations stratigraphiques. La Figure 4-31 synthétise les corrélations stratigraphiques établies entre le forage et le CPTE-02. Ces corrélations sont en accord avec les interprétations issues de l'analyse des CPT et des mesures au pénétromètre de poche réalisées sur le site de Romont.

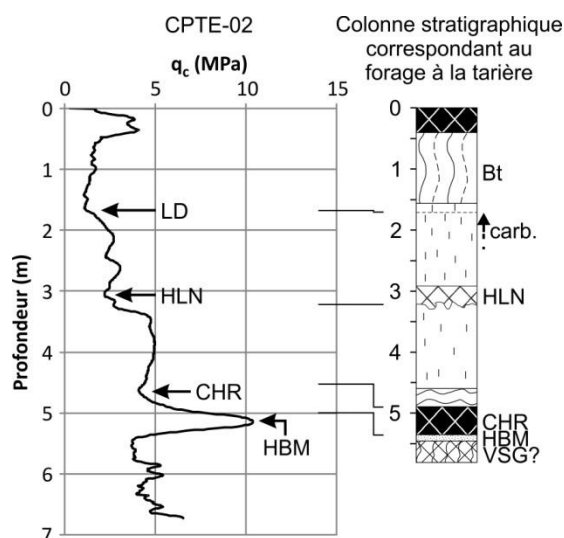


Figure 4-31 : Corrélations stratigraphiques entre le forage à la tarière manuelle et la résistance au cône ( $q_c$ ) du CPTE-02. La légende des symboles utilisés dans la colonne stratigraphique est illustrée à la Figure 4-14. Abréviations : carb. = *lœss carbonaté* ; CHR = *Complexe Humifère de Remicourt* ; HBM = *Horizon blanchi de Momalle* ; HLN = *Horizon à Langues de Nagelbeek* ; LD = *limite de décarbonatation* ; VSG = *Sol de Villers-Saint-Ghislain A/B*.

### 5.3.6. Synthèse

La campagne d'investigation géotechnique et géologique réalisée sur le site de Romont offre de nombreuses possibilités d'analyse, tant du point de vue des caractéristiques mécaniques des matériaux, que de la stratigraphie des couches en présence. Elle se compose de la description géologique du front de taille de la carrière, de trois tomographies de résistivité électrique, de quatre forages, de 16 essais de pénétration statique réalisés au moyen de trois types de pointe différents (M1, M2 et E) et de plus d'un millier de mesures sur la paroi avec le pénétromètre de poche.

La description du front de taille de la carrière a confirmé la présence d'horizons, déjà décrits par quelques études précédentes, au sein de la séquence *lœssique*. Les horizons principaux sont représentés, depuis le haut de la séquence, par : le sol *holocène*, la limite de décarbonatation des *lœss* superficiels, l'*Horizon à Langues de Nagelbeek*, le *Sol de Malplaquet*, le *Complexe Humifère de Remicourt* et le *Pédocomplexe de Rocourt*. La base des *lœss weichséliens* se caractérise par une forme de *paléovallon*, orienté N-S, qui fut progressivement comblé par la poursuite de la sédimentation au cours de la dernière période glaciaire.

Les tomographies de résistivité électrique précisent la profondeur du sommet des *craies* et des *calcarénites* sous-jacentes au *lœss*. Elle met également en évidence, au sein de la séquence *lœssique*, un niveau présentant des valeurs de résistivité électrique plus élevées que dans le reste de la couche. Ce niveau pourrait être attribué à la couche de *lœss carbonaté*.

Cette hypothèse doit toutefois encore être vérifiée par l'analyse en laboratoire des échantillons prélevés au moyen des forages. Par contre, les résultats issus des tomographies de résistivité électrique ne mettent pas en évidence la présence du paléovallon.

Les essais de pénétration statique sont, quant à eux, capables d'affiner la stratigraphie de la séquence lœssique. En effet, l'analyse de la résistance au cône aboutit à la définition de quatre marqueurs stratigraphiques dont la position dans la séquence lœssique les relie à : la limite de décarbonatation située sous la surface topographique, la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek, le Complexe Humifère de Remicourt, et le sommet du Pédocomplexe de Rocourt (représenté par l'Horizon blanchi de Momalle). Les mesures réalisées au moyen de pénétromètre de poche confirment la position stratigraphique de ces horizons.

Cependant, la transition entre la base de la séquence lœssique et les dépôts marins sous-jacents de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern doit encore être vérifiée. En effet, ni les tomographies électriques, ni les CPT, ni les observations de la paroi n'ont permis de mettre en évidence cette transition. Cela permettrait de préciser l'épaisseur réelle de la couche limoneuse quaternaire. Une analyse plus poussée, au départ des échantillons issus des forages, sera menée dans le chapitre 5.

L'analyse comparative des résultats obtenus par les différents types de pointe utilisés par le CPT, montre que la résistance au cône est peu influencée par le choix du type de pointe, dans un matériau limoneux. En effet, la tendance globale approche une équivalence de la résistance au cône entre la pointe électrique et les pointes mécaniques. La comparaison de la résistance au cône obtenue entre les pointes mécaniques M1 et M2 mène au même constat. Ces résultats sont en accord avec d'autres études précédentes réalisées sur un matériau similaire. L'analyse de la résistance du frottement latéral local est plus complexe. La littérature mentionne des différences importantes selon le type de pointe utilisé. Que le matériau soit sableux ou argileux, la pointe mécanique M2 semble surestimer la résistance de frottement latéral local, de l'ordre de 2 à 3,5 fois, par rapport à celle mesurée au moyen de la pointe électrique. Cette tendance est confirmée pour les cinq mètres superficiels de la couche lœssique de Romont, où le rapport entre la pointe M2 et la pointe électrique atteint la valeur de 2,6. Ensuite, ce rapport diminue progressivement et la tendance s'inverse même au delà de 9 m de profondeur. Il est particulièrement surprenant d'observer plusieurs valeurs nulles de la résistance du frottement latéral local mesurées au delà de 9 m de profondeur au moyen de la pointe mécanique. La diminution de la résistance du frottement latéral local observée avec la pointe mécanique, est attribuée à un déplacement insuffisant du manchon de frottement nécessaire pour mobiliser l'entièreté de la résistance au frottement. Ces mesures de résistance au frottement, acquises au moyen de la pointe mécanique M2, ne seront pas considérées dans la suite de l'étude.

## 6. Étude du site de Rocourt

Le site investigué à Rocourt (nord de Liège) se localise au niveau de la sablière Gritten, dont l'entrée est située le long de la rue du Village, au sud-ouest de l'échangeur autoroutier de Vottem (connexion entre la A25/E40 et la A13/E313) (Figure 4-32). L'exploitation de la sablière Gritten dura près de 90 ans, entre 1894 et 1986. Elle constitue un site majeur, de renommée internationale, pour l'étude de la géologie de Quaternaire, et pour les découvertes archéologiques qui y ont été réalisées. Il s'agit donc d'un site qui est largement étudié, et ce depuis les travaux de F. Gullentops (1954), qui y décrivit en détail la séquence loessique par une approche paléoclimatique. L'auteur y découvrit notamment, un horizon qu'il attribua au dernier interglaciaire et qu'il nomma, le Sol de Rocourt. Ce dernier correspond en réalité à un ensemble de paléosols, qui fut rebaptisé plus tard, le Pédocomplexe de Rocourt (Haesaerts *et al.*, 2011b, 2016). F. Gullentops nota également la présence de minéraux volcaniques tels que l'enstatite, l'augite et l'hornblende, localisés au sein d'un horizon épais et humifère, qui fut appelé plus tard le Complexe Humifère de Remicourt (Haesaerts *et al.*, 1997a). Ce téphra riche en enstatite fut étudié en détail par É. Juvigné, qui le nomma d'abord Tuf de Rocourt (Juvigné, 1977), puis Téphra de Rocourt (Juvigné & Gewalt, 1988).

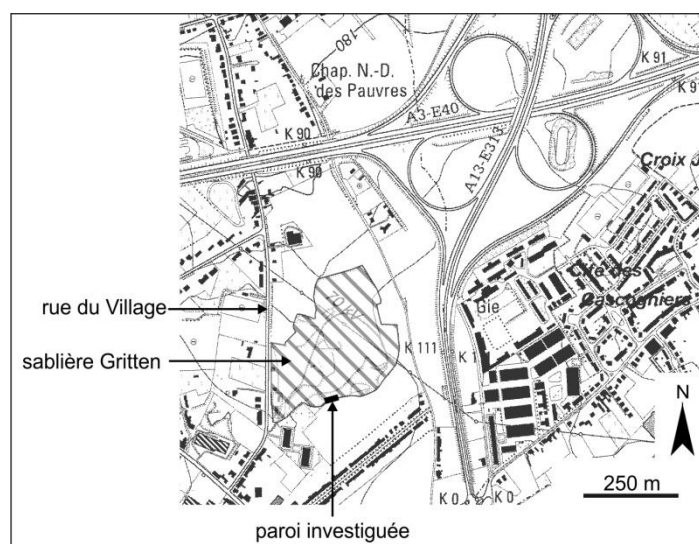


Figure 4-32 : Localisation de la sablière Gritten à Rocourt, au nord de Liège.

Plusieurs centaines d'artéfacts lithiques furent également découverts dans les années 1970 et 1980 en position primaire au sein de l'Horizon blanchi de Momalle (unité DC décrite par Haesaerts *et al.*, 1981), répartis sur une trentaine de mètres carrés (Haesaerts, 1978 ; Otte *et al.*, 1990 ; Haesaerts *et al.*, 2011b).

La récente investigation menée sur le site de Rocourt s'inscrit dans un cadre de recherches plus larges que cette thèse, en collaboration avec les archéologues du Service public de Wallonie ainsi que les chercheurs de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (Pirson *et al.*, 2016). Le remblaiement imminent de la sablière motiva la réalisation des recherches scientifiques. Une paroi d'une hauteur d'environ 8 m, recoupe la séquence loessique jusqu'à sa base. Ces recherches ont pour objectifs, d'une part, de réaliser un enregistrement détaillé de la stratigraphie de la séquence loessique, et d'autre part, d'évaluer le potentiel archéologique du site situé au delà de la sablière (en arrière de la paroi). La paroi fut décrite en détail d'un point de vue pédo- et lithostratigraphique, sous la direction de S. Pirson (Direction de l'archéologie, SPW) et de P. van der Sloot (Service de l'Archéologie de Liège,

SPW). Une campagne de mesures des propriétés mécaniques fut réalisée complémentarément aux observations de la paroi. Les résultats de ces investigations sont développés dans la suite de cette section.

### 6.1. Contexte géologique du site de Rocourt

La séquence lœssique étudiée à Rocourt représente une épaisseur totale d'environ 7,5 m. Une colonne pédo- et lithostratigraphique, établie par S. Pirson en 2016, est illustrée à la Figure 4-33. Une vue d'ensemble de la paroi étudiée est proposée à la Figure 4-34 (a). La séquence comprend, depuis la base, près d'1,5 m des dépôts antérieurs au Sol d'Harmignies, incluant un niveau décimétrique riche en galets et deux niveaux grisâtres étirés et lenticulaires correspondant probablement à des gleys de toundra. Ces dépôts sont surmontés par le Sol d'Harmignies, bien développé sur la paroi étudiée de Rocourt, puis par un horizon brun à gris-brun dont l'équivalent probable pourrait être le Sol de Villers-Saint-Ghislain B (Pirson *et al.*, 2016). Ces paléosols composent le Pédocomplexe de Rocourt (Figure 4-34 (b)), dont le sommet est caractérisé par l'Horizon blanchi de Momalle, également présent à Rocourt. Cet horizon est cependant plus diffus et moins épais qu'à Remicourt et à Romont. La structure lamellaire qui le caractérise est également moins marquée. Le Complexe Humifère de Remicourt, d'une épaisseur de 20 à 30 cm, surmonte ensuite l'Horizon blanchi de Momalle (Figure 4-34 (b)). L'ensemble des horizons situés entre le tiers supérieur du Sol d'Harmignies et le sommet du Complexe Humifère de Remicourt ont été affectés par la solifluxion. Des évidences de ce phénomène s'observent à l'affleurement, par la présence de nombreuses structures étirées (glosses allongées, interdigitations entre horizons) en direction du sud-est (Figure 4-34 (c)).

Ensuite, plus haut dans la séquence, un horizon composé de limon gris clair a été décrit et serait attribué à un gley de toundra (Haesaerts *et al.*, 1981 ; Pirson *et al.*, 2016). Une surface d'érosion, caractérisée à la base par quelques lentilles de galets, et située environ 50 cm au-dessus du gley de toundra, recoupe la séquence. Suivent alors des lœss carbonatés jusqu'à la limite de décarbonatation des lœss superficiels, située vers 3 m de profondeur. La base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek est localisée vers 2,5 m de profondeur. Un fin niveau noirâtre discontinu est observé 40 à 50 cm sous la base de l'HLN. Il pourrait correspondre au Téphra d'Eltville, qui a déjà été décrit ailleurs dans la sablière Gritten (Juvigné, 1977 ; Juvigné & Gewalt, 1988 ; Pouclet *et al.*, 2008). Le sommet de la séquence lœssique est représenté par le sol holocène.

La couche limoneuse quaternaire repose sur une couche d'environ 4 m de sable blanchâtre oligocène (Figure 4-34 (d)), recoupé au moyen d'une tarière manuelle (Pirson *et al.*, 2016). L'interface entre le sable et le limon est caractérisé par la présence d'un niveau de galets millimétriques à pluricentimétriques.

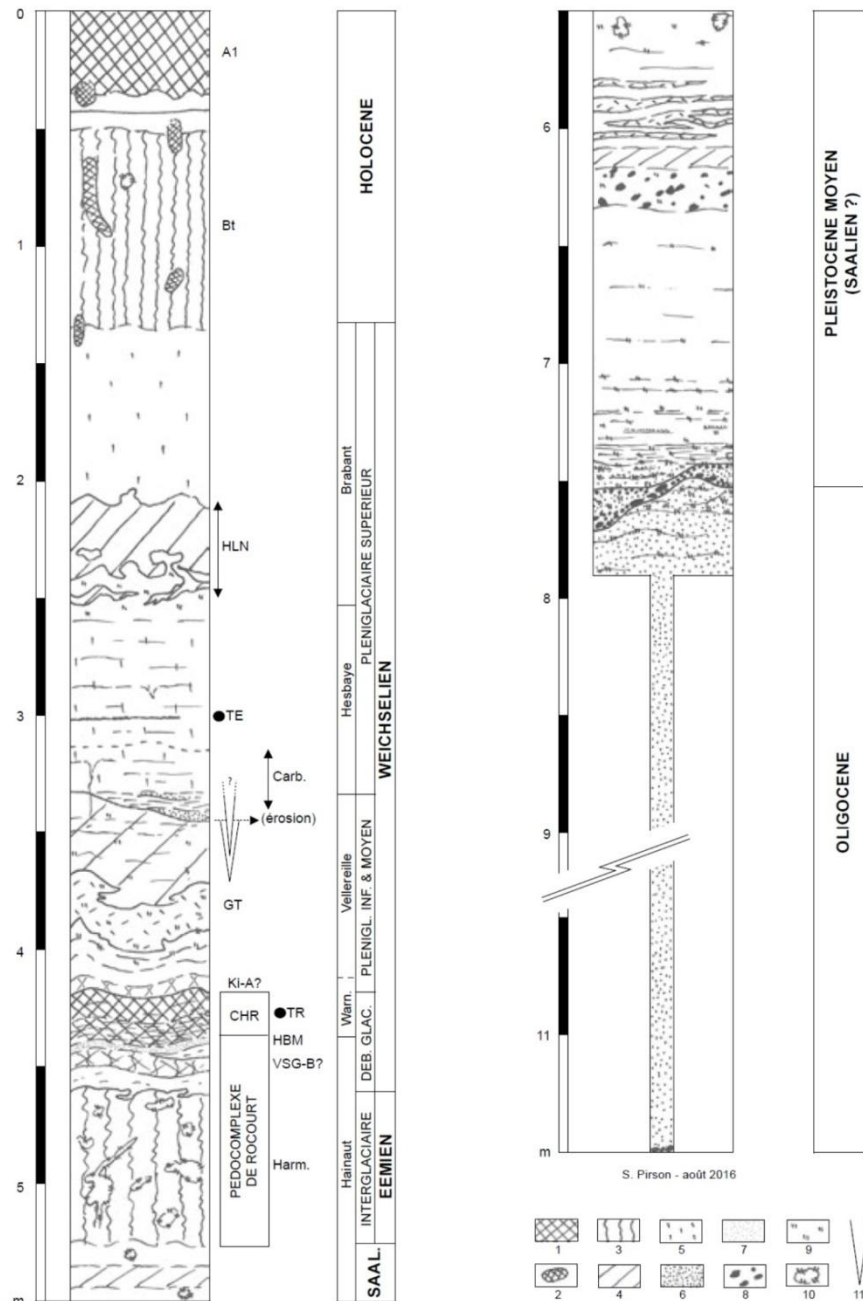


Figure 4-33 : Stratigraphie de la séquence læssique de la sablière Gritten à Rocourt, décrite par S. Pirson (Pirson et al., 2016). Les unités lithostratigraphiques renseignées sont définies par Haesaerts et al., 2011a. Légende des symboles : 1. horizon humifère ; 2. krotovine (biogalerie) ; 3. horizon Bt d'un sol lessivé ; 4. horizon légèrement plus foncé ; 5. læss ; 6. sable ; 7. limon blanc (Horizon blanchi de Momalle) ; 8. galets ; 9. hydroxydes de fer ; 10. glosse (langue de déferrification) ; 11. coin de glace. Abréviations : carb. = læss carbonaté ; CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; GT = gley de toundra ; Harm. = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; Ki-A = Kincamp A ; TE = Téphra d'Eltville ; TR = Téphra de Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B ; Warn = Warneton.



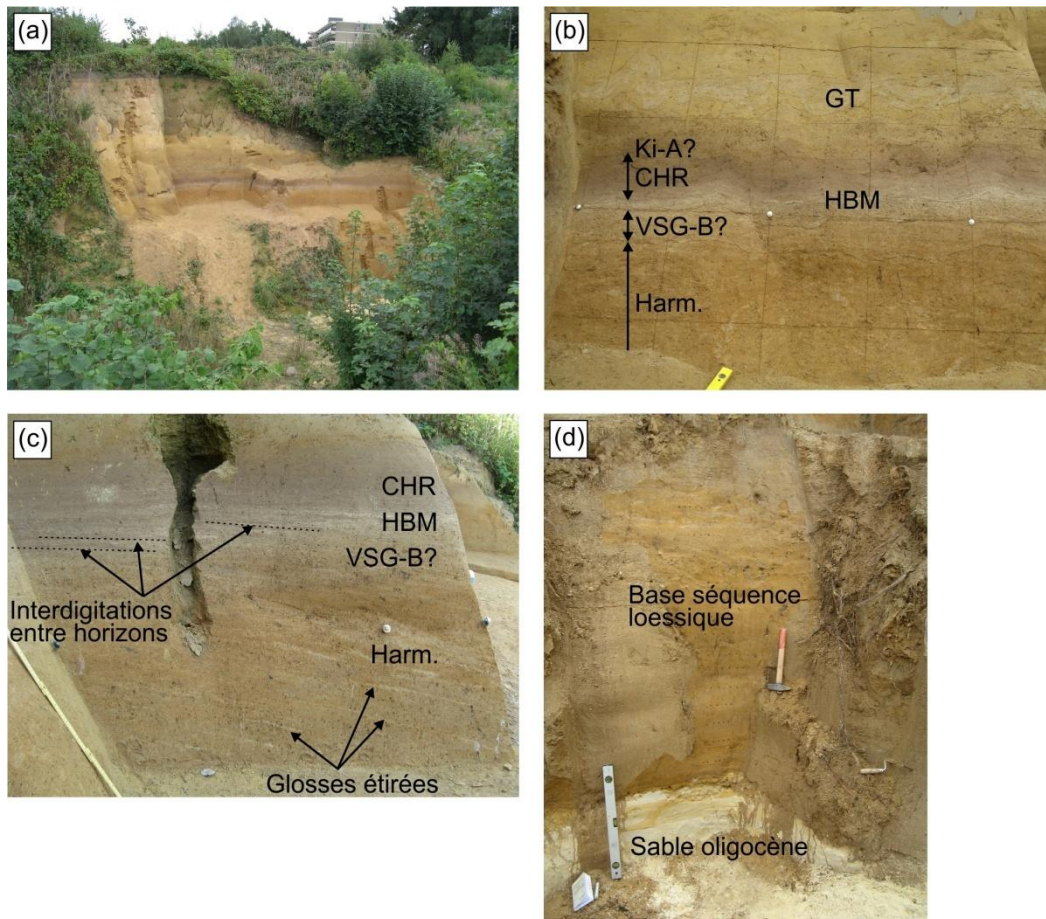


Figure 4-34 : Illustration de la séquence lœssique étudiée dans la sablière Gritten à Rocourt. (a) Vue d'ensemble de l'affleurement (photo du 02/09/2016) ; (b) Pédocomplexe de Rocourt, Complexe Humifère de Remicourt et quelques horizons sus-jacents. Les clous fixés dans la paroi sont espacés d'un mètre (photo du 21/09/2015) ; (c) Évidences de la solifluxion aux alentours du Pédocomplexe de Rocourt et du Complexe Humifère de Remicourt (photo du 02/09/2016) ; (d) Sable oligocène sous-jacent au lœss (photo du 21/09/2015). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; GT = gley de toundra ; Harm. = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; Ki-A = Kincamp A ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Photographies prises par S. Delvoie.

## 6.2. Présentation de la campagne expérimentale in situ

La campagne de mesures in situ comprend des essais de pénétration statique et des mesures au pénétromètre de poche. Au total, une dizaine de CPT ont été réalisés sur un terrain agricole situé derrière l'affleurement étudié (Figure 4-35). Ils ont été effectués au moyen d'une pointe électrique. Les mesures de résistance à l'enfoncement du pénétromètre de poche ont été réalisées sur la paroi, et couvrent la séquence lœssique depuis sa base jusqu'au sommet de l'Horizon à Langues de Nagelbeek. Les résultats de ces mesures sont développés dans la section suivante.

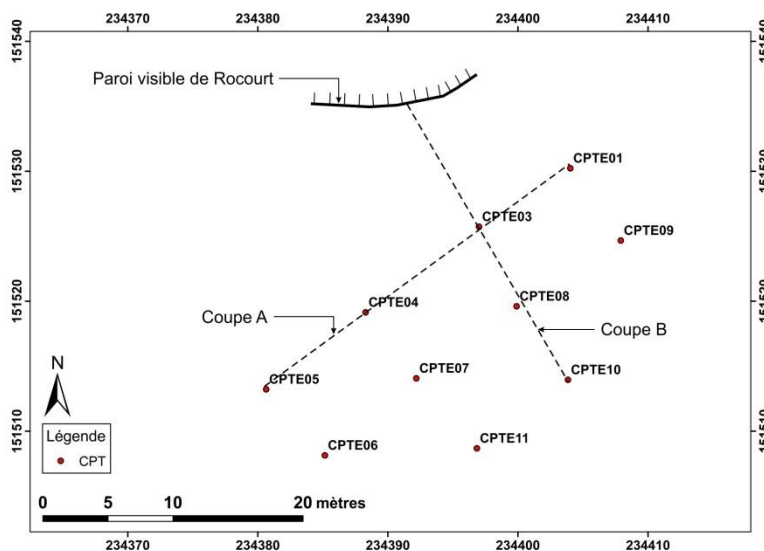


Figure 4-35 : Distribution des essais de pénétration statique (CPT) réalisés dans le cadre de la campagne d'investigation in situ du site de Rocourt. La figure reprend également la localisation des deux coupes (A et B) analysées. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72. Les coordonnées géographiques de chaque essai sont renseignées en annexe 2.

### 6.3. Résultats

Les résultats des mesures acquises au moyen des essais de pénétration statique, ainsi que du pénétromètre de poche, sont développés dans la suite de cette section. Les résultats provenant de l'essai de pénétration statique ne sont pas comparés à ceux obtenus pour les autres sites investigués (Remicourt et Romont), dans cette section. Cela fait l'objet d'une analyse plus approfondie qui est discutée à la section 7 de ce chapitre. Les observations issues des mesures au pénétromètre de poche sont, quant à elles, comparées à celles provenant de la paroi de Romont, dans la section ci-après.

#### 6.3.1. Essai de pénétration statique

Une compilation des résultats obtenus par les dix essais de pénétration statique réalisés sur le site de Rocourt, est présentée à la Figure 4-36 suivante. Celle-ci représente l'évolution de la résistance au cône et du frottement latéral local en fonction de la profondeur. Les courbes présentées correspondent aux valeurs moyennes obtenues sur l'ensemble des CPT. La transition entre la couche limoneuse de surface et le sable oligocène sous-jacent est très visible. Elle se caractérise par une importante et rapide augmentation du  $q_c$ , atteignant des valeurs supérieures à 20 MPa. Le  $q_c$  moyen mesuré dans la couche limoneuse évolue essentiellement entre 2 et 4 MPa. Le frottement latéral local suit une tendance comparable au  $q_c$ , passant de valeurs proches de 50 kPa dans les limons, à des valeurs aux alentours de 350-400 kPa. Cette limite claire permet de définir l'épaisseur des dépôts quaternaires variant entre 6,7 et 8,3 m au droit de la superficie investiguée. L'indication de l'écart-type sur les valeurs apporte des informations sur la variabilité des paramètres mesurés. Aussi bien le  $q_c$  que le  $f_s$  sont caractérisés par une faible variabilité au sein de la couche lœssique. La variabilité augmente dans le sable.

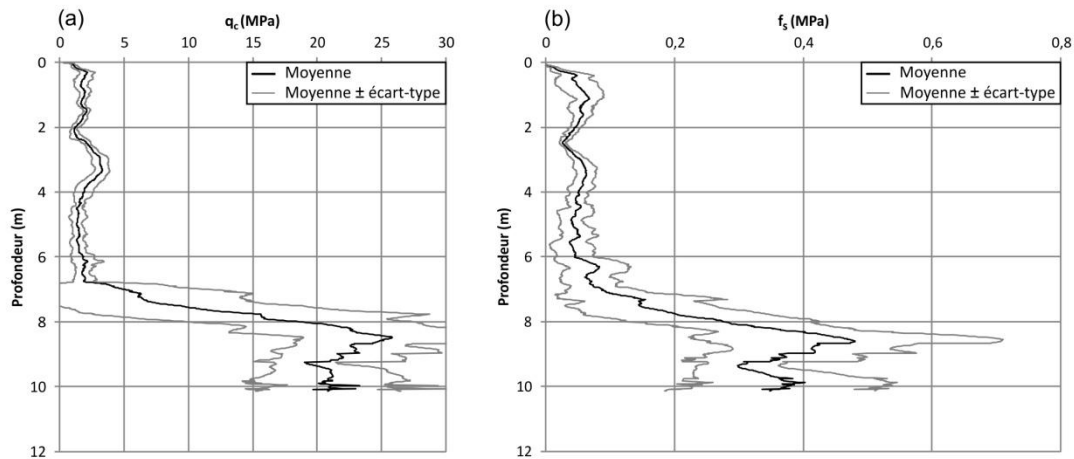


Figure 4-36 : Intégration de l'ensemble des CPT réalisés sur le site de Rocourt. (a) Évolution de la résistance au cône ( $q_c$ ) avec la profondeur. (b) Évolution du frottement latéral local ( $f_s$ ) en fonction de la profondeur.

Les résultats des CPT ont également été analysés au travers de deux coupes, l'une orientée parallèlement à la paroi (coupe A ; Figure 4-37), et l'autre disposée perpendiculairement (coupe B ; Figure 4-38), dont la localisation est présentée à la Figure 4-35. Par comparaison avec la stratigraphie de la séquence lœssique décrite au niveau de l'affleurement, les graphiques de résultats des CPT permettent d'identifier quelques marqueurs stratigraphiques (nommés MS1 à 4 (Rc)). Deux d'entre eux s'identifient clairement au moyen de l'analyse du  $q_c$ . Ils sont tous les deux caractérisés par une faible mais rapide augmentation de la résistance au cône, de l'ordre de 1 MPa, et sont disposés parallèlement à la surface topographique. Le MS1 (Rc) correspond à la position stratigraphique occupée par la base de l'HLN. Le MS2 (Rc) se corrèle à la limite de décarbonatation des lœss superficiels. Plus bas dans la séquence, deux marqueurs stratigraphiques supplémentaires peuvent être définis sur base du  $q_c$ , mais de manière moins évidente que les deux marqueurs précédents. Le MS3 (Rc) se situe vers 4 m de profondeur et se caractérise par un minimum local de la courbe du  $q_c$ , aux alentours de 1 MPa. Le MS4 (Rc) est directement sous-jacent au précédent. Il se marque par un maximum local dans l'évolution des valeurs de  $q_c$  en fonction de la profondeur. Le MS3 (Rc) pourrait être corrélé à un ensemble d'horizons décrits au niveau de la paroi, représentés par le gley de toundra, l'horizon limoneux brunâtre attribué à Kincamp A, et le CHR. Dès lors, le MS4 (Rc) serait attribué au sommet du Pédocomplexe de Rocourt.

L'analyse similaire réalisée sur base du  $R_f$  révèle que ce paramètre semble moins approprié que le  $q_c$  pour identifier d'éventuels marqueurs stratigraphiques. L'HLN reste bien identifiable et se remarque par des valeurs relatives du  $R_f$  assez élevées, aux alentours de 4 %. La limite de décarbonatation (MS2 (Rc)) passe inaperçue. Par ailleurs, il n'existe pas clairement de tendance commune de la courbe du  $R_f$  entre les différents essais CPT, au droit des MS3 (Rc) et MS4 (Rc). L'interface entre le lœss et le sable oligocène sous-jacent est, par contre, aisément identifiable par une franche diminution du  $R_f$ , atteignant des valeurs proches de 1 à 2 %.

La coupe B (Figure 4-38), partant de la paroi, met en lumière la présence d'un pendage vers le SE de l'ensemble des marqueurs stratigraphiques. L'Horizon à Langues de Nagelbeek et la limite de décarbonatation suivent assez fidèlement la topographie de surface. Les MS3 (Rc) et MS4 (Rc) possèdent, quant à eux, un pendage légèrement plus élevé, avec un épaissement des lœss hesbayens vers le SE. La conjugaison des résultats issus de

l'ensemble des essais géotechniques précise le pendage de ces marqueurs stratigraphiques. Leur pendage apparent vaut approximativement  $5^\circ$  et est orienté vers le SE. L'orientation de ce pendage est en accord avec les données de la littérature signalant un pendage et un fauchage de certaines unités en direction d'une large dépression ouverte vers l'est (Haesaerts, 1978 ; Haesaerts *et al.*, 2011b). Ceci est également corroboré par les récentes observations réalisées sur la paroi au niveau du sommet du Pédocomplexe de Rocourt et du Complexe Humifère de Remicourt (important fauchage en direction du sud-est, Figure 4-34 (c)).

Il faut également préciser que les marqueurs stratigraphiques MS3 (Rc) et MS4 (Rc), correspondant à la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et le Pédocomplexe de Rocourt n'ont pas pu être identifiés sur les profils issus des CPTE-05, CPTE-06 et CPTE-11.

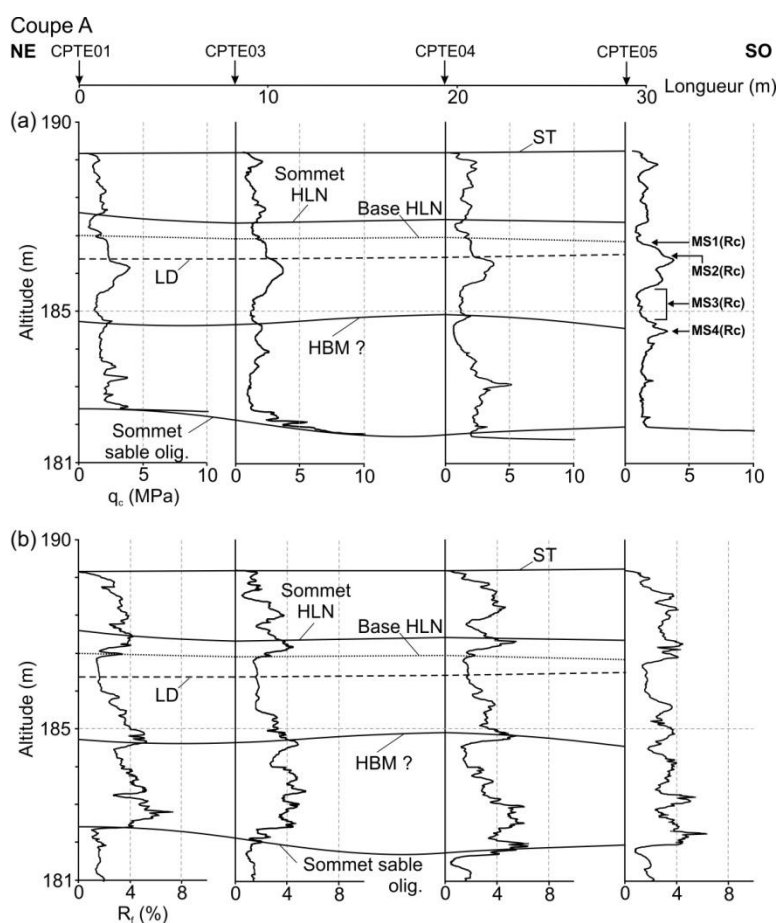


Figure 4-37 : Définition des marqueurs stratigraphiques (MS) sur la coupe A orientée parallèlement à la paroi de Rocourt (Rc). (a) Analyse de la résistance au cône ( $q_c$ ) ; (b) Analyse du rapport de frottement ( $R_f$ ). Abréviations : HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; olig. = oligocène ; ST = surface topographique.

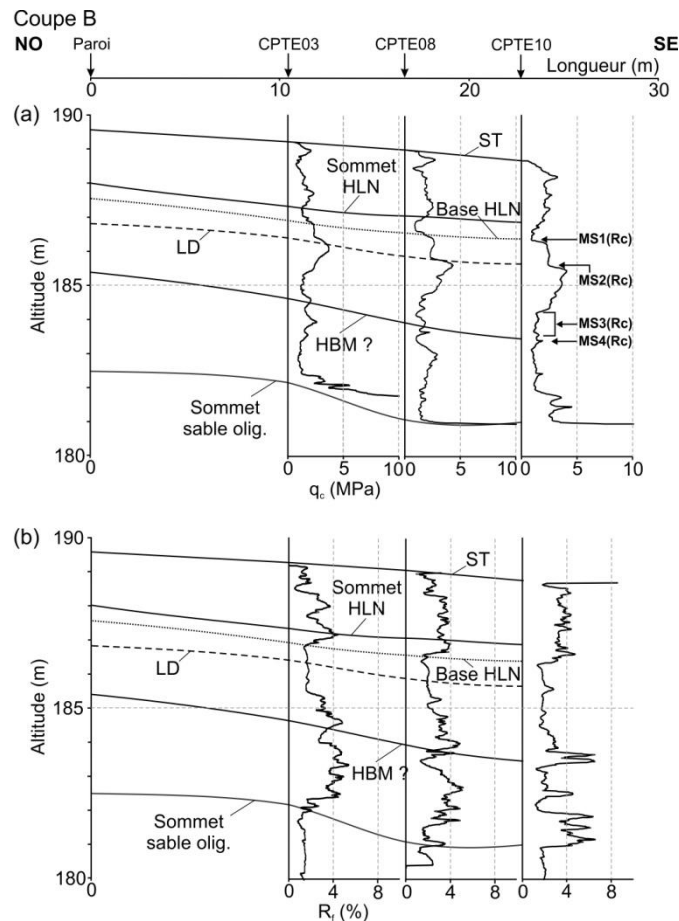


Figure 4-38 : Définition des marqueurs stratigraphiques (MS) sur la coupe B orientée perpendiculairement à la paroi de Rocourt (Rc). (a) Analyse de la résistance au cône ( $q_c$ ) ; (b) Analyse du rapport de frottement ( $R_f$ ). Abréviations : HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; olig. = oligocène ; ST = surface topographique.

L'analyse conjuguée des essais de pénétration statique et des mesures sur la paroi permet de matérialiser la surface correspondant à l'altitude du sommet du Pédocomplexe de Rocourt (PR) (Figure 4-39). Cette surface est inclinée en direction du SE. Le pendage apparent de  $5^\circ$  mesuré sur la coupe B équivaut également au pendage réel.

Sur le site de Rocourt, aucun essai de pénétration statique n'a atteint l'inclinaison limite de  $15^\circ$  par rapport à la verticale (Figure 4-40), impliquant l'arrêt de l'essai (ASTM D5778-12, 2012). Ceux-ci ont tous été arrêtés lorsque la force maximale d'enfoncement autorisée par la pointe, à savoir 100 kN, a été atteinte.

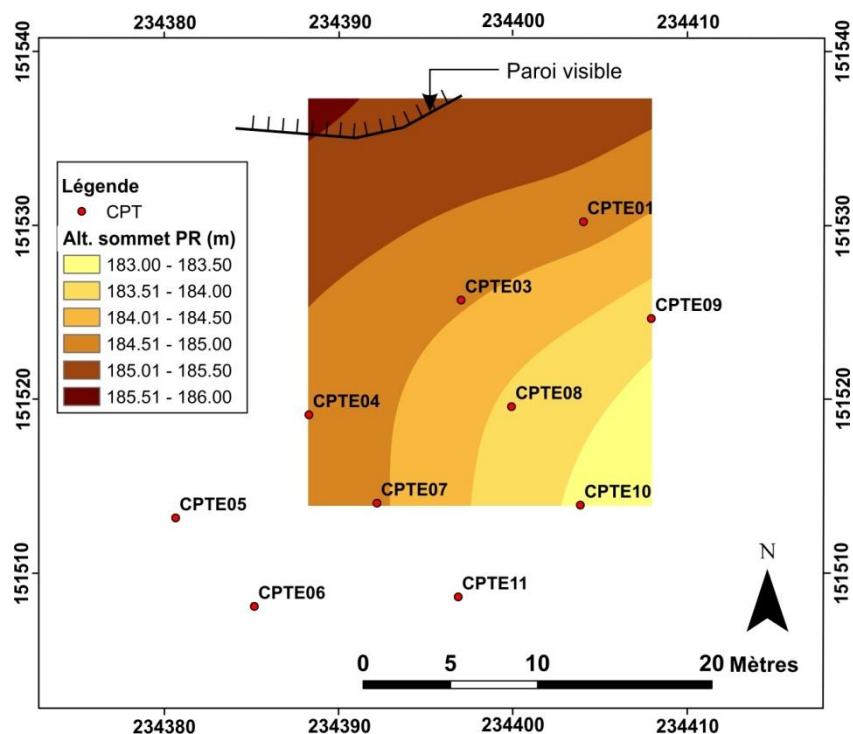


Figure 4-39 : Altitude de la surface correspondant au sommet du Pédocomplexe de Rocourt (PR) pour le site de Romont. Les coordonnées géographiques sont exprimées en Lambert belge 72.

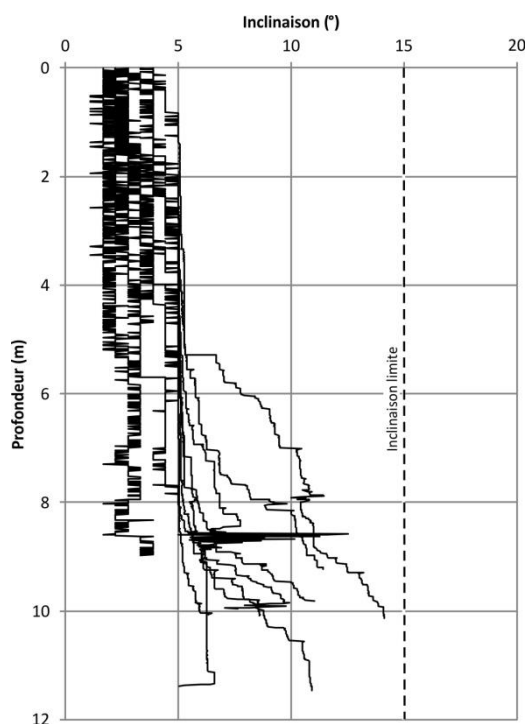


Figure 4-40 : Évolution de l'inclinaison de la pointe électrique au cours de son enfoncement, pour les CPT réalisés sur le site de Rocourt.

### 6.3.2. Pénétrömètre de poche

Dans le but de valider la position stratigraphique des marqueurs stratigraphiques définis sur base des résultats issus des CPT, des mesures de résistance ont été réalisées sur la paroi



visible au moyen d'un pénétromètre de poche. La démarche suivie est identique à celle appliquée sur le site de Romont. Un total de 540 points de mesures a été réalisé sur la paroi du site de Rocourt. Ils sont répartis selon quatre sections principales complémentaires, dont la localisation est indiquée sur la Figure 4-41. Les investigations recourent la séquence lœssique depuis sa base, jusqu'au sommet de l'HLN.



Figure 4-41 : Localisation des sections où les mesures au pénétromètre de poche ont été réalisées, sur la paroi de Rocourt.

La compilation des résultats obtenus au moyen du pénétromètre de poche (en configuration horizontale du pénétromètre de poche), sur la paroi de Rocourt, est synthétisée à la Figure 4-42 (b). Les mesures ont été réalisées avec un intervalle d'un maximum de 10 cm selon un axe vertical. Pour chaque profondeur investiguée, quatre mesures ont été effectuées. La courbe présentée sur le graphique correspond à la valeur moyenne obtenue pour chacune des profondeurs sondées. L'écart-type sur les valeurs est également représenté afin d'informer sur la variabilité des mesures obtenues. La colonne pédo- et lithostratigraphique de la Figure 4-42 (a) reprend la position stratigraphiques des points de mesures du pénétromètre de poche. Ces données sont ensuite comparées aux valeurs de résistance au cône issues du CPTE-01 (Figure 4-42 (c)), qui correspond à l'essai de pénétration statique le plus proche de la paroi, réalisé à une dizaine de mètres en arrière de celle-ci. Les liens stratigraphiques entre les mesures au pénétromètre de poche et la résistance au cône du CPT apparaissent moins clairement que pour le site de Romont. L'HBM est l'horizon qui se marque le mieux car il présente les valeurs de résistance à l'enfoncement du pénétromètre les plus élevées de toute la séquence lœssique. Cet horizon est relié au MS4 (Rc) défini sur base du  $q_c$ . Le CHR ne ressort pas de la tendance moyenne issue du pénétromètre de poche, comme c'est le cas à Romont, où il se caractérise par des valeurs plus faibles que celles des horizons qui le bordent. Le CHR n'est d'ailleurs pas non plus identifiable sur base de l'analyse du  $q_c$ . La limite de décarbonatation se marque par une augmentation brutale mais très faible de la résistance à l'enfoncement du pénétromètre, de l'ordre de  $1 \text{ kg/cm}^2$ . Ce changement de caractéristique mécanique n'est pas suffisant pour se marquer clairement sur la tendance moyenne des valeurs du pénétromètre de poche. Enfin, la transition entre les lœss brabantiens et hesbayens, située à la base de l'HLN, ne se marque pas par une augmentation de la résistance à l'enfoncement du pénétromètre, comme cela a été observé à Romont.

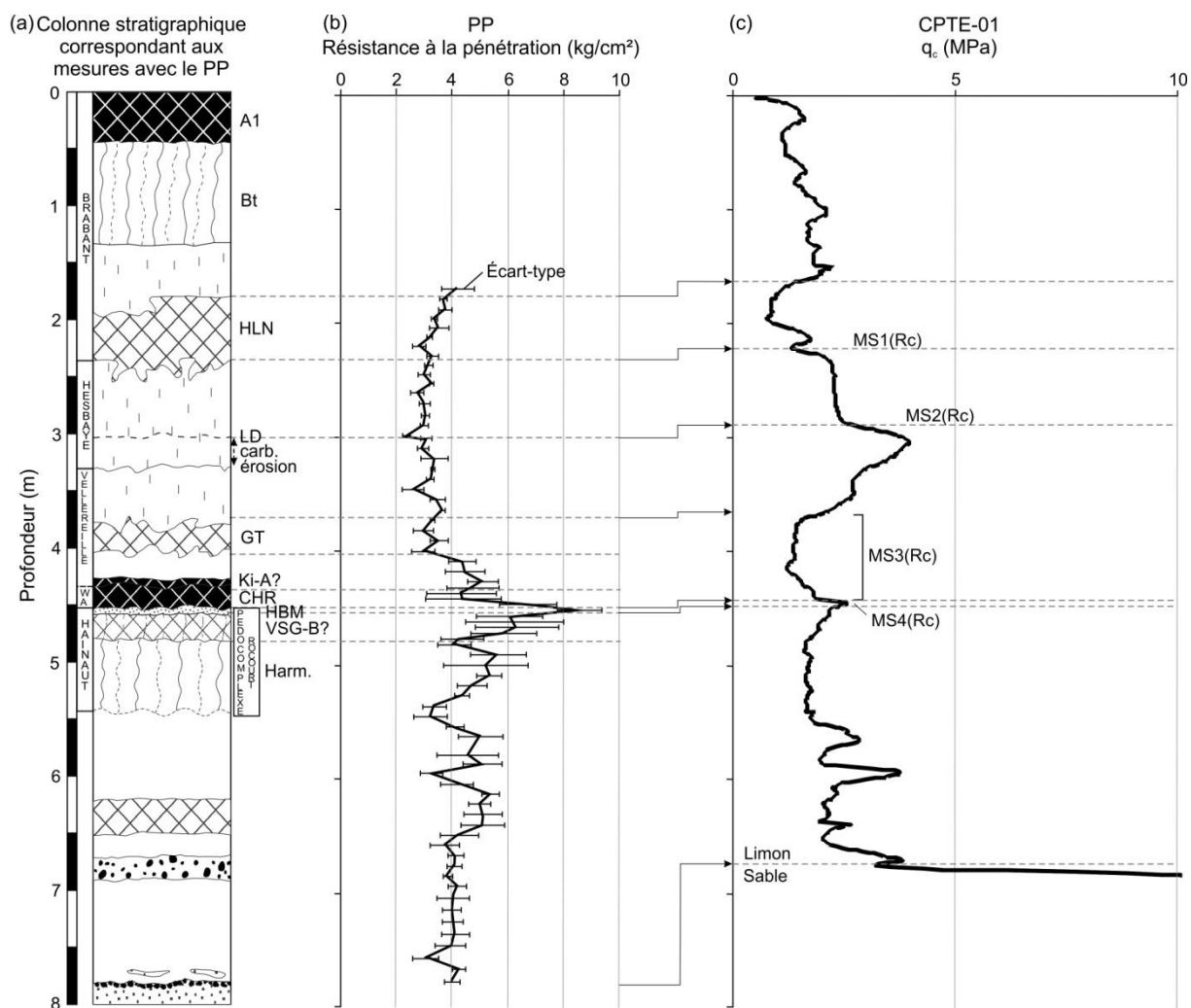


Figure 4-42 : Corrélations stratigraphiques entre les résultats obtenus au moyen du pénétromètre de poche (PP) et les valeurs de la résistance au cône ( $q_c$ ) issues du CPT, pour le site de Rocourt. (a) Colonne pédo- et lithostratigraphique correspondant aux horizons recoupés par le pénétromètre de poche. (b) Résultats compilés des mesures obtenues au moyen du pénétromètre de poche, selon la configuration horizontale. (c) Évolution de la résistance au cône en fonction de la profondeur pour le CPT-01, avec indication des marqueurs stratigraphiques (MS) définis. La légende des symboles utilisés dans la colonne stratigraphique est illustrée à la Figure 4-14. Abréviations : carb = carbonaté ; CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; GT = gley de toundra ; Harm = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; Ki-A = Kincamp-A ; LD = limite de décarbonatation ; Rc = Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain-B ; Wa = Warneton.

Les valeurs de résistance à l'enfoncement du pénétromètre de poche, obtenues sur le site de Romont, ont révélé des légères différences entre une configuration horizontale ou verticale du pénétromètre. Les valeurs obtenues au moyen de la configuration horizontale sont légèrement plus élevées que celles acquises avec la configuration verticale. Le facteur obtenu sur le site de Romont fluctue entre 1,1 et 1,2.

Une approche similaire a été réalisée sur la paroi de Rocourt. Les sections qui ont fait l'objet d'une investigation selon les deux configurations du pénétromètre de poche correspondent aux sections 1, 2 et 3, recoupant la moitié inférieure de la séquence lœssique, jusqu'au CHR inclus. Les résultats des mesures effectuées au moyen des deux configurations



sont illustrés à la Figure 4-43. Ces investigations semblent confirmer les résultats obtenus à Romont, du moins pour les mesures issues des sections 1 et 3. En effet, pour ces deux sections, le rapport calculé entre les valeurs moyennes issues d'une configuration horizontale et de celles obtenues par une configuration verticale, équivaut à 1,1 et 1,2, respectivement (Tableau 4-5). Cette tendance ne se marque pratiquement pas pour les résultats issus de la section 2. Les valeurs moyennes obtenues pour cette section selon les deux configurations du pénétromètre, sont pratiquement équivalentes.

Les conclusions suite à ces observations sont similaires à celles développées pour le site de Romont, à savoir que l'anisotropie du matériau n'est probablement pas le seul paramètre responsable de la différence observée entre les deux configurations du pénétromètre de poche. En effet, l'hétérogénéité du matériau et la reproductibilité des mesures sont deux autres paramètres qui influencent certainement également les mesures.

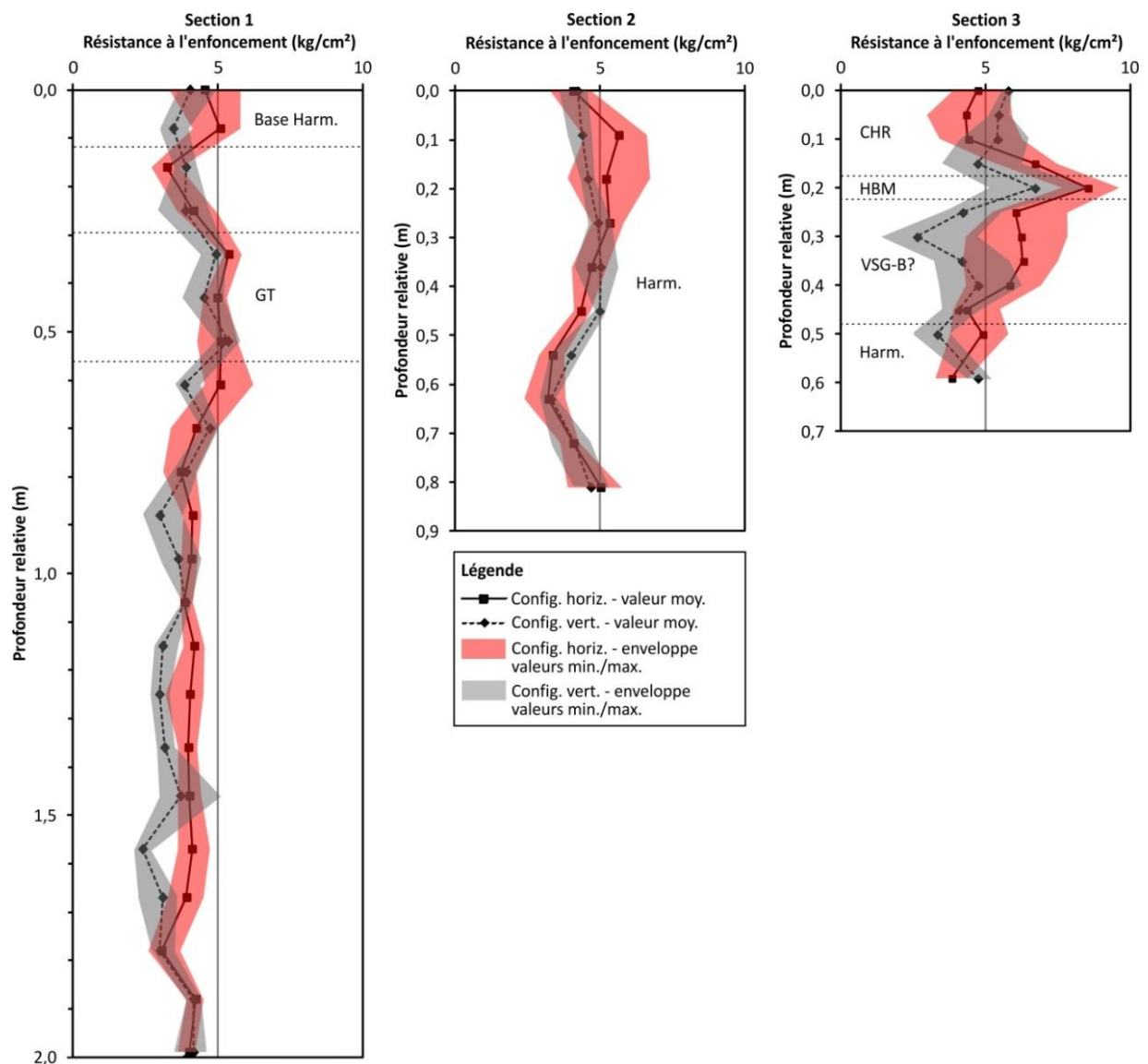


Figure 4-43 : Valeurs de résistance à la pénétration obtenues à la suite des mesures avec le pénétromètre de poche, sur trois sections différentes de la paroi de Rocourt. Les résultats ont été obtenus selon deux configurations différentes du pénétromètre (horizontal ou vertical). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Harm = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; GT = gley de toundra ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Tableau 4-5 : Valeurs moyennes de la résistance à la pénétration obtenues sur les différentes sections investiguées à Rocourt, selon une configuration horizontale (H) ou verticale (V) du pénétromètre de poche.

Section	Résistance à la pénétration moyenne (kg/cm <sup>2</sup> )		Rapport H/V
	Config. horiz. (H)	Config. vert. (V)	
Section 1	4,23	3,76	1,13
Section 2	4,49	4,42	1,02
Section 3	5,51	4,66	1,18

### 6.3.3. Synthèse

La sablière Gritten de Rocourt constitue un site présentant un intérêt scientifique de renommée internationale pour l'étude des dépôts quaternaires, ainsi que pour les découvertes archéologiques qui y ont été réalisées, et ce depuis plus de 60 ans. Cependant, ce site est voué à disparaître dans un avenir très proche suite au remblaiement de la sablière. La disparition d'un tel site motiva les récentes interventions, réalisées en collaboration avec les archéologues du Service public de Wallonie ainsi que les chercheurs de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique.

Le levé géologique de la paroi de Rocourt met en évidence la présence des horizons suivants au sein de la séquence lœssique, en partant de la base : Sol d'Harmignies, Sol de Villers-Saint-Ghislain B (?), Horizon blanchi de Momalle, Complexe Humifère de Remicourt, Kincamp A (?), limite de décarbonatation, Horizon à Langues de Nagelbeek, et finalement le sol holocène. Les observations réalisées sur la paroi montrent que les horizons situés entre le tiers supérieur du Sol d'Harmignies et le Complexe Humifère de Remicourt inclus, ont été affectés par la solifluxion le long d'une pente inclinée vers le SE.

L'investigation menée au moyen des essais de pénétration statique, munis d'une pointe électrique, permettent de définir clairement deux marqueurs stratigraphiques sur base de l'analyse de la résistance au cône. Les deux marqueurs se caractérisent par une augmentation de la résistance et sont corrélés avec la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek (MS1 (Rc)) et avec la limite de décarbonatation (MS2 (Rc)). Le sommet du Pédocomplexe de Rocourt correspondrait à maximum local peu marqué dans la courbe d'évolution de la résistance au cône en fonction de la profondeur (MS4 (Rc)). Ce maximum ne s'observe d'ailleurs pas pour tous les CPT réalisés. Ce marqueur stratigraphique est surmonté par un passage caractérisé par des valeurs de la résistance au cône peu élevées (MS3 (Rc)). Les profondeurs correspondantes sont corrélées avec un ensemble d'horizons incluant notamment le Complexe Humifère de Remicourt. L'analyse de l'ensemble des CPT réalisés en arrière de la paroi confirme la présence d'une pente orientée vers le SE au niveau des MS3 (Rc) et MS4 (Rc). Le pendage réel calculé vaut d'ailleurs 5°.

Les mesures réalisées au moyen du pénétromètre de poche révèlent des valeurs de résistance à l'enfoncement du pénétromètre plus élevées au droit de l'Horizon blanchi de Momalle qu'ailleurs dans la séquence lœssique. Cette observation confirme celle qui a été réalisée sur la paroi de Romont. Par contre, le Complexe Humifère de Remicourt ne ressort pas de l'analyse des mesures au pénétromètre de poche. La limite de décarbonatation des lœss superficiels se caractérise par une légère et brusque augmentation de la résistance à l'enfoncement du pénétromètre, comme cela a été observé à Romont. Par contre, la transition

entre les lœss brabantiens et les lœss hesbayens, située à la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek, ne se marque pas suite à l'analyse des mesures au pénétromètre de poche, alors que cette transition est assez claire sur la paroi de Romont.

## 7. Discussions

Les discussions suivantes portent sur l'exploitation des résultats issus de l'essai de pénétration statique en vue de définir des marqueurs stratigraphiques au sein de la séquence lœssiques. Les résultats provenant des trois sites investigués y sont synthétisés. Ensuite les principaux résultats du pénétromètre de poche sont développés et comparés avec la littérature scientifique. Finalement, la démarche expérimentale conduite dans le cadre de cette thèse aboutit à une application intéressante en lien avec la prospection archéologique. Le potentiel qu'offre l'essai de pénétration statique comme moyen de prospection archéologique, est discuté dans cette troisième partie.

### 7.1. Définition des marqueurs stratigraphiques

L'essai de pénétration statique constitue un moyen d'investigation intéressant qui permet d'identifier des horizons au sein de la séquence lœssique. L'analyse de la résistance au cône, à la suite des investigations menées sur les trois sites (Remicourt, Romont et Rocourt), révèle qu'il est possible de définir quatre marqueurs stratigraphiques provenant de la séquence lœssique. Depuis le sommet, la limite de décarbonatation et la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek sont caractérisés par une tendance similaire. Les deux marqueurs stratigraphiques peuvent être définis par une augmentation de 1-2 MPa de la résistance au cône. L'Horizon à Langues de Nagelbeek se caractérise par des valeurs de  $q_c$  relativement faibles, aux alentours de 1-3 MPa, suivies par des lœss hesbayens plus résistants. Les lœss carbonatés sont plus résistants à la pénétration que les lœss superficiels décarbonatés. Des analyses de la composition chimique et minéralogique sont développées dans le chapitre 6. De plus, l'étude de lames minces permettra d'observer l'assemblage minéralogique et la microstructure qui caractérisent ces lœss. Il est toutefois connu que le carbonate de calcium peut agir comme un ciment au sein du matériau granulaire, augmentant ainsi la résistance au cône et diminuant le rapport de frottement, comme cela a déjà été observé dans d'autres études (Ebelhar *et al.*, 1988 ; Lunne *et al.*, 1997).

Le Complexe Humifère de Remicourt représente un autre marqueur stratigraphique identifiable sur base de l'analyse du  $q_c$ . L'horizon se définit par des propriétés mécaniques moindres, avec des valeurs de résistance au cône classiquement inférieures à 3 MPa. Le Complexe Humifère de Remicourt est caractérisé par un teneur en matière organique plus élevée que les horizons environnants. La résistance au cône mesurée dans des niveaux riches en matière organique présente habituellement de valeurs très faibles (Robertson *et al.*, 1986 ; Lunne *et al.*, 1997 ; Missiaen *et al.*, 2015). Cependant, les mesures réalisées sur des échantillons prélevés sur le site de Veldwezelt montrent que le Complexe Humifère de Remicourt ne contient que 0,34 % de carbone organique (Vancampenhout *et al.*, 2008). Il en résulte que la teneur en matière organique ne devrait pas être responsable des faibles valeurs de résistance au cône observées. D'autres investigations, telles que l'analyse de la microstructure (porosité, cimentation), ainsi que la composition chimique et minéralogique, sont nécessaires pour expliquer ces observations. Cela sera précisé dans le chapitre 6.

Par ailleurs, le marqueur stratigraphique le plus remarquable concerne le sommet du Pédocomplexe de Rocourt, et plus précisément l'Horizon blanchi de Momalle. Cet horizon ne représente que 10 cm d'épaisseur, tout au plus. Par contre, ses caractéristiques mécaniques

intrinsèques sont très différentes de celles des horizons qui lui sont proches, et notamment le Complexe Humifère de Remicourt. Il se caractérise par une augmentation brutale de la résistance au cône, pouvant localement atteindre plus de 20 MPa, sur le site de Romont. Une telle valeur de la résistance au cône indique la présence de caractéristiques mécaniques inhabituelles pour un limon. La transition CHR/HBM rend plus aisée la distinction de ce marqueur stratigraphique, sur base de l'analyse du  $q_c$ . L'origine des valeurs élevées de la résistance, mesurées au sein de cet horizon, n'est pas encore bien comprise. L'Horizon blanchi de Momalle se serait probablement formé durant une période caractérisée par une succession de cycles de gel-dégel en relation avec des conditions climatiques froides (Haesaerts *et al.*, 1999, 2011b). Cela aurait eu pour conséquence, un lessivage des particules fines argileuses et de la matière organique, initialement présentes dans l'horizon, suite à la percolation par de l'eau de fonte pendant les périodes plus chaudes. C'est la raison qui est avancée pour expliquer la couleur blanchâtre de l'horizon, ainsi que l'aspect visuel plus grossier (légèrement plus sableux) que les horizons environnants. L'influence de cycles de gel-dégel pourrait également être à l'origine de la structure lamellaire très marquée qui caractérise l'horizon, ainsi que d'une densification du matériau (Van Vliet-Lanoë & Langhor, 1981). Cependant, la formation d'une telle structure n'est pas encore bien comprise (Schaetzl & Anderson, 2005). Ici aussi, des analyses complémentaires à l'échelle de l'échantillon (courbe granulométrique, densité relative) et à l'échelle microscopique (composition chimique et minéralogique, distribution de la taille des pores, observation de lames minces), sont nécessaires pour confirmer l'hypothèse susmentionnée. Cela est abordé dans les chapitres suivants de cette thèse.

Les sites de Romont et de Remicourt indiquent des tendances similaires pour la résistance au cône au droit du Complexe Humifère de Remicourt et du Sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Par contre, les mesures réalisées au niveau du site de Rocourt ne corroborent pas ces observations. En effet, le Complexe Humifère de Remicourt n'est pas visible sur la courbe d'évolution du  $q_c$  en fonction de la profondeur. Le sommet du Pédocomplexe de Rocourt est également nettement moins marqué. Les observations réalisées sur la paroi de Rocourt révèlent une interdigitation entre ces horizons. Ce mélange est le résultat d'un remaniement de ces dépôts, par solifluxion. Les propriétés mécaniques in situ, initialement présentes dans le matériau, pourraient dès lors avoir été modifiées par ce remaniement. De plus, le Complexe Humifère de Remicourt est moins épais sur le site de Rocourt, qu'au droit des sites de Romont et Remicourt. L'Horizon blanchi de Momalle est également moins bien développé, et semble même discontinu latéralement, d'après les observations réalisées au niveau de la paroi. L'investigation de site de Rocourt reste toutefois intéressante, car elle souligne une limitation de l'analyse de la résistance au cône en vue d'identifier certains marqueurs stratigraphiques définis sur les sites de Romont et de Remicourt.

L'utilisation d'une pointe électrique apporte un niveau de détail plus élevé sur la stratigraphie de la séquence lœssique. Cependant, l'investigation des sites de Remicourt et de Romont au moyen de pointes mécaniques, montre que ces dernières sont également capables de mettre en évidence la présence de certains niveaux d'épaisseur pluricentimétrique, comme l'Horizon blanchi de Momalle. Dans un objectif de définir davantage de marqueurs stratigraphiques au sein de la séquence lœssique, une analyse du rapport de frottement a également été réalisée. Les résultats obtenus indiquent que le rapport de frottement est moins approprié que la résistance au cône pour souligner d'éventuels marqueurs stratigraphiques.

## 7.2. Apports du pénétromètre de poche

L'étude de la paroi de Romont, au moyen de pénétromètre de poche, confirme et précise l'interprétation stratigraphique issue de l'analyse de la résistance au cône du CPT. Ces mesures confirment la position stratigraphique des marqueurs identifiés sur base du q<sub>c</sub>. L'horizon le plus remarquable correspond à la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle. La résistance à l'enfoncement du pénétromètre augmente considérablement au passage de ces deux horizons. Cependant, la variabilité des valeurs obtenues au sein d'un même horizon peut être importante. C'est pourquoi de nombreuses mesures sont nécessaires pour évaluer cette hétérogénéité (Galeandro *et al.*, 2017).

Les horizons pédologiques B des paléosols sont caractérisés par des valeurs de résistance à l'enfoncement plus élevées que dans les autres horizons de la séquence (mis à part l'Horizon blanchi de Momalle). Cela a été observé dans les Sols de Malplaquet, de VSG-A et B et d'Harmignies investigués à Romont (Figure 4-29) et à Rocourt (Figure 4-42). D'autres études ont déjà souligné de meilleures propriétés mécaniques en lien avec des paléosols : pour des dépôts marins affectés par une pédogenèse (Park *et al.*, 1998 ; Choi & Kim, 2006), pour un paléosol carbonaté pléistocène (Donnici *et al.*, 2011), et pour des horizons B issus d'inceptisols pléistocènes (Amorosi *et al.*, 2015), provenant de contextes côtiers et fluviaux.

Cependant, la comparaison entre la résistance à l'enfoncement mesurée avec le pénétromètre de poche et la résistance au cône issue du CPT, est limitée. La résistance mesurée au moyen de pénétromètre de poche est initialement calibrée par des essais de compression simple en laboratoire. Il n'existe pas de relation physique entre une résistance à la compression simple, et la résistance au cône. De plus, les conditions d'essai sont assez différentes. Lorsque la pointe du CPT est enfoncée dans le sous-sol, le milieu est confiné dans toutes les directions. Alors que, dans le cas du pénétromètre de poche, l'enfoncement de la tige s'effectue à très faible profondeur (sur 6 mm), et reste donc proche d'une surface libre.

## 7.3. Application à l'archéologie préventive

Depuis la fin des années 1940, l'étude des séquences loessiques au moyen d'approches multidisciplinaires a amélioré considérablement les connaissances sur la chronologie et les interprétations paléoenvironnementales en lien avec les sites archéologiques (de Heinzelin, 1950, 1959 ; Haesaerts, 1978 ; Bosquet *et al.*, 1998 ; Bringmans, 2006 ; Van Baelen *et al.*, 2008 ; van der Sloot *et al.*, 2011). Cependant, la réalisation d'essais de pénétration statique appliqués à l'archéologie reste toujours actuellement peu fréquente. Seulement quelques investigations archéologiques ont été menées au moyen de CPT. Elles couvrent des applications très diverses, et des contextes géologiques également très variés (Bates *et al.*, 2007 ; Calabrese *et al.*, 2010 ; Bates & Stafford, 2013 ; Missiaen *et al.*, 2015 ; Vos *et al.*, 2015 ; Koster, 2016 ; Verhegge *et al.*, 2016).

Les sites archéologiques bien documentés du Paléolithique moyen sont peu fréquents. En Belgique, une récente étude montra que parmi les 442 sites archéologiques recensés en lien avec le Paléolithique ancien, seulement 28 d'entre eux bénéficient d'une interprétation chronostratigraphique considérée comme suffisamment fiable et précise (Di Modica, 2010 ; Pirson & Di Modica, 2011 ; Di Modica *et al.*, 2016). Ceux-ci se répartissent en 9 sites en contexte karstique, et 19 sites en plein air. Parmi ces derniers, seulement 11 sites sont en lien avec un contexte loessique. Ils sont localisés sur la Figure 3-9. Les sites archéologiques localisés en contexte loessique nécessitent la présence d'un affleurement accessible, qui peut être étudié et décrit. Ces affleurements sont malheureusement souvent temporaires et/ou pas

assez profonds par rapport aux niveaux correspondant au Paléolithique moyen, car ils sont en lien avec des projets d'aménagement du territoire ou avec l'industrie extractive. Cela explique la relative rareté des sites archéologiques découverts en contexte lœssique, et bien documentés. Une alternative souvent employée par les archéologues, consiste à investiguer la séquence lœssique au moyen de forages ou d'une pelle mécanique. Cela peut cependant s'avérer assez coûteux lorsque la couche de lœss présente des épaisseurs importantes.

L'essai de pénétration statique est ici proposé comme une alternative supplémentaire pour sonder la séquence lœssique en vue d'y déceler la présence de certains horizons en particulier. L'horizon le plus facile à identifier sur base de la résistance au cône correspond à la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle, situé au sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Ces horizons, ainsi que le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, ont délivrés de nombreux artefacts lithiques provenant de 9 des 11 sites belges issus d'un contexte lœssique. Par conséquent, la mesure de la résistance au cône peut être considérée comme un proxy intéressant dans le cadre de campagne de fouilles archéologiques. Elle permet en effet d'identifier l'occurrence et la profondeur de ces horizons au sein de la séquence. Le CPT peut aussi élargir les possibilités d'investigations archéologiques puisqu'il semble en mesure de détecter ces horizons en l'absence d'un quelconque affleurement observable. Il s'agit d'une méthode capable d'investiguer de manière continue l'entièreté de la couche de lœss, même si celle-ci dépasse les 20 m d'épaisseur. La réalisation d'un CPT est également rapide, aisément reproductible, et habituellement moins coûteuse qu'un forage. Cependant, aucun prélèvement de sol n'est possible par la méthode. C'est la raison pour laquelle la réalisation d'un forage, complémentarément aux CPT, permettrait de valider visuellement l'interprétation stratigraphique.

En outre, les campagnes géotechniques menées à Romont et à Rocourt apportent des informations sur la géomorphologie 3D des marqueurs stratigraphiques identifiés. Les Figure 4-24 et Figure 4-39 représentent l'altitude de la surface correspondant à l'Horizon blanchi de Momalle pour les sites de Romont et de Rocourt, respectivement. La géomorphologie de cet horizon en arrière de la paroi de Romont indique la présence d'un paléovallon d'orientation N-S, dont l'axe est incliné vers le Nord. Ces résultats sont en accord avec la paléo-géomorphologie locale (Juvigné, 1992). Sur le site de Rocourt, le même horizon est incliné vers le SE, corroborant ainsi les observations précédentes issues de divers affleurements (Haesaerts, 1978 ; Haesaerts *et al.*, 2011b). La reconstitution géomorphologique de certains horizons peut s'avérer très utile dans l'évaluation du potentiel archéologique d'un site.

## 8. Conclusions intermédiaires

L'étude de trois sites présentant un intérêt majeur pour la stratigraphie des dépôts loessiques en lien avec l'Émien (dernier interglaciaire) et le Weichsélien (dernier glaciaire), a été menée dans le cadre de cette thèse. Les sites investigués sont localisés en Hesbaye, au nord de Liège : Remicourt, Romont (à Ében-Émael) et Rocourt. L'analyse des résultats de ces investigations montre qu'il est possible d'établir des tendances communes aux trois cas étudiés.

Le résultat le plus remarquable concerne la mise en évidence de la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et le sommet de Pédocomplexe de Rocourt. Elle se matérialise par une augmentation brusque et importante de la résistance au cône du CPT. Ce paramètre peut d'ailleurs localement atteindre des valeurs inhabituelles pour du limon, supérieures à 20 MPa, au droit de l'Horizon blanchi de Momalle. Ce dernier ne représente pourtant qu'une dizaine de centimètres de puissance. D'autres marqueurs stratigraphiques ont également pu être définis sur les sites étudiés. Il s'agit de la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek (transition entre les lœss hesbayens et les lœss brabantiens), et la limite de décarbonatation des lœss superficiels. Ces deux marqueurs stratigraphiques sont caractérisés par une signature similaire sur la courbe d'évolution de la résistance au cône en fonction de la profondeur. Ils se marquent par une légère mais rapide augmentation de la résistance au cône. La position stratigraphique précise est confirmée par les mesures réalisées sur les affleurements présents, au moyen du pénétromètre de poche. Cependant, l'étude du site de Rocourt montre une limitation de la méthode d'investigation dans l'identification de certains horizons. En effet, les horizons composés de la partie supérieure du Pédocomplexe de Rocourt et du Complexe Humifère de Remicourt ont été affectés par la solifluxion. Cette dernière eut probablement pour conséquence de modifier les propriétés mécaniques intrinsèques de ces horizons. La transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle y est dès lors nettement moins marquée dans l'analyse de la résistance au cône.

L'origine des variations de la résistance au cône au droit des différents marqueurs stratigraphiques définis, n'est pas encore bien comprise à ce stade. Des analyses complémentaires à plus petites échelles sont nécessaires pour apporter des réponses à ces observations. Les chapitre 5 (échelle macroscopique) et chapitre 6 (échelle microscopique) contribueront à étayer les observations issues de l'analyse de la résistance au cône. Cette étude sera réalisée essentiellement au départ des échantillons prélevés par les forages carottés effectués sur le site de Romont.

Les marqueurs stratigraphiques ainsi définis offrent des potentialités intéressantes en lien avec la prospection archéologique. En effet, une majorité d'artefacts lithiques belges du Paléolithique moyen ont été découverts au sein de la partie supérieure du Pédocomplexe de Rocourt et dans la Complexe Humifère de Remicourt. L'essai de pénétration statique constitue une technique d'investigation permettant d'identifier la présence ou non de ces horizons. Éventuellement couplée à un forage, elle permet également de s'affranchir des rares affleurements présents en contexte loessique. L'essai de pénétration statique semble apporter de nouvelles perspectives d'investigation applicables à l'archéologie préventive en contexte loessique.

Un autre aspect analysé dans le cadre de ce chapitre concerne la comparaison des mesures obtenues par les différents types de pointes du CPT. Cela a été réalisé sur le site de Romont uniquement. Aucune différence notable n'a été observée sur la mesure de la résistance au cône, entre les pointes électrique et mécaniques M1 et M2. Ces résultats se rapportent au matériau limoneux investigué. La résistance du frottement latéral local issue de la pointe électrique et de la pointe mécanique M2, semble par contre plus complexe à

#### CHAPITRE 4. ÉTUDE À L'ÉCHELLE LOCALE

analyser. Les mesures enregistrées par la pointe M2 ne semblent pas cohérentes avec les valeurs attendues pour un tel matériau. Le déplacement du manchon de frottement de la pointe M2 ne serait plus suffisant au-delà d'une certaine profondeur, pour mobiliser l'entièreté de la résistance au frottement.



**Chapitre 5 :**  
**Étude à l'échelle macroscopique**



## 1. Introduction

Sur les trois sites présentés préalablement et ayant fait l'objet d'une campagne d'essais in situ, le site de Romont (Ében-Émael) est à l'origine de l'ensemble des investigations faisant l'objet de ce chapitre. La campagne d'essais in situ, ainsi que la description du front de taille, ont permis de préciser la localisation des différents horizons qui composent la séquence lœssique. Plusieurs marqueurs stratigraphiques ont été mis en évidence sur base de l'évolution de la résistance au cône du CPT. Les marqueurs les plus remarquables sont représentés par la succession entre le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle. Les analyses menées dans ce chapitre vont donc se focaliser aux alentours des marqueurs stratigraphiques précédemment soulignés, et plus particulièrement au droit des deux horizons les plus remarquables. Cette étude est réalisée en laboratoire au départ d'échantillons non remaniés prélevés par forage sur le site de Romont. Elle correspond à une échelle macroscopique équivalente à celle de l'échantillon. Elle a pour objectif de compléter et de préciser les caractéristiques physiques et mécaniques de la séquence lœssique.

Ce chapitre se compose de quatre sections principales. La première introduit les différents essais réalisés en laboratoire. La seconde présente une analyse vis-à-vis de la classification des sols. La troisième partie reprend les résultats obtenus au sujet de la déformabilité du matériau étudié. La quatrième partie consiste en une analyse de la résistance mécanique du limon.

Certains passages de ce chapitre ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques ou actes de conférence :

- Delvoie, S., Charlier, R. & Collin, F., 2016b. In situ and laboratory mechanical characterization of a loess sequence from Middle Belgium. *Proceedings of the "34èmes Rencontres de l'AUGC"*, University of Liège, Liège, Belgium, 25-27 May.

## 2. Démarche expérimentale suivie

Ce chapitre consiste à caractériser en laboratoire les différents horizons stratigraphiques mis en évidence par la campagne d'essais in situ de Romont. La caractérisation est réalisée au moyen d'essais géotechniques relativement classiques, variés et complémentaires, tels que l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'essai œdométrique, l'essai triaxial et l'essai de cisaillement direct. Les échantillons analysés en laboratoire sont issus des trois forages carottés réalisés sur le site de Romont, et plus particulièrement du forage F1 qui occupe une position centrale au sein de la campagne d'investigation in situ.

L'analyse menée sur le lœss est orientée d'une part vers une caractérisation des propriétés physiques et mécaniques moyennes relatives à l'ensemble de la séquence lœssique. Complémentairement, l'étude des caractéristiques propres aux différents horizons stratigraphiques qui composent la séquence, permet également d'appréhender l'hétérogénéité du matériau, ainsi que les caractéristiques intrinsèques de ces horizons. Une étude est également menée en vue de tenter de distinguer la base de la séquence lœssique des dépôts marins oligocènes présents sur le site de Romont. Ces derniers n'ont en effet pas pu être identifiés au moyen des essais in situ.

Ainsi, le limon est caractérisé en vue d'y appliquer la classification internationale des sols (USCS). Les caractéristiques de déformabilité du matériau sont ensuite étudiées au moyen d'essais œdométriques réalisés en condition saturée. Une étude succincte sur la susceptibilité à l'effondrement du lœss est également abordée. Les caractéristiques de résistance au cisaillement sont finalement présentées au moyen des essais triaxiaux et de cisaillement direct. La plupart de ces essais ont été réalisés à la teneur en eau in situ, en condition non drainée.

Les résultats de la caractérisation physique et mécanique du limon sont également comparés aux résultats issus de l'interprétation des données acquises au moyen du CPT. Cette analyse permet de confronter les deux approches, et de vérifier quelques relations très fréquemment employées en géotechnique. Les résultats obtenus pour la classification internationale des sols (USCS) sont d'abord comparés avec les diagrammes de classification des sols basés sur les données du CPT. Ensuite, la résistance au cône du CPT est reliée à l'indice de compression mesuré par l'essai œdométrique. Enfin, une approche est proposée pour estimer les variables  $c_u$  et  $\phi_u$  moyennes du limon, au moyen notamment de la résistance au cône du CPT.

### 3. Méthodes expérimentales principales

Dans cette section sont présentés les différents essais géotechniques en laboratoire réalisés sur les échantillons collectés au moyen des forages carottés réalisés sur le site de Romont (Ében-Émael).

#### 3.1. Préparation des échantillons

Les trois forages réalisés sur le site de Romont ont permis de prélever, par battage, un total de 73 échantillons carottés. Ces derniers sont conservés dans une gaine en PVC étanche d'un diamètre de 100 mm et d'une longueur de 50 cm. La technique d'échantillonnage a été développée dans le chapitre 4. Au laboratoire, 21 carottes ont été analysées. Certaines d'entre elles ont été subdivisées en une moitié supérieure et une moitié inférieure, portant le nombre total d'échantillons différents à 24. Le forage F1, qui occupe une position centrale sur le site investigué de Romont (Figure 4-14), est à l'origine de 18 échantillons analysés. Celui-ci est dès lors au cœur de l'analyse expérimentale présentée dans ce chapitre. La Figure 5-1 présente la position stratigraphique qu'occupent les échantillons analysés en laboratoire, en la comparant à l'interprétation issue de la résistance au cône ( $q_c$ ) de l'essai de pénétration statique le plus proche du forage correspondant. Le Tableau 5-1 reprend les différents essais qui ont été réalisés sur chacun des échantillons analysés.

Au laboratoire, les échantillons ont été extraits de leur gaine plastique. À ce stade, force est de constater que, malgré les précautions prises lors du prélèvement et de l'extraction, les échantillons présentent, de façon plus ou moins marquée, un réseau de plans de discontinuité perpendiculaire à l'axe de la carotte. Ceux-ci correspondent probablement à l'enfoncement par à coups du carottier, en lien avec les coups de mouton lors de son battage dans le sol. La technique d'échantillonnage utilisée semble donc avoir affecté, à des degrés divers selon les couches, le matériau à l'échelle de la carotte. Cela n'aura cependant que peu de conséquences sur la confection des éprouvettes utilisées pour l'essai œdométrique, car elles représentent une hauteur de 2 cm seulement. Le matériau analysé par l'essai œdométrique, est considéré comme étant « non remanié ». La situation est très différente dans le cas des éprouvettes triaxiales. Celles-ci correspondent à une hauteur de l'ordre de 80 mm pour un diamètre de 35 mm. Les nombreux plans de discontinuité ont empêché la confection non remaniée de la plupart des éprouvettes testées. Ces dernières ont dès lors dû être confectionnées à partir du matériau remanié. Les autres essais de laboratoire réalisés dans cette étude (granulométrie, limites d'Atterberg et essai de cisaillement direct), sont effectués à partir de matériau remanié.

Une fois extraite, la carotte est découpée en différents fragments qui serviront à la confection des éprouvettes et aux différents essais. Une attention particulière a été portée sur les échantillons servant aux essais œdométriques, triaxiaux et de cisaillement direct, en vue de conserver la teneur en eau in situ.

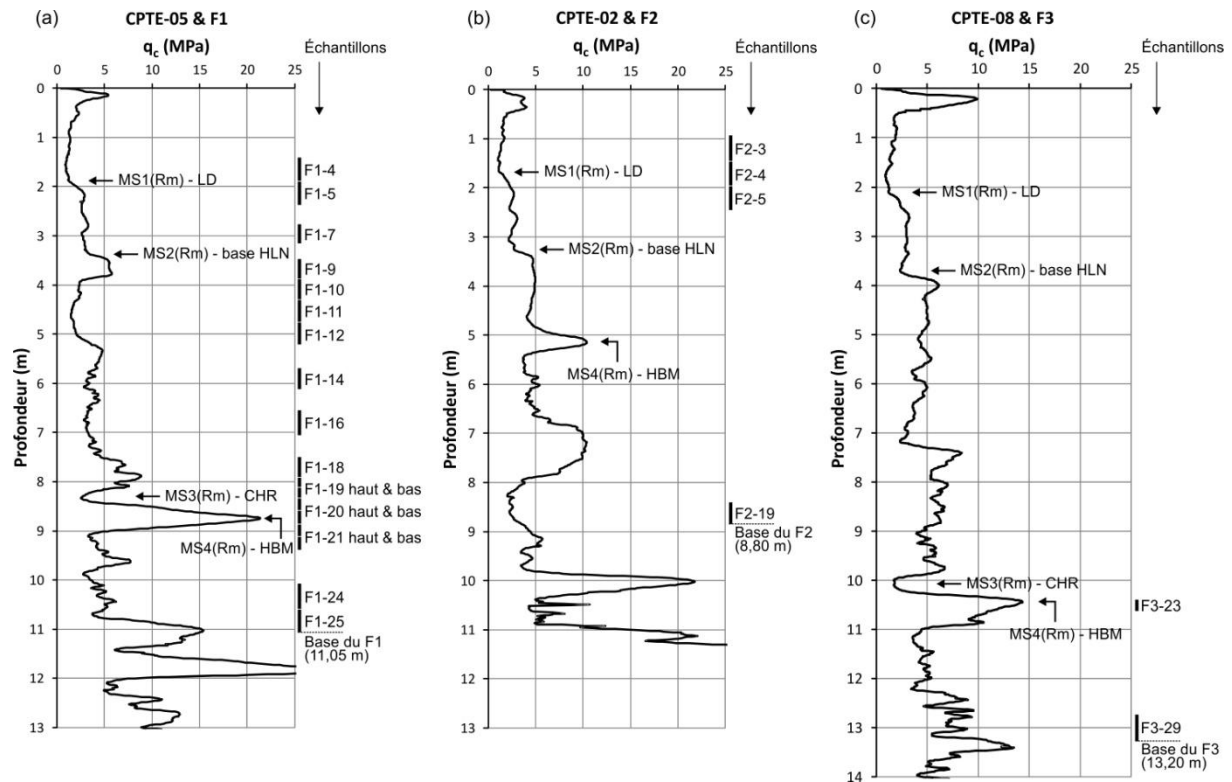


Figure 5-1 : Position stratigraphique des échantillons analysés au laboratoire. (a) Positions des échantillons issus du forage F1, comparées à l'interprétation stratigraphique du CPTe-05. (b) Positions des échantillons issus du forage F2, comparées à l'interprétation stratigraphique du CPTe-02. (c) Positions des échantillons issus du forage F3, comparées à l'interprétation stratigraphique du CPTe-08. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation.

Tableau 5-1 : Synthèse des essais de caractérisation physique et mécanique réalisés sur les échantillons issus des forages sur le site de Romont (Ében-Émael). Abréviations liées à la caractérisation : Cis. = essai de cisaillement direct ; Gran. = granulométrie (tamisage et sédimentométrie) ; L.A. = limites d'Atterberg ; N/A = non applicable ;  $\mathcal{C}ed.$  = essai œdométrique ; Perm. œd. = perméabilité à l'œdomètre ; Triax. CU/UU = essai triaxial CU/UU. Abréviations liées à la stratigraphie : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Échantillon	Profondeur (m)	Position stratigraphique	Caractérisation physique					Caractérisation mécanique				
			L.A.	Gran.	w	$\gamma_h$	$\gamma_s$	$\mathcal{C}ed.$	Perm. œd.	Triax. UU	Triax. CU	Cis.
F1-4	1,40-1,85	Horizon Bt holocène										
F1-5	1,85-2,35	Limon brabantien sous LD										
F1-7	2,80-3,15	HLN										
F1-9	3,50-3,85	Limon hesbayen sous HLN										
F1-10	3,85-4,30	Harveng ?										
F1-11	4,30-4,75	Harveng ?										
F1-12	4,75-5,20	Limon sus-jacent à MAL										
F1-14	5,70-6,10	Complexe stratifié inférieur										
F1-16	6,55-7,05	Complexe stratifié inférieur										
F1-18	7,50-7,90	Complexe stratifié inférieur										
F1-19 haut	7,90-8,35	CHR – partie supérieure										
F1-19 bas	7,90-8,35	CHR – partie inférieure								N/A		
F1-20 haut	8,35-8,85	Transition CHR et HBM	N/A							N/A		
F1-20 bas	8,35-8,85	Transition HBM et VSG-B	N/A							N/A		
F1-21 haut	8,85-9,35	VSG-B										
F1-21 bas	8,85-9,35	VSG-B								N/A		
F1-24	10,10-10,55	Base du PR										
F1-25	10,55-11,05	Sous PR										
F2-3	0,95-1,45	Horizon Bt holocène										
F2-4	1,45-1,95	Horizon Bt holocène										
F2-5	1,95-2,45	Limon brabantien sous LD										
F2-19	8,40-8,80	Sous PR ?										
F3-23	10,40-10,60	HBM										
F3-29	12,80-13,20	Sous PR										

### 3.2. Essais de caractérisation physique

Ces essais ont été réalisés au sein du Laboratoire de géotechnologies de l'Université de Liège. Ils sont constitués de l'analyse granulométrique, de la détermination des limites d'Atterberg, et du pycnomètre à gaz.

#### 3.2.1. Analyse granulométrique

La détermination d'une courbe granulométrique complète se réalise au moyen de deux techniques complémentaires : par tamisage et par sédimentométrie (LCPC, 1963a ; NF P 94-057, 1992 ; NF P 94-056, 1996 ; ISO/TS 17892-4, 2004). L'essai par tamisage consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau granulaire en plusieurs catégories de tailles de grains décroissantes. Le refus cumulé sur chaque tamis est alors pesé. La masse correspondante est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse. L'analyse granulométrique par tamisage permet de couvrir une gamme granulométrique allant de 76,2 mm à 74  $\mu\text{m}$ . La sédimentométrie mesure la vitesse de décantation des grains fins plongés dans une solution aqueuse au repos. La loi de Stokes (éq. 5-1) relie, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, le diamètre équivalent des grains et la vitesse de sédimentation. Cette méthode s'applique aux grains inférieurs à 74  $\mu\text{m}$ .

$$d = \sqrt{\frac{18 \eta v}{(\rho_s - \rho_w) g}} \quad (5-1)$$

où :

- d = le diamètre équivalent des particules,
- $\eta$  = la viscosité dynamique de la solution,
- v = la vitesse de sédimentation,
- g = l'accélération de la pesanteur, et
- $\rho_s$  et  $\rho_w$  = la masse volumique, respectivement du solide et de l'eau.

Concrètement, les fractions granulométriques supérieures à 2,38 mm sont d'abord déterminées, par tamisage à sec au moyen d'une colonne de tamis d'ouverture de mailles décroissante vers le bas (Figure 5-2 (a)). Le refus cumulé de chaque tamis est alors pesé. Ensuite, une fraction de 50 à 100 g du tamisat recueilli sous le tamis de 2,38 mm, est utilisée pour la sédimentométrie. Les particules sont alors mélangées avec quelques grammes de défloculant (hexaméthaphosphate de sodium). Le tout est introduit dans une burette graduée dont le volume d'eau est porté à 1 l. Les particules sont mises en suspension avant de débiter les mesures. La burette est alors placée dans un bain thermostatique d'une température constante de 20°C (Figure 5-2 (c)). Un aréomètre (Figure 5-2 (b)) est introduit dans la solution à différents moments. Il permet de mesurer l'évolution de la densité de la solution en fonction du temps. L'aréomètre est calibré pour être en équilibre avec une solution d'une certaine densité connue. Les particules en suspension dans la solution sédimentent progressivement. La densité de la solution évolue donc également. L'aréomètre suit cette évolution en s'enfonçant dans la solution. Une tige graduée intégrée à l'aréomètre permet de mesurer ce déplacement au cours du temps, correspondant à la vitesse de sédimentation des particules utilisée dans la loi de Stokes (éq. 5-1). Les lectures sont réalisées après un temps de sédimentation correspondant à : 1', 2', 5', 15', 45', 2h, 5h et 24h.

Une fois la sédimentométrie terminée, le contenu de la burette est versé dans un tamis de 74  $\mu\text{m}$ . Le tamisat est évacué puisqu'il a été déterminé par sédimentométrie. Le refus est alors séché avant d'être tamisé par voie sèche au travers d'une colonne de tamis de taille



intermédiaire, à savoir : 1,190 mm ; 0,590 mm ; 0,297 mm ; 0,149 mm. Le refus cumulé de chaque tamis est finalement pesé.

L'ensemble de ces mesures permet de tracer la courbe granulométrique représentant le pourcentage de passant ou de refus cumulé en fonction des diamètres des grains. Ces derniers sont représentés en abscisses suivant une échelle logarithmique.

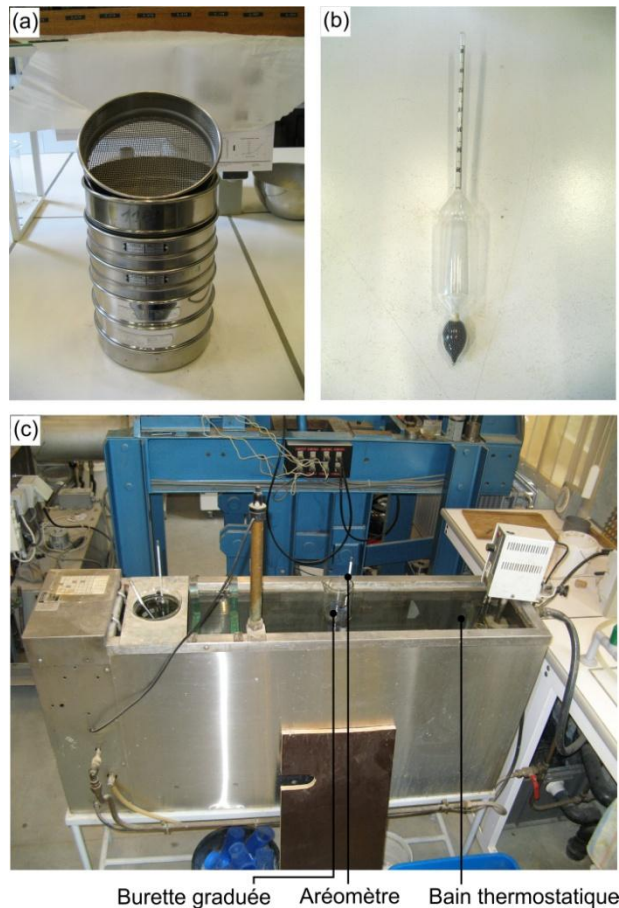


Figure 5-2 : Photographies de divers équipements servant à l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie. (a) Colonnes de tamis. (b) Aréomètre gradué utilisé pour la sédimentométrie. (c) Vue d'ensemble d'un essai de sédimentométrie en cours.

### 3.2.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol (LCPC, 1987 ; NF P 94-051, 1993). La limite de liquidité ( $w_L$ ) équivaut à la teneur en eau au point de transition entre les états liquide et plastique d'un sol. La limite de plasticité ( $w_P$ ) correspond à la teneur en eau au point de transition entre les états plastique et solide d'un sol. L'étendue du domaine plastique est définie par l'indice de plasticité ( $I_P$ ) qui équivaut à la différence entre les limites de liquidité et de plasticité :

$$I_P = w_L - w_P \quad (5-2)$$

Préalablement à la détermination des limites de consistance physique du sol, l'échantillon est séché et tamisé au tamis de 420  $\mu\text{m}$ . Une quantité d'environ 200 g de tamisat est alors utilisée pour la suite des manipulations. L'échantillon est ensuite humidifié et malaxé de manière à obtenir une pâte homogène.

La limite de liquidité ( $w_L$ ) se détermine classiquement au moyen de l'appareil de Casagrande (Figure 5-3 (b)). Ce dernier se compose d'une coupelle, d'un socle, d'une

manivelle et d'une came permettant de soulever la coupelle. Environ 70 g de l'échantillon de sol sont d'abord répartis dans la coupelle au moyen d'une spatule. Le remplissage de la coupelle doit respecter l'asymétrie illustrée à la Figure 5-3 (a). Au moyen de l'outil à rainurer (Figure 5-3 (b)), la pâte est partagée en deux moitiés par la formation d'une rainure. La came est ensuite actionnée manuellement afin de soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de deux coups par seconde. Le nombre de chocs (N) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm est alors enregistré. Pour que l'essai soit valide, il faut un nombre de coups compris entre 15 et 35. Approximativement 5 g de pâte sont ensuite prélevés au voisinage de l'endroit où les lèvres se sont refermées, afin d'en déterminer la teneur en eau correspondante. L'opération complète est effectuée au moins à quatre reprises sur la même pâte, mais à des teneurs en eau différentes. La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture des lèvres de la rainure sur 1 cm, après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (log N, w). Elle peut également être déterminée au moyen de la relation suivante :

$$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121} \quad (5-3)$$

La limite de plasticité ( $w_P$ ) est réalisée à partir d'une boulette de pâte (échantillon humidifié). Cette boulette est alors roulée sous la paume de la main de façon à obtenir un rouleau qui s'amincit progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint  $3 \pm 0,5$  mm. La partie centrale du rouleau est alors prélevée afin de déterminer sa teneur en eau. Au total, l'ensemble de ces opérations est réalisé trois fois. La limite de plasticité correspond à la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues par chaque essai.

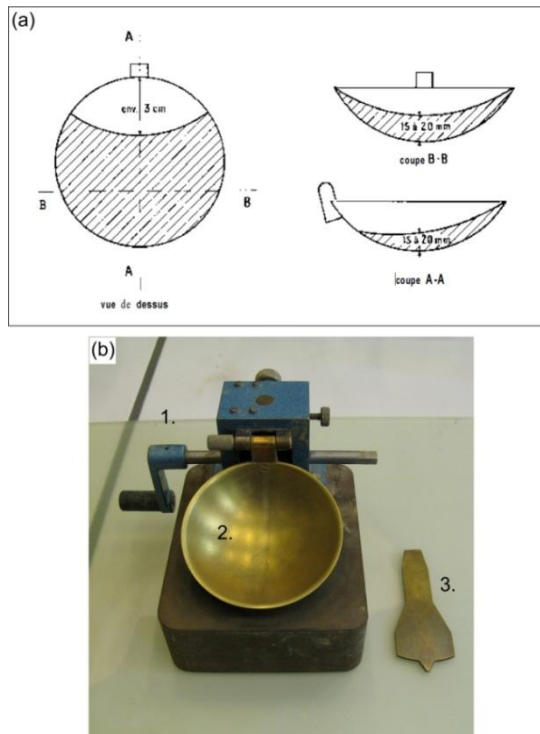


Figure 5-3 : Mesure de la limite de liquidité. (a) Schéma du remplissage de la coupelle de Casagrande avec l'échantillon (modifié, d'après NF P 94-051, 1993). (b) Photographie de l'équipement utilisé : 1. appareil de Casagrande ; 2. coupelle de Casagrande ; 3. outil à rainurer.

### 3.2.3. Pycnomètre à gaz

Le pycnomètre à gaz permet de déterminer le volume d'un échantillon solide (ISO 8130-2, 1992). En mesurant préalablement la masse de l'échantillon sec ( $m_s$ ), il est alors possible de déterminer la masse volumique des grains ( $\rho_s$ ). Quelques grammes d'échantillon sont nécessaires à l'essai. Ce dernier consiste à injecter un gaz à une pression donnée ( $P_i$ ) dans une enceinte de référence de volume connu ( $V_r$ ). Ensuite, ce gaz est détendu dans l'enceinte de mesure, de volume connu ( $V_m$ ), contenant l'échantillon. La pression résiduelle ( $P_f$ ) du gaz est mesurée. Le volume de l'échantillon ( $V_s$ ) peut alors être déterminé par application de la loi de Mariotte, pour une température constante au cours de l'essai :

$$V_s = V_m - V_r \left( \frac{P_i}{P_f} - 1 \right) \quad (5-4)$$

d'où,

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (5-5)$$

L'équipement utilisé lors des essais, correspond au MultiVolume Pycnometer 1305. Le gaz utilisé pour les mesures est l'hélium. La méthode s'applique particulièrement bien aux matériaux granulaires car le gaz pénètre dans les espaces intergranulaires.

## 3.3. Essais de caractérisation mécanique

Ces essais ont été réalisés au sein du Laboratoire de géotechnologies de l'Université de Liège. Ils se composent de l'essai œdométrique, de l'essai triaxial et de l'essai de cisaillement direct.

### 3.3.1. Essai œdométrique

L'essai œdométrique se réalise sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide, appelée œdomètre. L'éprouvette est soumise à un effort axial vertical. En cours d'essai, elle est maintenue saturée et est drainée par ses faces supérieure et inférieure. La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge (LCPC, 1963b ; XP P 94-090-1, 1997).

L'éprouvette est d'abord confectionnée au laboratoire. Pour ce faire, l'échantillon est délicatement introduit dans la bague œdométrique (Figure 5-5 (b)). Cette dernière représente une section de 40 cm<sup>2</sup> et une hauteur de 2 cm, qui définissent donc les dimensions de l'éprouvette. La bague œdométrique est alors pesée afin de déterminer la masse volumique de l'échantillon. Sa teneur en eau est également mesurée. La bague œdométrique est introduite dans la cellule œdométrique, dont les différentes parties sont schématisées à la Figure 5-4 et illustrées à la Figure 5-5 (b). La cellule œdométrique est ensuite placée sur le bâti œdométrique (Figure 5-5 (a)), dont les rôles principaux sont : de supporter la cellule sans se déformer (déformations négligeables), et de maintenir sa base horizontale. Le montage de la cellule est alors finalisé à ce stade :

- la cellule est connectée au système de mise en saturation de l'échantillon ;
- le dispositif de mise en charge est positionné, mais aucun chargement n'est encore appliqué à l'échantillon ;
- le système de mesure du déplacement vertical est également placé. Il se compose de deux comparateurs positionnés de manière diamétralement opposée, permettant d'évaluer d'éventuels tassements différentiels (Figure 5-5 (a)). Les comparateurs utilisés sont capables de mesurer des déplacements verticaux de l'ordre du  $1/100^{\text{e}}$  de millimètre (Figure 5-5 (c)).

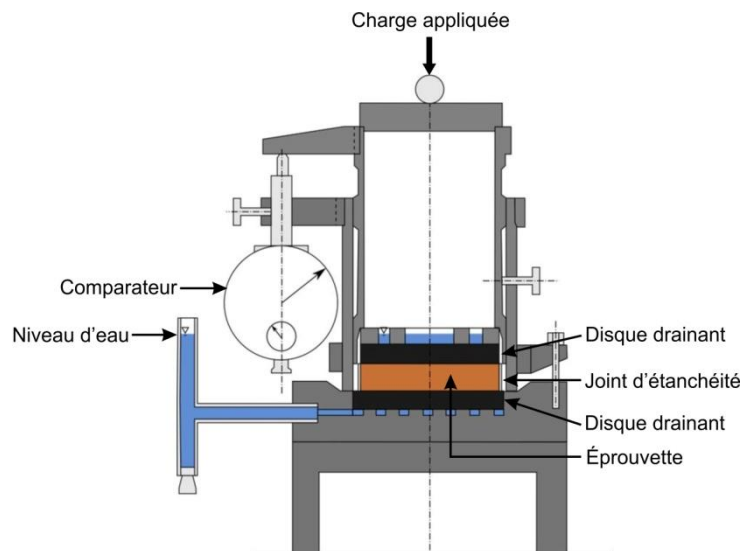


Figure 5-4 : Schéma d'une cellule œdométrique de type Terzaghi.

À ce stade, l'ensemble du dispositif est en place et l'essai peut réellement commencer. L'éprouvette est alors saturée. Le premier palier de chargement est ensuite appliqué à l'échantillon. Le déplacement vertical est mesuré durant une période d'au moins 24 h, en respectant le mieux possible les intervalles de temps suivants entre l'instant de l'application de la charge et la mesure : 0", 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 60', 2 h, 4 h, 8 h, 24 h. Les charges imposées à l'échantillon sont déterminées de manière à avoir un minimum de trois paliers de chargement avant d'atteindre la charge correspondant à la contrainte verticale effective in situ ( $\sigma'_{v0}$ ), dans le cas d'un sol normalement consolidé.

À la suite du palier de chargement le plus élevé, un déchargement de l'éprouvette est effectué, en passant par les mêmes charges atteintes lors des paliers de chargement. Pour le déchargement, les mesures de la déformation de l'éprouvette sont réalisées de manière moins fréquente que dans le cas du chargement, en raison des déformations moindres observées.

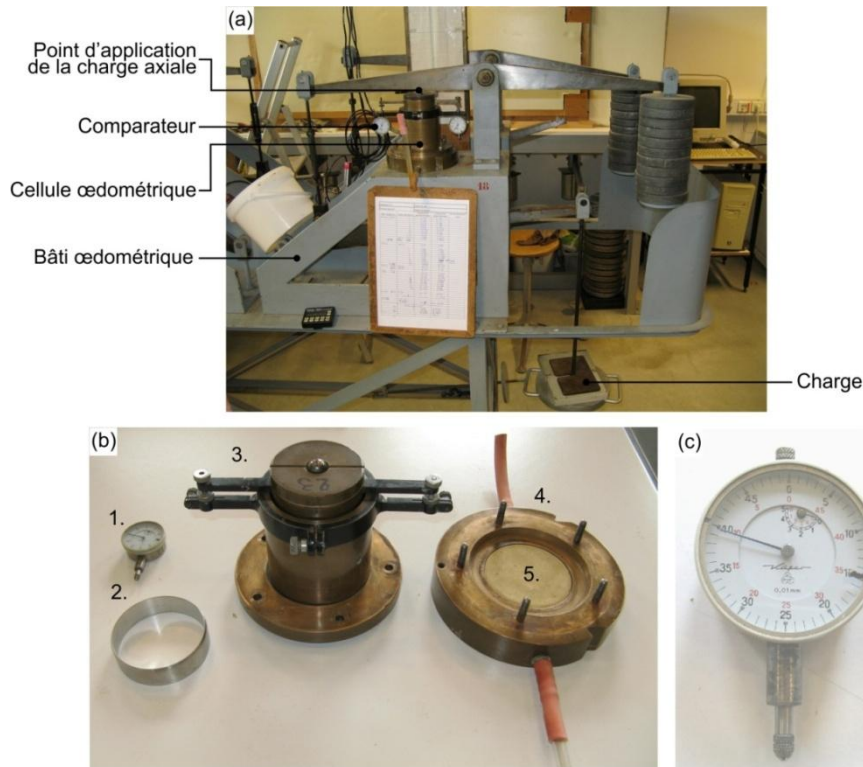


Figure 5-5 : Photographies de diverses parties servant à l'essai œdométrique. (a) Vue d'ensemble d'un essai œdométrique en cours de chargement. (b) Différents composants de la cellule œdométrique : 1. comparateur ; 2. bague œdométrique ; 3. partie supérieure de la cellule œdométrique ; 4. base de la cellule œdométrique ; 5. disque poreux inférieur. (c) Comparateur gradué au  $1/100^e$  de mm.

Au terme de l'essai œdométrique, les caractéristiques de compressibilité du matériau peuvent être déduites des résultats mesurés : coefficient de consolidation ( $c_v$ ), indice/constante de gonflement ( $C_s/A$ ), indice/constante de compression ( $C_c/C$ ), contrainte de préconsolidation ( $\sigma'_p$ ), module œdométrique ( $E_{\alpha d}$ ) et coefficient de compressibilité ( $m_v$ ). Chacun de ces paramètres est défini ci-après.

Pour chaque palier de chargement, il est possible de tracer la courbe de consolidation, qui représente l'évolution du tassement (lectures au comparateur) en fonction de la racine carrée du temps (méthode de la racine carrée ou méthode de Taylor) ou du logarithme de temps (méthode du logarithme ou méthode de Casagrande) (Figure 5-6). Ces graphiques permettent de calculer le **coefficient de consolidation** ( $c_v$ ) qui est défini par l'équation suivante :

$$c_v = \frac{T_v h^2}{t 4} \quad (5-6)$$

où :

- $c_v$  = le coefficient de consolidation verticale, exprimé en  $m^2/s$
- $T_v$  = le facteur de temps pour la consolidation verticale (pour une éprouvette drainée par ses faces supérieure et inférieure,  $T_v = 0,848$  pour  $U = 90 \%$  et  $T_v = 0,197$  pour  $U = 50 \%$ ).  $U$  équivaut au degré de consolidation primaire,
- $t$  = le temps nécessaire pour obtenir un certain degré de consolidation primaire ( $t_{50}$  pour la méthode du logarithme,  $t_{90}$  pour la méthode de la racine carrée), et
- $h$  = la hauteur de l'éprouvette œdométrique, lorsque celle-ci est drainée par les faces supérieure et inférieure.

La détermination de  $t_{50}$  ou de  $t_{90}$  résulte d'une construction graphique. Dans le cas de la méthode de la racine carrée (ou méthode de Taylor) (Figure 5-6 (a)), la partie droite de la courbe coupe l'axe des ordonnées en un point  $d_c$  qui correspond au zéro corrigé. Une droite de pente équivalente à 1,15 fois celle de la partie droite de la courbe, est ensuite tracée à partir du point  $d_c$ . L'intersection avec la courbe donne le point correspondant à 90 % de la consolidation primaire ( $t_{90}, d_{90}$ ). Avec la méthode du logarithme (ou méthode de Casagrande) (Figure 5-6 (b)), l'intersection entre les deux tangentes de la courbe donne le point correspondant à 100 % de la consolidation primaire ( $t_{100}, d_{100}$ ). Le zéro corrigé est obtenu en prenant un point A sur la courbe, au voisinage de 0,1 minute ( $t_A$ ). Un point B peut ensuite être trouvé sur la courbe, en considérant 4  $t_A$ . Le double de la distance verticale entre les points A et B est alors reporté à partir du point B, pour trouver le point C, dont l'ordonnée à l'origine correspond au zéro corrigé ( $d_c$ ). La lecture au comparateur correspondant à un degré de consolidation de 50 % ( $d_{50}$ ), est à mi-distance entre  $d_c$  et  $d_{100}$ . L'intersection avec la courbe donne accès au  $t_{50}$ .

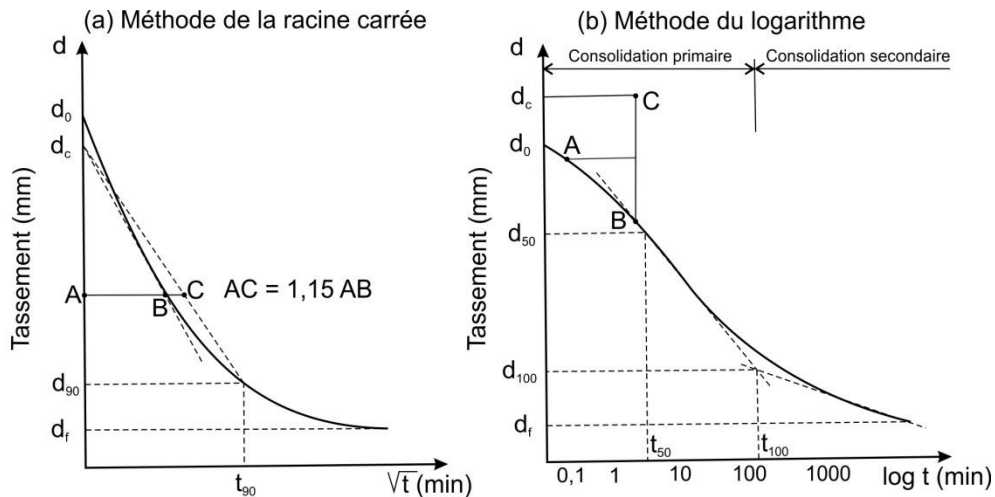


Figure 5-6 : Méthodes de construction graphique pour déterminer le temps correspondant à un degré de consolidation de 90 % ( $t_{90}$ ) ou de 50 % ( $t_{50}$ ). (a) Méthode de la racine carrée (ou méthode de Taylor). (b) Méthode du logarithme (ou méthode de Casagrande).

Par ailleurs, la courbe œdométrique permet de déterminer d'autres paramètres de compressibilité. Cette courbe relie les points expérimentaux représentés dans le diagramme  $e = f(\log \sigma'_v)$  ou bien  $\varepsilon_v = f(\ln \sigma'_v)$ . Sur ces graphiques, la courbe obtenue à l'issue d'un chargement/déchargement complet à l'œdomètre, présente classiquement l'allure indiquée à la Figure 5-7. Les paramètres qui figurent sur les axes sont :

- la déformation verticale ( $\varepsilon_v$ ), qui équivaut à :

$$\varepsilon_v = -\frac{H_f - H_i}{H_i} = \frac{|\Delta H|}{H_i} \quad (5-7)$$

où :

- $\varepsilon_v$  = la déformation verticale, et
- $H_i, H_f$  = la hauteur initiale et finale de l'éprouvette.

- l'indice des vides ( $e$ ), qui se calcule comme suit :

$$e_i = \frac{V_v}{V_s} \quad (5-8)$$

$$e_n = e_i - \frac{H_i - H_n}{H_i} (1 + e_i) \quad (5-9)$$

où :

- $e_i$  = l'indice des vides initial, avant chargement,
- $e_n$  = l'indice des vides correspondant à un chargement n donné,
- $V_s, V_v$  = le volume, respectivement du solide (des grains) et des vides, et
- $H_n$  = la hauteur de l'éprouvette atteinte après stabilisation de la déformation relative à un chargement n donné.

- la contrainte verticale effective ( $\sigma'_v$ ) à laquelle est soumis l'échantillon en cours d'essai œdométrique.

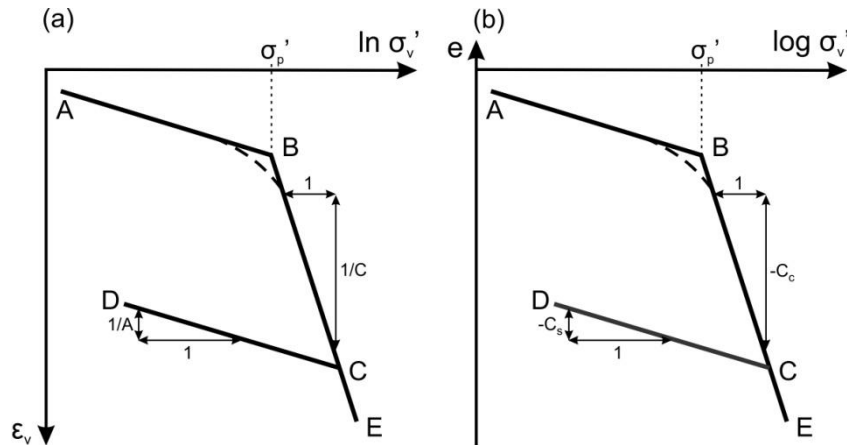


Figure 5-7 : Courbes œdométriques idéalisées. (a) Dans le graphique  $\varepsilon_v = f(\ln \sigma'_v)$ . (b) Dans le graphique  $e = f(\log \sigma'_v)$ .

La courbe œdométrique ainsi représentée (Figure 5-7), relative au chargement, décrit deux parties qu'il est possible de linéariser (entre A et B, et entre B et E). La première partie (entre A et B) correspond au comportement élastique du matériau. La pente de la droite reliant les points A et B permet de déterminer l'**indice de gonflement** ( $C_s$ ), sur le graphique  $e = f(\log \sigma'_v)$ , ou la **constante de gonflement** (A) sur le graphique  $\varepsilon_v = f(\ln \sigma'_v)$ . La seconde partie de la courbe (entre B et E) correspond au comportement plastique du matériau. La pente de la droite reliant les points B et C permet de déterminer l'**indice de compression** ( $C_c$ ), sur le graphique  $e = f(\log \sigma'_v)$ , ou la **constante de compression** (C) sur le graphique  $\varepsilon_v = f(\ln \sigma'_v)$ . Lors d'un déchargement (entre C et D), la pente de la courbe suit la pente de la partie élastique. Elle renseigne donc également sur les caractéristiques du comportement élastique du matériau. Les relations suivantes définissent les quatre paramètres mentionnés ci-dessus :

- l'indice de gonflement ( $C_s$ ), déterminé dans la partie élastique de la courbe de compressibilité :

$$C_s = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (5-10)$$

- l'indice de compression ( $C_c$ ), déterminé dans la partie plastique de la courbe de compressibilité :

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (5-11)$$



- la constante de gonflement (A), déterminée dans la partie élastique de la courbe de compressibilité :

$$A = \frac{\Delta \ln \sigma'_v}{\Delta \varepsilon_v} \quad (5-12)$$

- la constante de compression (C), déterminée dans la partie plastique de la courbe de compressibilité :

$$C = \frac{\Delta \ln \sigma'_v}{\Delta \varepsilon_v} \quad (5-13)$$

Toujours au moyen de la courbe œdométrique, la contrainte verticale correspondant au point B, situé à l'intersection des deux droites AB et BE, équivaut à la valeur de la **contrainte de préconsolidation** ( $\sigma'_p$ ) (Figure 5-7). Cette dernière peut se définir comme la contrainte verticale maximale que le sol ait subie au cours de son histoire, et que celui-ci ait mémorisée. Lorsqu'elle est comparée à la contrainte verticale effective in situ ( $\sigma'_{v0}$ ), trois états de consolidation du sol sont possibles :

- soit  $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$  : le sol est normalement consolidé. Autrement dit, le terrain n'a jamais été surchargé,
- soit  $\sigma'_p > \sigma'_{v0}$  : le sol est surconsolidé,
- soit  $\sigma'_p < \sigma'_{v0}$  : le sol est partiellement consolidé.

Le **module œdométrique** ( $E_{\text{œd}}$ ) correspond au module de déformation de l'échantillon. Il dépend de la valeur de la contrainte verticale effective et du chemin antérieur des contraintes. Il existe plusieurs façons de calculer un module œdométrique, tangent ou sécant. La norme ISO 17892-5 (2014) suggère de calculer le module œdométrique sécant ( $E_{\text{œd, sec}}$ ) de la façon suivante :

$$E_{\text{œd, sec}(n,n+1)} = \frac{\sigma'_{v(n+1)} - \sigma'_{v(n)}}{\varepsilon_{v(n+1)} - \varepsilon_{v(n)}} \quad (5-14)$$

Le **coefficient de compressibilité** ( $m_v$ ) correspond à l'inverse du module œdométrique, tel que,

$$m_v = E_{\text{œd}}^{-1} \quad (5-15)$$

Dans le cadre de cette thèse, l'œdomètre a également été utilisé pour déterminer le **coefficient de perméabilité** (k) des échantillons analysés. L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui a percolé au travers de l'échantillon, en fonction du temps. Cette quantité d'eau se détermine en relevant la variation du niveau d'eau dans un tube gradué situé en amont de l'échantillon. L'essai consiste en un perméamètre à charge variable (NF X 30-442, 2008). Un schéma de l'équipement est illustré à la Figure 5-8. Le coefficient de perméabilité (k) se détermine comme suit :

$$k = \frac{a L}{A (t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (5-16)$$



où :

- $k$  = le coefficient de perméabilité, exprimé en m/s,
- $a$  = la section du tube gradué amont,
- $A$  = la section de l'échantillon,
- $t_1$  et  $t_2$  = le temps entre le début de l'essai et la mesure du niveau d'eau, respectivement  $h_1$  et  $h_2$ , et
- $h_1$  et  $h_2$  = le niveau d'eau mesuré sur le tube gradué amont, aux temps respectivement  $t_1$  et  $t_2$ .

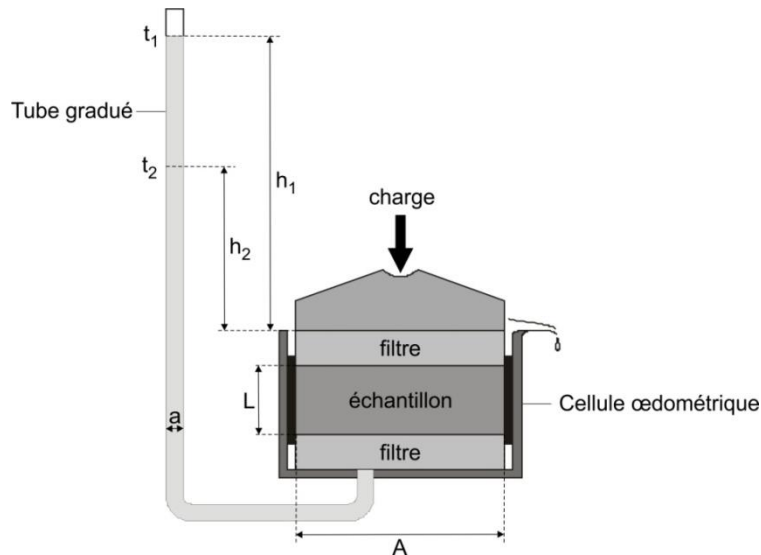


Figure 5-8 : Schéma d'un perméamètre à charge variable au moyen d'une cellule œdométrique.

### 3.3.2. Essai triaxial

L'essai triaxial se réalise sur des éprouvettes cylindriques dont l'élancement est proche de deux. Chaque éprouvette est placée dans une cellule étanche où elle est soumise à un champ de contraintes axisymétrique, représenté par une contrainte latérale ou de confinement ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) et une contrainte axiale ( $\sigma_1$ ). L'essai classique consiste à accroître la contrainte axiale, tout en maintenant la contrainte de confinement constante, jusqu'à atteindre la rupture de l'éprouvette. L'essai se réalise sur trois éprouvettes à des contraintes de confinement différentes. Au terme de l'essai, les paramètres de résistance mécanique tels que, la cohésion ( $c$ ) et l'angle de frottement interne ( $\phi$ ), peuvent être déduits (LCPC, 1968 ; NF P 94-074, 1994).

La première étape consiste à confectionner les éprouvettes dont les dimensions équivalent approximativement à 50 mm de diamètre pour 100 mm de hauteur, ou à 35 mm de diamètre pour 70 mm de longueur. Idéalement, les éprouvettes sont confectionnées à partir du matériau non remanié. Lorsque cela n'a pas été possible, elles ont été reconstituées dans un moule de dimension équivalente, à partir d'un échantillon remanié, à la densité et à la teneur en eau in situ. Ensuite, la surface latérale de l'éprouvette est recouverte d'une membrane souple imperméable (Figure 5-10 (a)). Une pierre poreuse, complétée d'un papier-filtre, sont également placés sur les faces supérieures et inférieures de l'éprouvette, avant que cette dernière soit positionnée dans la cellule triaxiale.

La cellule triaxiale comporte une base et une embase inférieure au travers desquelles passent différents circuits permettant (Figure 5-9, Figure 5-10 (a)) :

- de mettre la cellule triaxiale en pression de confinement (C1). Pour ce faire, c'est de l'eau qui est utilisé,
- de drainer l'échantillon (C2, C3),
- de mesurer les pressions interstitielles au sein de l'échantillon (C4).

L'éprouvette est également bordée à sa face supérieure par une embase supérieure considérée comme étant indéformable sous les contraintes appliquées. Les parois latérales de la cellule triaxiales sont composées par une enceinte transparente devant résister aux pressions mises en œuvre (Figure 5-9, (Figure 5-10 (b))). La partie supérieure de la cellule triaxiale est constituée d'un couvercle, d'un piston axial servant à cisailier l'échantillon en cours d'essai, et d'un capteur de force axiale (Figure 5-9, (Figure 5-10 (b))).

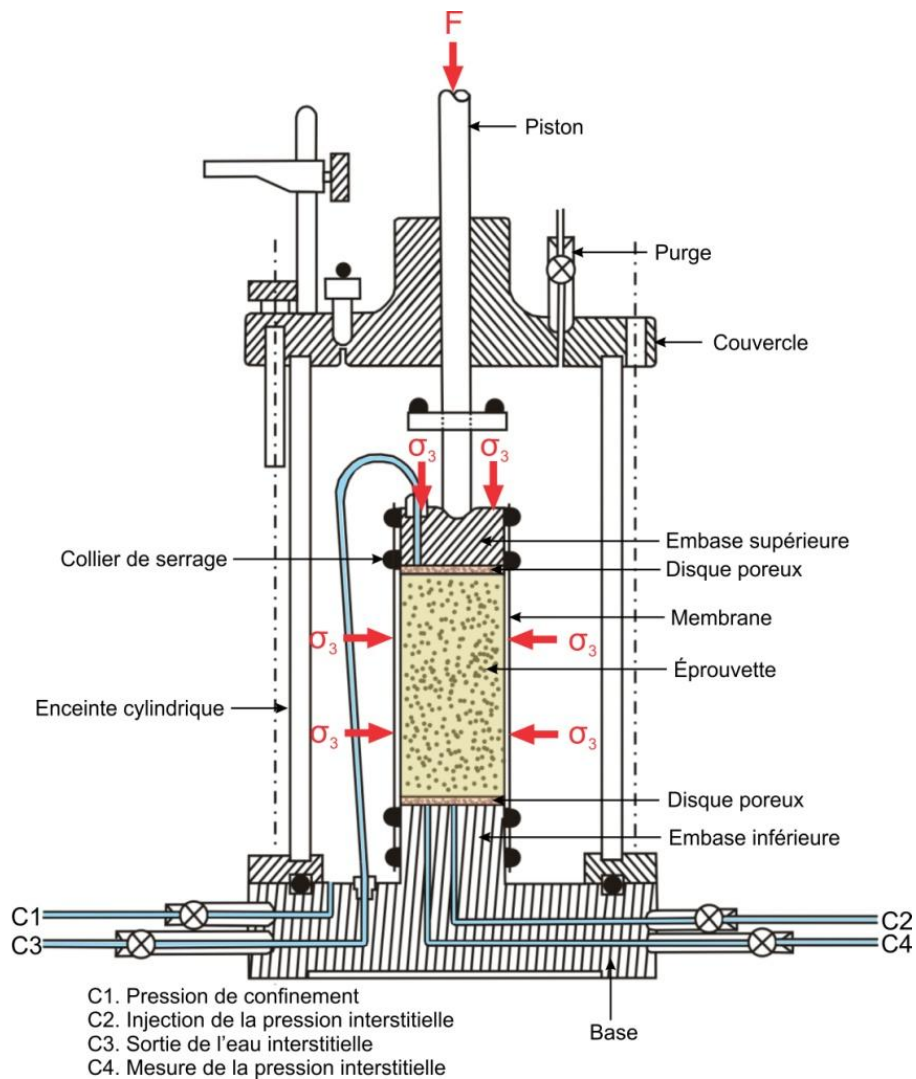


Figure 5-9 : Schéma d'une cellule triaxiale. Indication des contraintes qui agissent sur l'éprouvette en cours de cisaillement.

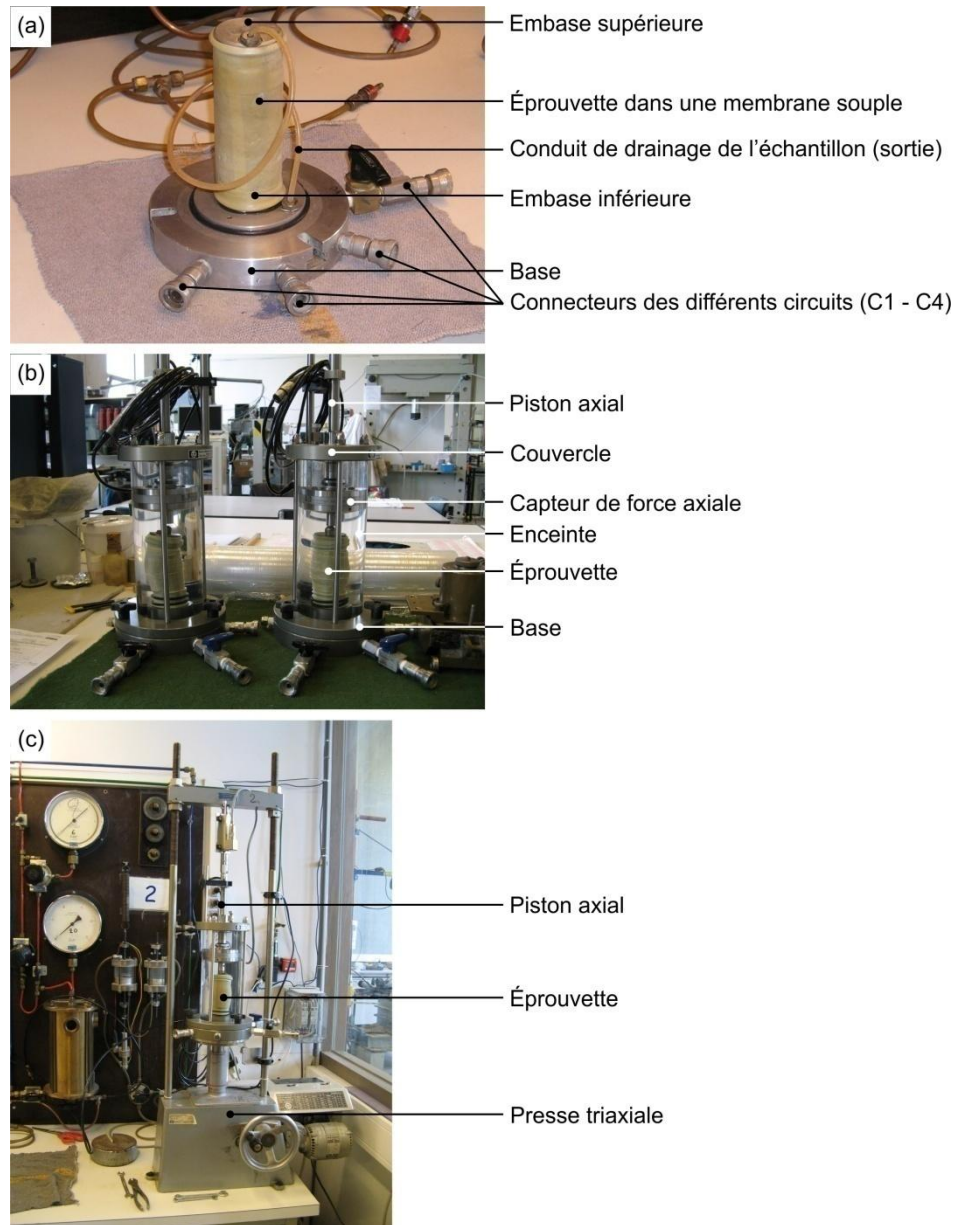


Figure 5-10 : Illustration des différents composants d'une cellule triaxiale. (a) Montage de l'éprouvette dans la cellule triaxiale. (b) Cellule triaxiale montée. (c) Cellule triaxiale positionnée sur la presse triaxiale utilisée pour le cisaillement de l'éprouvette.

L'essai débute habituellement par une mise en saturation de l'éprouvette. Ensuite, une étape de consolidation peut être appliquée. Elle consiste à consolider l'éprouvette par accroissement de la contrainte de confinement, tout maintenant le circuit de drainage de l'échantillon ouvert. Lorsque cette phase de consolidation a lieu, l'essai est qualifié de « consolidé ». Elle permet à l'échantillon d'être dans un état de contraintes définies, avant de débiter le cisaillement. Le confinement est maintenu jusqu'à ce que la pression interstitielle n'évolue plus. Enfin, le cisaillement proprement dit de l'éprouvette est réalisé. Pour ce faire, la cellule triaxiale est positionnée sur la presse triaxiale (Figure 5-10 (c)). Le cisaillement consiste à accroître la contrainte axiale au moyen du piston axial. Celui-ci se déplace à vitesse constante jusqu'à la rupture de l'échantillon. La contrainte de confinement est quant à elle maintenue constante. La phase de cisaillement peut être effectuée en maintenant le circuit de drainage de l'échantillon ouvert. L'essai est alors « drainé ». Elle peut aussi se réaliser sans drainage de l'échantillon. Dans ce cas, l'essai est qualifié de « non drainé ». En pratique, il

existe trois types d'essais triaxiaux : non consolidé – non drainé (UU), consolidé – non drainé (CU) et consolidé – drainé (CD). Quelques caractéristiques de chacun des types d'essais triaxiaux sont présentées dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Principales différences entre les types d'essais triaxiaux. CD = essai consolidé - drainé ; CU = essai consolidé - non drainé ; UU = essai non consolidé - non drainé.

	Saturation de l'éch.	Consolidation	Drainage durant cisaillement	Commentaires
UU	Non	Non	Non	Essai rapide, pas de mesure de la pression interstitielle en cours de cisaillement
CU	Oui	Oui	Non	Essai relativement lent pour permettre l'homogénéisation de la pression interstitielle, mesure de la pression interstitielle en cours de cisaillement
CD	Oui	Oui	Oui	Essai très lent pour éviter les variations de la pression interstitielle, mesure de la pression interstitielle en cours de cisaillement

L'essai se termine lorsque la rupture de l'éprouvette est atteinte. Les critères de rupture habituellement définis sont (Figure 5-11) :

- le maximum de la contrainte déviatorique ( $q_f$ ) telle que,

$$q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{F}{A} \quad (5-17)$$

où :

- $q_f$  = la contrainte déviatorique à la rupture,
- $\sigma_1$  = la contrainte axiale,
- $\sigma_3$  = la contrainte latérale ou de confinement,
- F = la force axiale exercée par le piston, et
- A = la surface de la section courante de l'échantillon initialement cylindrique.

- le maximum du rapport des contraintes principales,  $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$  ou  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ .
- une valeur de déformation verticale ( $\epsilon_v$ ) prédéfinie, par exemple  $\epsilon_v = 15\%$ .

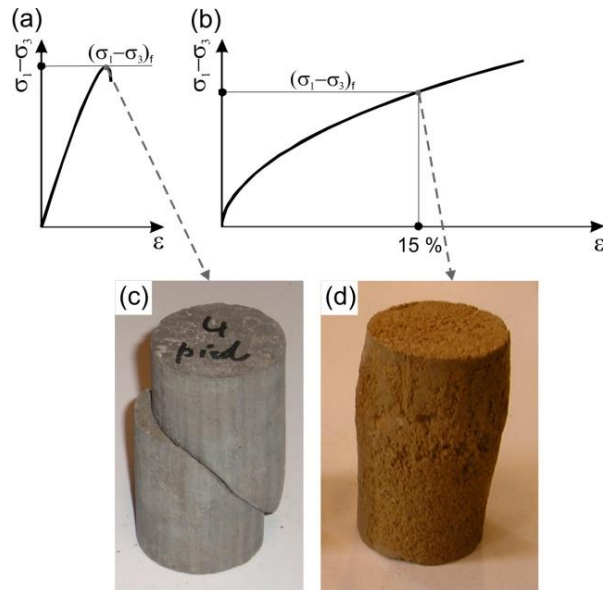


Figure 5-11 : Critères de rupture d'une éprouvette triaxiale. (a) et (c) Rupture avec plan de cisaillement. (b) et (d) Rupture en forme de tonneau.

Les différentes contraintes et forces agissant sur l'éprouvette sont représentées sur la Figure 5-12 suivante.

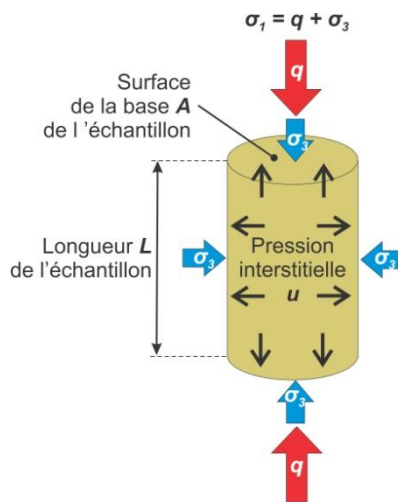


Figure 5-12 : Schéma des différentes forces et contraintes qui agissent sur l'éprouvette durant son cisaillement.

Trois éprouvettes sont nécessaires pour obtenir les caractéristiques mécaniques de résistance du matériau. Le protocole expérimental est identique pour les trois éprouvettes, avec comme seule différence, la contrainte de confinement ( $\sigma_3$ ). Les valeurs obtenues pour  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  à la rupture, pour chacune des éprouvettes, sont reportées sur le graphique  $\tau = f(\sigma)$ . L'équation de la droite de Mohr-Coulomb, tangente aux trois cercles de Mohr obtenus expérimentalement, donne accès à la cohésion ( $c$ ) et à l'angle de frottement ( $\phi$ ) (Figure 5-13). Les essais triaxiaux CD et CU permettent de déterminer les caractéristiques effectives du matériau ( $c'$  et  $\phi'$ ), au moyen de la mesure de la pression interstitielle. Les essais triaxiaux UU donnent accès aux caractéristiques apparentes du matériau ( $c_u$  et  $\phi_u$ ). L'équation de Mohr-Coulomb s'écrit comme suit, selon le type d'essai triaxial réalisé :

$$|\tau_f| = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5-18)$$

$$|\tau_f| = c_u + \sigma \tan \phi_u \quad (5-19)$$

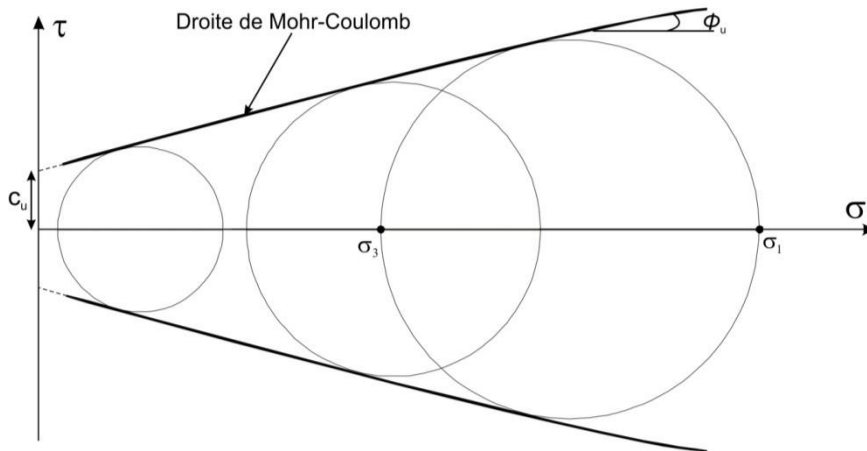


Figure 5-13 : Exemple de résultats obtenus à l'issue d'un essai triaxial UU sur trois éprouvettes. Représentation des cercles de Mohr correspondant aux trois éprouvettes testées, et de la droite de Mohr-Coulomb, tangente aux trois cercles.

Il est également fréquent de représenter le chemin de contrainte dans le plan  $p'$ - $q$  ou  $p$ - $q$  (Figure 5-14). Un chemin de contrainte correspond à l'évolution de l'état de contrainte dans l'échantillon, en cours d'essai. Dans ce plan, la variable  $q$  équivaut à la contrainte déviatorique (éq. 5-17) et la variable  $p$  correspond à la contrainte moyenne, telle que :

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad (5-20)$$

La droite de régression linéaire sur les trois points expérimentaux à la rupture, correspondant à la droite de Mohr-Coulomb dans le plan  $p$ - $q$  ou  $p'$ - $q$ , donne également accès à  $c$  et  $\phi$ . Son équation vaut :

$$q = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} (p + c/\tan \phi) \quad (5-21)$$

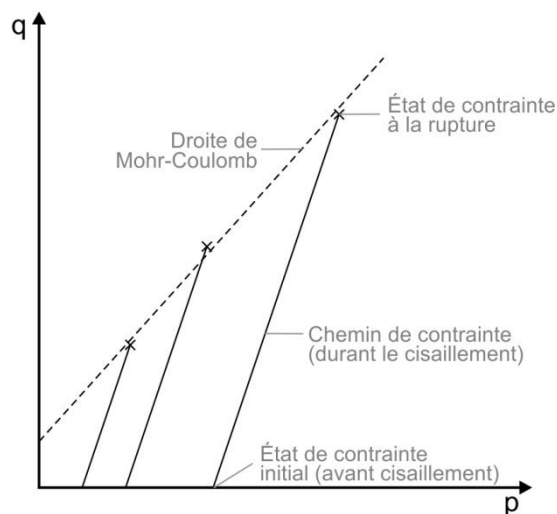


Figure 5-14 : Exemple de résultat d'un essai triaxial UU à partir de trois éprouvettes, représenté dans le plan  $p$ - $q$ .

## 3.3.3. Essai de cisaillement direct

Une éprouvette de sol est placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le cisaillement de l'éprouvette correspond au plan de séparation des deux demi-boîtes. L'essai consiste à appliquer, sur la face supérieure de l'éprouvette, une force verticale (N) constante durant toute la durée de l'essai. Une fois l'éprouvette consolidée sous cet effort vertical, un déplacement relatif des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre, est imposé. Ce déplacement se réalise à vitesse constante et engendre le cisaillement de l'éprouvette, selon un plan imposé correspondant au plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes. L'effort horizontal de cisaillement (T) est mesuré au cours de l'essai. Tout comme l'essai triaxial, l'essai de cisaillement direct aboutit à la détermination des caractéristiques de résistance mécanique du matériau, à savoir, la cohésion (c) et l'angle de frottement ( $\phi$ ). Pour ce faire, trois éprouvettes par échantillons sont nécessaires (LCPC, 1966 ; NF P 94-071-1, 1994).

Les éprouvettes analysées ont été reconstituées à partir du matériau échantillonné, en veillant à conserver la densité et la teneur en eau in situ. L'échantillon a ainsi été mis en place manuellement dans les deux demi-boîtes. L'éprouvette cylindrique représente une section de 20 cm<sup>2</sup> et une hauteur de 10 mm (Figure 5-15 (a)). Les deux demi-boîtes sont ensuite positionnées sur un chariot (Figure 5-15 (b)), lui-même placé sur le banc de cisaillement (Figure 5-15 (c)). Le chariot se déplace avec la demi-boîte inférieure en cours de cisaillement. Un piston axial (Figure 5-15 (a)) est également placé au droit de la face supérieure de l'éprouvette. Son rôle consiste à transmettre l'effort axial à l'échantillon. Le piston n'est pas en contact avec l'éprouvette durant le montage du dispositif. Ce n'est qu'au moment de la phase de consolidation qu'il est en contact avec l'éprouvette et que la charge axiale est appliquée. Cette étape de consolidation consiste à mesurer la déformation axiale en fonction du temps. La phase de cisaillement débute lorsque la déformation liée à la consolidation de l'éprouvette devient négligeable. Le cisaillement est réalisé à mi-hauteur de l'éprouvette. Il consiste à déplacer la demi-boîte inférieure par rapport à la demi-boîte supérieure, à vitesse constante. La résistance au cisaillement est mesurée régulièrement au cours du cisaillement, au moyen d'un anneau dynamométrique. L'essai prend fin lorsque la rupture est atteinte ou que la déformation atteint une certaine valeur seuil (par exemple, 10 % de la déformation horizontale relative).

Trois éprouvettes, testées à des efforts normaux différents, sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques de résistance mécanique de l'échantillon. Les contraintes normales et tangentiels obtenues à la rupture sont alors reportées sur le graphique  $\tau = f(\sigma)$ . La droite de régression linéaire sur les points expérimentaux correspond à la droite de Mohr-Coulomb et donne accès à la cohésion (ordonnée à l'origine) et à l'angle de frottement (pente de la droite) (Figure 5-16).

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (5-22)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (5-23)$$

où :

- N et T = les forces normale et tangentielle,
- $\sigma$  et  $\tau$  = les contraintes normale et tangentielle, et
- A = la surface de cisaillement qui tient compte du déplacement relatif des deux demi-boîtes.



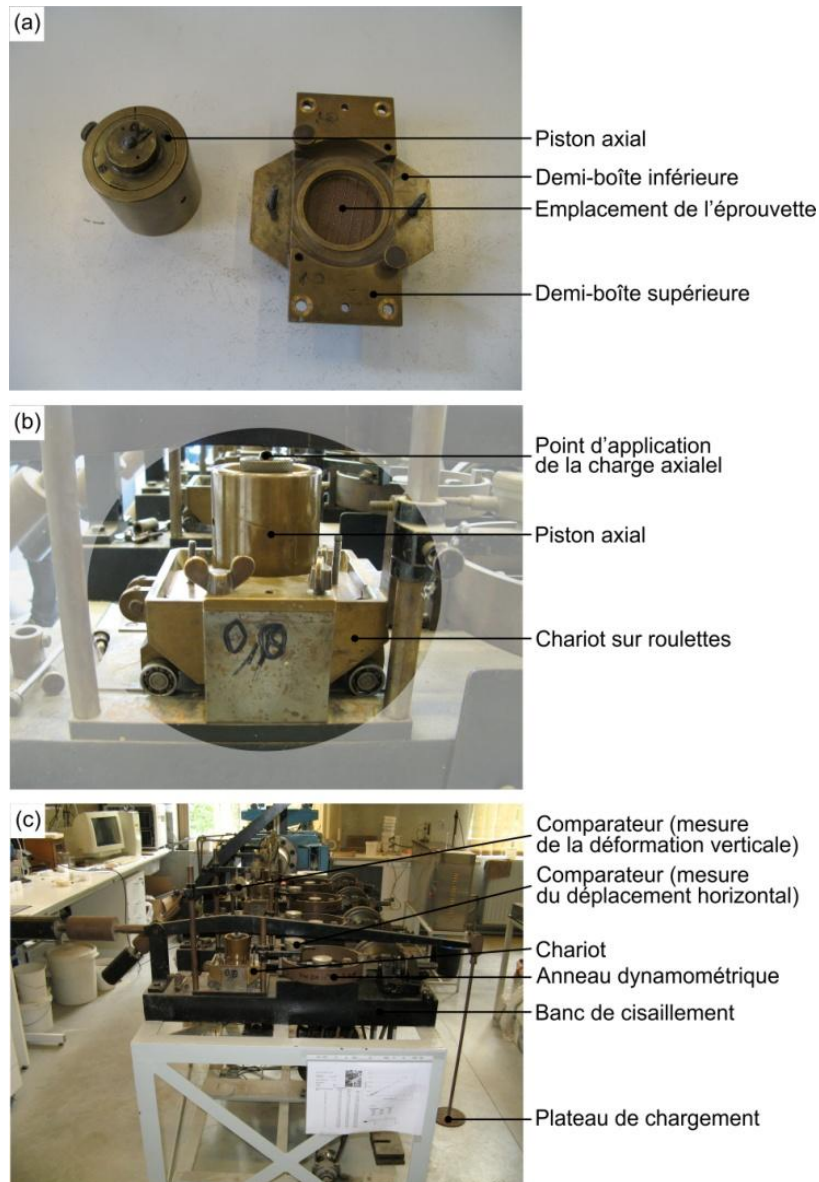


Figure 5-15 : Illustration des différents composants utilisés pour l'essai de cisaillement direct. (a) Les deux demi-boîtes et le piston axial. (b) Le chariot servant au cisaillement. (c) Le banc de cisaillement.

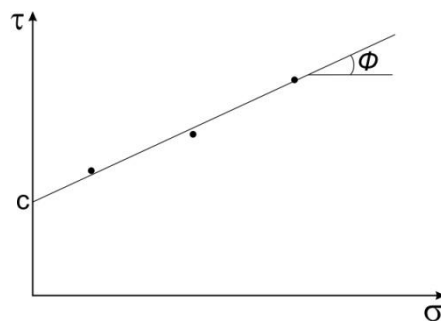


Figure 5-16 : Exemple de résultats obtenus à l'issue d'un essai de cisaillement direct sur trois éprouvettes.



## 4. Classification des sols

La détermination du type de sol se réalise très couramment. Elle peut se baser sur la granulométrie uniquement, sur la granulométrie et les limites d'Atterberg (classification internationale des sols, USCS), ou encore sur les données issues d'un essai de pénétration statique. Dans cette section, les résultats des analyses granulométriques et des limites d'Atterberg sont présentés. Ils sont utilisés dans la classification internationale USCS. Les systèmes de classification des sols définis sur base du CPT sont ensuite développés. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux issus des mesures en laboratoire.

Les résultats sont présentés de manière globale, en incluant l'ensemble des mesures réalisées. Ils sont également développés de manière plus fine, en individualisant quelques horizons particuliers, définis au chapitre 4, qui composent la séquence lœssique. Cette seconde analyse permet alors d'évaluer la variabilité des caractéristiques des horizons entre eux.

Une partie de cette section est également consacrée à l'identification de la base de la séquence lœssique. Cette dernière n'a pas pu être identifiée au moyen des tomographies électriques, ni des essais de pénétration statique (voir chapitre 4).

### 4.1. Classification internationale des sols (USCS)

Le système de classification internationale des sols (« Unified Soil Classification System » ou USCS ; ASTM D2487-06, 2006) se base sur les données de laboratoire issues de l'analyse granulométrique, de la limite de liquidité, et de l'indice de plasticité. Cette classification permet d'attribuer, de manière objective, un nom à un échantillon granulaire. Elle subdivise d'abord les sols grossièrement grenus, caractérisés par plus de 50 % en poids d'éléments de taille supérieure à 74  $\mu\text{m}$ , et les sols finement grenus, dont le passant à 74  $\mu\text{m}$  est supérieur à 50 % en poids. Tous les échantillons étudiés dans le cadre de cette thèse correspondent à des sols finement grenus. La Figure 5-17 illustre les critères utilisés dans la classification internationale des sols, pour les échantillons fins.

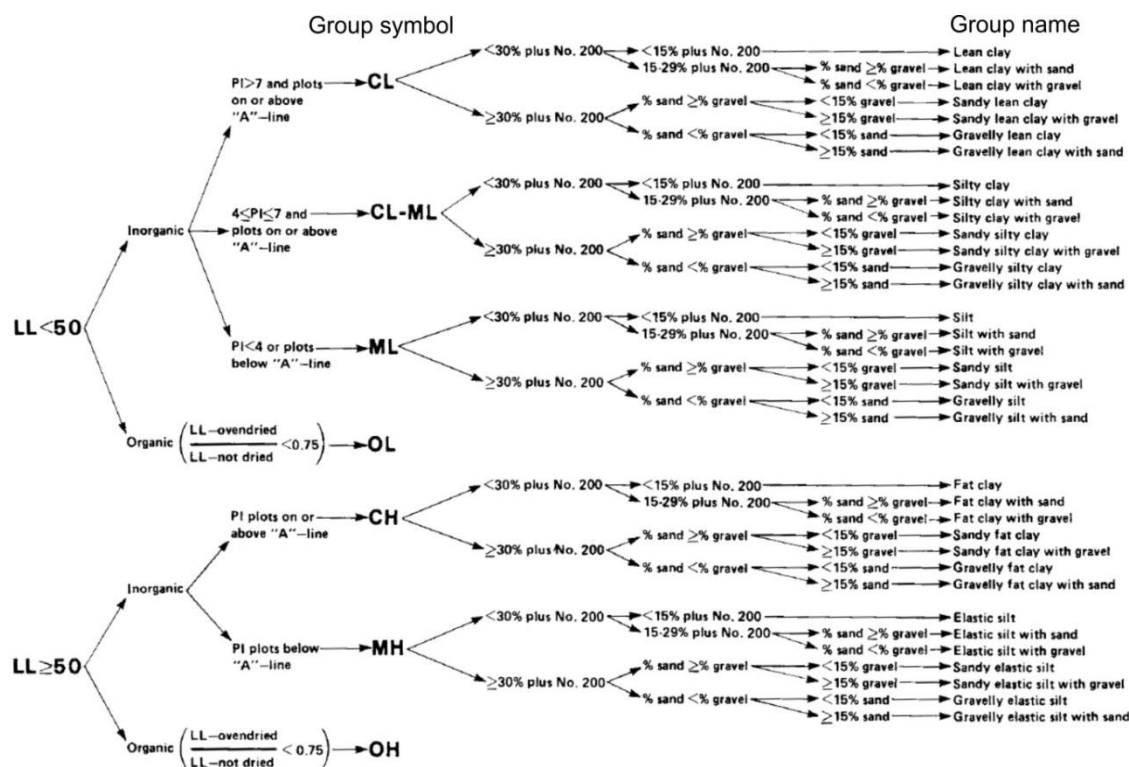


Figure 5-17 : Organigramme de la classification des sols finement grenus ( $\geq 50$  % de passant à  $74 \mu\text{m}$  (= tamis No. 200) ; modifié, d'après ASTM D2487-06, 2006). Abréviations : LL = limite de liquidité ; PI = indice de plasticité.

Avant d'appliquer la classification internationale des sols aux échantillons analysés en laboratoire, les résultats de l'analyse granulométrique et des limites d'Atterberg sont présentés ci-après. Cette analyse aboutit ensuite à la dénomination des types de sol étudiés, au moyen de la classification internationale des sols.

L'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie a été réalisée sur un total de 17 échantillons (Tableau 5-1). Ces derniers permettent de caractériser les dépôts loessiques du site de Romont, ainsi que d'évaluer l'hétérogénéité de leur distribution granulométrique. Dans l'objectif de vérifier la présence potentielle de dépôts marins issus de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern sous-jacente au loess, les échantillons les plus profonds issus des trois forages (F1-25, F2-19 et F3-29) ont également été analysés. La Figure 5-18 synthétise la distribution granulométrique de l'ensemble des échantillons étudiés. Il en ressort une relative homogénéité, caractérisée par un fuseau granulométrique assez étroit. Les courbes granulométriques se présentent sous la forme d'une sigmoïde asymétrique dont la branche supérieure (sable) est très limitée par rapport à la branche inférieure (limon fin et argile). La médiane ( $D_{50}$ ) se situe entre 20 et 30  $\mu\text{m}$ , de manière comparable au loess du nord de la France (Antoine, 2002). La majorité des grains qui composent les échantillons sont issus des classes granulométriques correspondant au limon, en référence au système de classification international (Tableau 5-3 ; ISO 14688-1, 2002), basé sur l'analyse granulométrique uniquement. Ce système est donc différent de la classification USCS, puisque cette dernière fait également intervenir les limites d'Atterberg. D'une façon plus quantitative, la Figure 5-19 reprend les valeurs du refus cumulé correspondant à chacune des sous-catégories de sol susmentionnées (ISO 14688-1, 2002). La sous-catégorie appartenant au limon (Si) est largement prédominante, avec une valeur moyenne de refus cumulé de 68,2 % en poids. Les sous-catégories attribuées à l'argile (Cl) et au sable (Sa) représentent chacune une proportion granulométrique moyenne proche de 15 %.

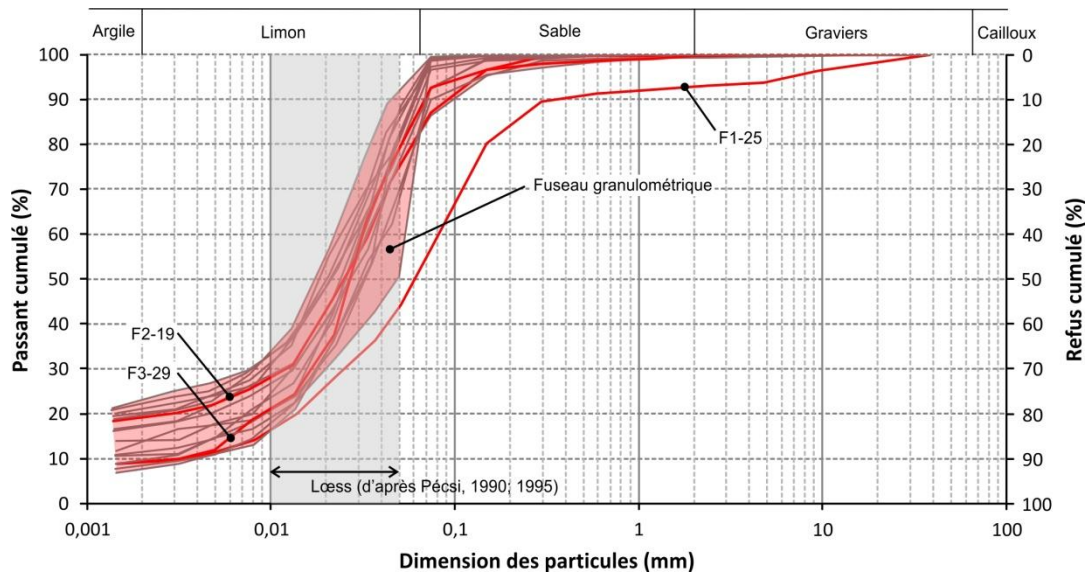


Figure 5-18 : Courbe granulométrique correspondant à l'ensemble des échantillons analysés au laboratoire. La distinction entre les différentes catégories de sol fait référence à la norme ISO 14688-1, 2002. La gamme granulométrique appartenant au loess est également mentionnée (d'après Pécsi, 1990, 1995).

Tableau 5-3 : Nomenclature des catégories de sol en fonction de la fraction granulométrique (d'après ISO 14688-1, 2002).

Catégorie de sol	Sous-catégorie de sol	Symbole	Taille des particules (mm)
Sol très grenu	Bloc (« Boulder »)	Bo	> 200
	Cailloux (« Cobble »)	Co	> 63 à 200
Sol grenu	Gravier (« Gravel »)	Gr	> 2,0 à 63
	Sable (« Sand »)	Sa	> 0,063 à 2,0
Sol fin	Limon (« Silt »)	Si	> 0,002 à 0,063
	Argile (« Clay »)	Cl	$\leq 0,002$

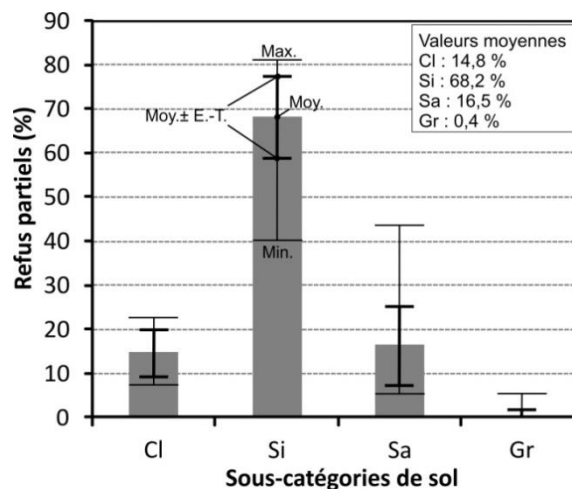


Figure 5-19 : Refus partiels pour chacune des sous-catégories de sol selon la norme ISO 14688-1, 2002. Les gammes granulométriques correspondantes sont mentionnées dans le Tableau 5-3.

Au moyen des coefficient d'uniformité ( $c_U$ ) et coefficient de courbure ( $c_C$ ), il est possible de caractériser l'étalement des courbes granulométriques obtenues. Les coefficients se définissent comme suit :

$$c_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5-24)$$

$$c_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (5-25)$$

où :

$D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  = les diamètres des particules correspondant à un passant cumulé de, respectivement, 10 %, 30 % et 60 %.

La norme ISO 14688-2 (2004) renseigne sur la classification à employer pour caractériser la courbe granulométrique au départ de ces coefficients (Tableau 5-4). Plus  $c_U$  est grand, plus le sol est gradué, c'est-à-dire, plus la courbe granulométrique est étalée. La détermination des coefficients prend en compte la variable  $D_{10}$ . Or, cette dernière n'est accessible que pour 5 des 17 échantillons analysés, en raison de la fraction argileuse relativement élevée rencontrée. Les valeurs moyennes obtenues pour  $c_U$  et  $c_C$  valent respectivement 12,9 et 2,5. Ces résultats mènent à la dénomination d'un sol moyennement à fortement gradué. La courbe granulométrique est donc moyennement à fortement étalée.

Tableau 5-4 : Classification des sols basée sur la forme de la courbe granulométrique (modifié, d'après ISO 14688-2, 2004).

Forme de la courbe granulométrique	$c_U$	$c_C$
Fortement gradué	$> 15$	$1 \leq c_C \leq 3$
Moyennement gradué	$6 \leq c_U \leq 15$	$< 1$
Faiblement gradué	$< 6$	$< 1$
Lacune granulométrique	Habituellement élevé	Habituellement $< 0,5$

L'analyse granulométrique des dépôts lœssiques peut également être réalisée en fonction de la profondeur. De cette manière, il devient alors possible de caractériser les différents horizons stratigraphiques qui composent la séquence lœssique, et d'évaluer leur hétérogénéité relative. La Figure 5-20 représente l'évolution de la proportion des différentes sous-catégories de sol (ISO 14688-1, 2002), en fonction de la profondeur. L'échantillon F1-25 (profondeur de 10,80 m) possède des caractéristiques granulométriques assez différentes du reste de la séquence. Cet échantillon est clairement plus grossier. La sous-catégorie prédominante est représentée par le sable, contrairement aux autres échantillons où le limon est largement majoritaire. Il ne présente pas les caractéristiques classiques d'un lœss. Cet échantillon pourrait provenir de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern sous-jacente, qui se compose de sable fin, de limon et d'argile (Laga, 1988). Il pourrait également être issu d'une couche remaniée, incluant des dépôts plus grossiers, intercalée entre deux horizons lœssiques. En effet, des niveaux sablo-graveleux, intercalés dans une séquence lœssique, sont fréquents. Un tel niveau semble d'ailleurs avoir été observé par E. Meijs (s.d.) au sommet du Sol de Pottenberg (Figure 4-15), au droit du site de Romont. Les observations menées sur la séquence de Rocourt attestent également la présence d'horizons sablo-graveleux, à différentes positions stratigraphiques (Figure 4-33, Pirson *et al.*, 2016). Suite à ce résultat, les

échantillons les plus profonds prélevés au départ des forages F2 (F2-19, profondeur de 8,60 m) et F3 (F3-29, profondeur de 13,00 m) ont également été analysés d'un point de vue granulométrique. Ces deux échantillons supplémentaires présentent des caractéristiques granulométriques comparables au lœss (Figure). Ceci indique donc, qu'à ces profondeurs, la séquence lœssique semble toujours bien présente, mais également que la base des lœss n'est pas identifiable au moyen des forages.

Par ailleurs, la proportion de la fraction argileuse ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) est relativement variable au sein de la séquence lœssique (Figure 5-20 (a)). Elle diminue significativement sous la limite de décarbonatation. L'Horizon blanchi de Momalle montre également une faible proportion de la fraction argileuse, inférieure à 10 %, alors que celle-ci augmente brusquement dans l'horizon sous-jacent, correspondant au Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Des études ont montré que l'Horizon blanchi de Momalle correspond à un horizon éluvié (Haesaerts, 1999 ; Haesaerts *et al.*, 2016). Les particules argileuses ont alors percolé au sein du lœss et se sont accumulées dans l'horizon sous-jacent, qui par conséquent devient illuvié. La variation de la proportion de la fraction argileuse au droit de la partie supérieure du Pédocomplexe de Rocourt (incluant le Sol de Villers-Saint-Ghislain B et l'Horizon blanchi de Momalle) reflète assez bien ce phénomène. La fraction argileuse est également habituellement plus abondante au sein de certains types de paléosols qu'au droit des horizons lœssiques dépourvus de paléosols (p. ex. sol brun lessivé, sol gris forestier) (Antoine *et al.*, 2013).

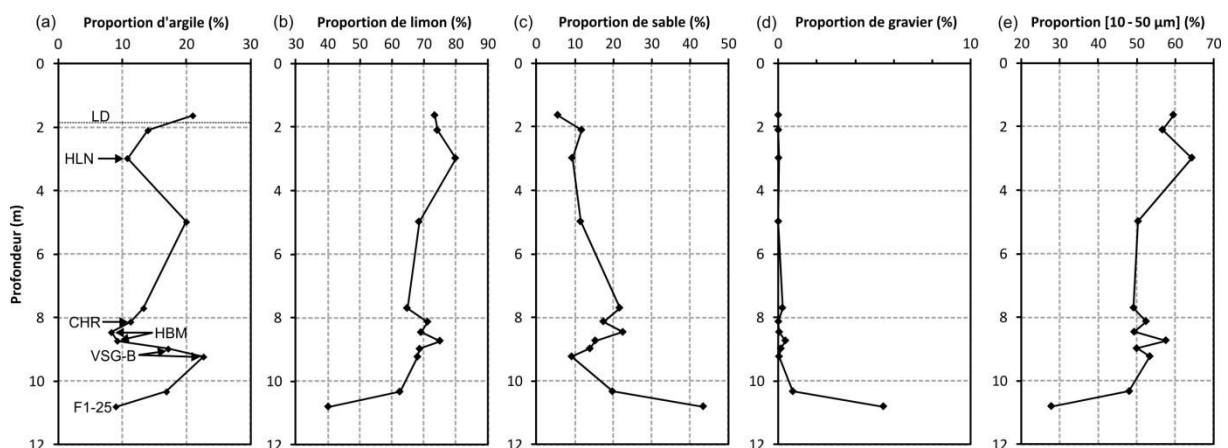


Figure 5-20 : Évolution de différentes gammes granulométriques en fonction de la profondeur, pour le forage F1 réalisé sur le site de Romont. (a) Proportion d'argile ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) ; (b) Proportion de limon ( $> 2 - 63 \mu\text{m}$ ) ; (c) Proportion de sable ( $> 63 \mu\text{m} - 2,0 \text{ mm}$ ) ; (d) Proportion de gravier ( $> 2,0 - 63 \text{ mm}$ ) ; (e) Proportion  $10 - 50 \mu\text{m}$ , proposée par M. Pécsi (1990, 1995) dans sa définition du lœss. Les gammes granulométriques mentionnées sont définies par la norme ISO 14688-1, 2002. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Dans la définition du lœss, développée au chapitre 3, M. Pécsi (1990, 1995) indique que ce matériau comporte généralement en moyenne entre 50 et 70 % en poids de particules comprises entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . Les analyses granulométriques réalisées dans le cadre de cette thèse sont en mesure de vérifier ce critère. La valeur moyenne obtenue équivaut à 52,5 % (en excluant l'échantillon F1-25, assez différent des autres échantillons), en accord avec le critère de M. Pécsi. L'évolution de la proportion de cette gamme granulométrique avec la profondeur est présentée à la Figure 5-20 (e).

Enfin, il est intéressant de signaler que l'analyse stratigraphique de la variabilité de la taille des grains peut être un indicateur des conditions climatiques qui prévalaient au moment du dépôt des particules. Porter et An (1995) ont montré que la fraction  $< 16 \mu\text{m}$  est prédominante durant les périodes chaudes et la fraction  $> 16 \mu\text{m}$  est majoritaire dans les périodes froides. D'autres auteurs utilisèrent la valeur seuil de  $20 \mu\text{m}$  pour la même application (Zhang *et al.*, 1997). D'autres encore utilisent l'analyse granulométrique comme indicateur de la force des vents associés au dépôt des particules. C'est ainsi que le « U-ratio » (Vandenberghe *et al.*, 1997) et le « Grain Size Index » (GSI ; Antoine *et al.*, 2002) ont été introduits. Le « U-ratio » est défini comme le rapport entre la fraction  $16-44 \mu\text{m}$  et la fraction  $5,5-16 \mu\text{m}$ . Le GSI correspond au rapport entre la fraction  $20-61 \mu\text{m}$  et la fraction inférieure à  $20 \mu\text{m}$ . Ces deux variables augmentent lorsque l'énergie disponible pour mobiliser les particules, augmente. De telles analyses paléoclimatiques au moyen d'une étude granulométrique nécessitent un pas d'échantillonnage très resserré, couvrant l'entièreté d'une séquence lœssique. Le pas d'échantillonnage réalisé sur le site de Romont ne permet pas cette analyse.

D'une façon comparable à l'analyse granulométrique, l'étude des limites d'Atterberg est maintenant présentée. La Figure 5-21 illustre l'évolution de la limite de liquidité ( $w_L$ ), de la limite de plasticité ( $w_P$ ) et de l'indice de plasticité (IP, éq. 5-2) en fonction de la profondeur, pour les échantillons issus du forage F1 du site de Romont. L'échantillon F1-25 présente ici aussi des caractéristiques assez différentes de celles des autres échantillons, comme cela a déjà été souligné à la suite de l'analyse granulométrique. Cet échantillon présente un indice de plasticité proche de 3 (Figure 5-21 (c)), ce qui en fait un sol « non plastique » (Tableau 5-5 ; Magnan, 1997). Les autres échantillons de la séquence lœssique montrent peu de variabilité des limites d'Atterberg. Les valeurs moyennes obtenues (en excluant l'échantillon F1-25) sont :  $w_L = 29,1 \%$  ;  $w_P = 21,7 \%$  et  $IP = 7,4 \%$ . Ces valeurs sont en accord avec d'autres données issues de dépôts lœssiques du nord de la France (Leplat, 1968 ; Delage *et al.*, 2005). La majorité des échantillons issus du site de Romont présentent un indice de plasticité entre 5 et 10 %, caractéristique des sols peu plastiques.

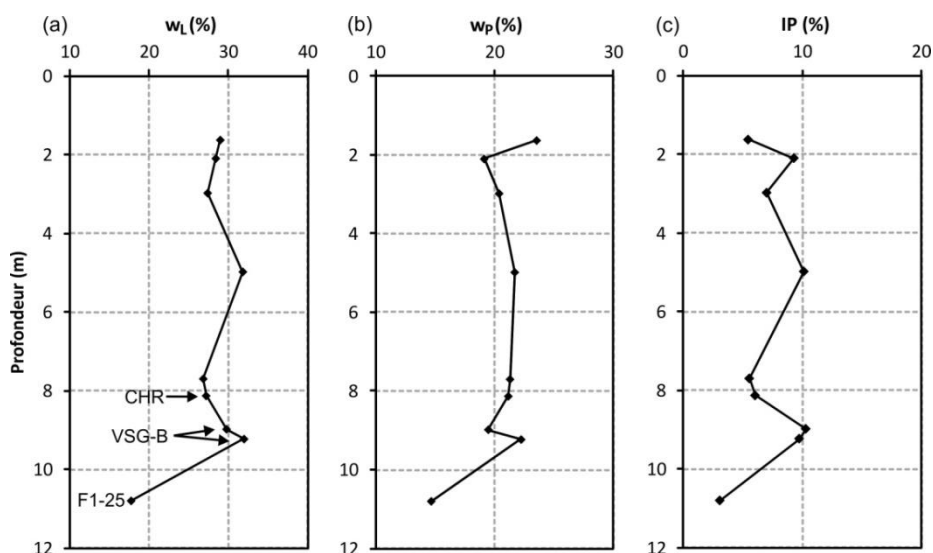


Figure 5-21 : Évolution de différentes variables en lien avec les limites d'Atterberg, en fonction de la profondeur, pour le forage F1 réalisé sur le site de Romont. (a) Limite de liquidité ( $w_L$ ) ; (b) Limite de plasticité ( $w_P$ ) ; (c) Indice de plasticité (IP). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Tableau 5-5 : Degré de plasticité des sols (Magnan, 1997).

Indice de plasticité (%)	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Sol non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < IP < 30$	Sol peu plastique
$30 < IP < 50$	Sol plastique
$50 < IP$	Sol très plastique

Les résultats issus des analyses granulométriques et des limites d'Atterberg ont maintenant été présentés et développés. Ils aboutissent à la détermination du type de sol au moyen de la classification internationale des sols (USCS ; ASTM D2487-06, 2006). Les critères qui entrent en compte dans cette classification ont déjà été détaillés à la Figure 5-17. Les résultats de chacune des variables utilisées, ainsi que la détermination du type de sol, sont présentés dans le Tableau 5-6. Il en résulte que le loëss étudié correspond à une argile limoneuse (CL-ML) ou à une argile faiblement plastique (CL). L'échantillon F1-25 correspond à un limon sableux (ML).

La détermination des limites d'Atterberg permet également de représenter les données dans le diagramme de plasticité des sols fins (Figure 5-22 ; ASTM D2487-06, 2006). Les différents types de sol définis par la classification USCS y sont représentés. La ligne A a été définie par Casagrande pour séparer les sols argileux inorganiques (CL) des sols limoneux inorganiques (ML). Il est intéressant de constater la bonne corrélation entre les types de sol obtenus au moyen de ce diagramme et les types de sol issus de la classification internationale USCS. Trois zones grisées sont également représentées sur le diagramme (Figure 5-22). Elles correspondent à des dépôts loëssiques provenant des différentes régions des États-Unis (Gibbs & Holland, 1960). Les caractéristiques des échantillons issus du site hesbignon de Romont sont similaires au loëss limoneux renseignés par les auteurs.

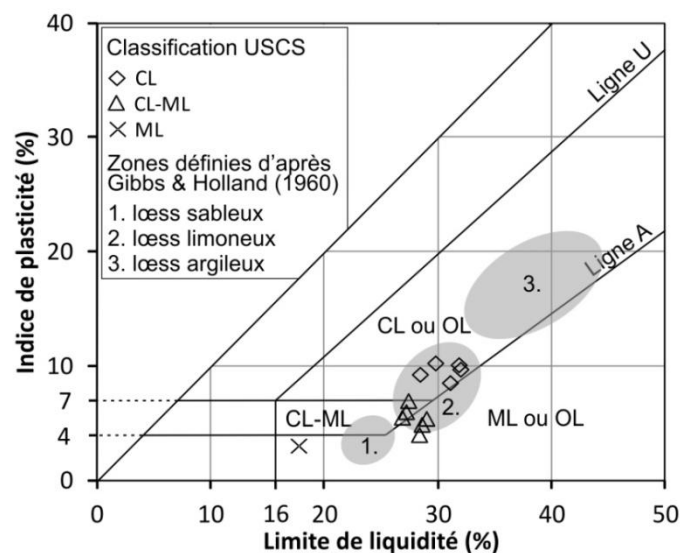


Figure 5-22 : Diagramme de plasticité des sols fins. Les données représentées sont issues du site de Romont. Les symboles utilisés se réfèrent à la classification internationale des sols (USCS, ASTM D2487-06, 2006). Les zones grisées sont celles définies par Gibbs et Holland (1960) pour des loëss provenant des diverses régions des États-Unis.

Tableau 5-6 : Données nécessaires à la classification internationale des sols (USCS ; ASTM D2487-06, 2006). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; N/A = non applicable ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Prof. (m)	Position stratigraphique	Passant à 74 µm (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	IP (%)	USCS	
							Symbole	Nom
F1-4	1,63	Bt holocène	99,2	29,0	23,5	5,5	CL-ML	Silty clay
F1-5	2,10	Limon brabantien sous LD	99,0	28,4	19,1	9,3	CL	Lean clay
F1-7	2,98	HLN	99,0	27,4	20,4	7,0	CL-ML	Silty clay
F1-12	4,98	Limon sus-jacent à MAL	98,7	31,8	21,7	10,2	CL	Lean clay
F1-18	7,70	Complexe stratifié inférieur	90,0	26,8	21,3	5,6	CL-ML	Silty clay
F1-19	8,13	CHR	92,3	27,2	21,1	6,1	CL-ML	Silty clay
F1-20 haut	8,48	Transition CHR - HBM	92,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
F1-20 bas	8,73	Transition HBM - VSG-B	92,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
F1-21 haut	8,98	VSG-B	96,6	29,8	19,5	10,3	CL	Lean clay
F1-21 bas	9,23	VSG-B	97,3	32,0	22,2	9,8	CL	Lean clay
F1-25	10,80	Sous PR	56,7	17,7	14,7	3,1	ML	Sandy silt
F2-3	1,20	Bt holocène	99,4	31,1	22,5	8,6	CL	Lean clay
F2-4	1,70	Bt holocène	98,9	28,6	23,6	4,9	CL-ML	Silty clay
F2-5	2,20	Limon brabantien sous LD	99,2	28,3	24,3	4,0	CL-ML	Silty clay

#### 4.2. Comparaison avec la classification des sols au moyen de l'essai de pénétration statique

Le chapitre 2 de la thèse consacre une section à part entière sur les différents diagrammes de classification des sols qui ont été développés au départ des résultats d'essais de pénétration statique. Ces diagrammes sont utilisés dans l'analyse qui suit, afin de caractériser les dépôts investigués sur le site de Romont. Ces résultats seront alors comparés à ceux obtenus à la suite des analyses réalisées en laboratoire (granulométrie et limites d'Atterberg). Pour ce faire, quatre diagrammes sont utilisés dans cette analyse. Trois d'entre eux sont parmi les plus récents, fréquemment rencontrés dans la littérature scientifique : Robertson *et al.* (1986), Robertson (1990), et Eslami & Fellenius (2004). Le quatrième diagramme (Douglas & Olsen, 1981) est moins utilisé aujourd'hui, mais reprend des informations sur la classification internationale des sols (USCS).

L'analyse qui suit comprend trois parties. La première prend en compte l'ensemble des données issues de la séquence lœssique. La seconde se focalise sur quelques horizons



caractéristiques qui composent la séquence lœssique. La troisième concerne les dépôts sous-jacents au sommet du Pédocomplexe de Rocourt, en vue de tenter d'identifier la présence de dépôts marins de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern.

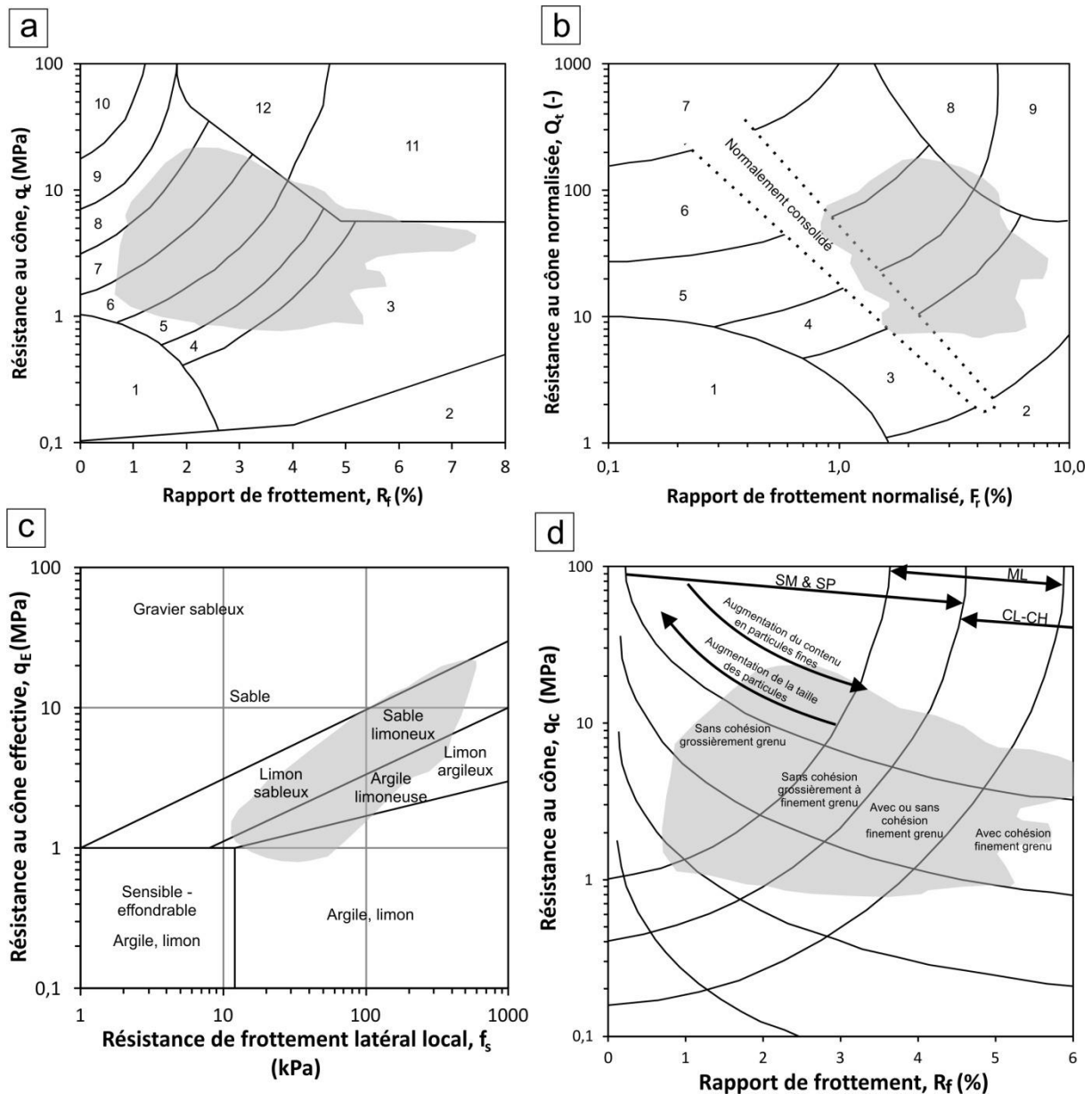


Figure 5-23 : Représentation des résultats issus de l'ensemble de la séquence lœssique investiguée sur le site de Romont, sur les diagrammes de classification des sols. (a) Diagramme de Robertson et al. (1986). 1. Sol fin sensible; 2. Sol organique; 3. Argile; 4. Argile à argile limoneuse; 5. Argile limoneuse à limon argileux; 6. Limon argileux à limon sableux; 7. Limon sableux à sable limoneux; 8. Sable limoneux à sable; 9. Sable; 10. Sable à sable graveleux; 11. Sol fin très raide\*; 12. Sable argileux ou argile\*. \* Surconsolidé ou induré. (b) Diagramme normalisé de Robertson (1990). 1. Sol sensible, finement grenu; 2. Sol organique, tourbe; 3. Argile à argile limoneuse; 4. Mélange limoneux, argile limoneuse à limon argileux; 5. Mélange sableux, limon sableux à sable limoneux; 6. Sable limoneux à sable; 7. Sable à sable graveleux; 8. Sable argileux à sable très raide; 9. Sol finement grenu très raide. (c) Diagramme de Eslami & Fellenius (2004). (d) Diagramme de Douglas & Olsen (1981).

L'analyse considère, dans un premier temps, l'ensemble des données issues des neuf essais de pénétration statique munis d'une pointe électrique (CPTE-01 à CPTE-09). La zone grisée représentée sur les diagrammes (Figure 5-23) délimite l'intervalle de valeurs dans lequel se situe l'ensemble des points de mesure correspondant à la couche de lœss. Étant donné que la base de la couche de lœss n'a pas pu être identifiée clairement, les données représentées sur les diagrammes sont issues d'horizons situés entre la surface topographique et un niveau localisé 1 m sous l'Horizon blanchi de Momalle, défini arbitrairement. Ainsi, l'analyse est limitée aux horizons lœssiques qui ont été observés sur la paroi du site de Romont.

L'analyse de chacun des diagrammes est développée ci-après :

- Diagramme de Robertson *et al.* (1986) (Figure 5-23 (a)) : les données se localisent dans des zones du diagramme situées entre de l'argile (zone 3) et du sable limoneux (zone 8).
- Diagramme normalisé de Robertson (1990) (Figure 5-23 (b)) : les données se répartissent entre de l'argile à argile limoneuse (zone 3) et du limon sableux à sable limoneux (zone 5). Les données sont majoritairement situées au-dessus d'une zone définie comme appartenant aux matériaux normalement consolidés. Il pourrait donc s'agir de lœss surconsolidés. Ce résultat sera comparé ultérieurement dans ce chapitre avec les données issues de l'analyse oedométrique.
- Diagramme d'Eslami & Fellenius (2004) (Figure 5-23 (c)) : les données se distribuent dans des zones appartenant à de l'argile limoneuse, du limon sableux et du sable limoneux.
- Diagramme de Douglas & Olsen (1981) (Figure 5-23 (d)) : les données occupent une large surface du diagramme. Elles se localisent dans des zones attribuées aux matériaux de type sable limoneux (SM) & sable gradué (SP), de type limoneux (ML) et de type argileux (CL-CH).

En guise de conclusion à cette première analyse, la représentation des résultats issus des CPT sur les diagrammes de classification des sols, traduit une grande diversité de types de sol qui composent la couche de lœss. Les résultats issus des quatre diagrammes étudiés sont concordants entre eux. La couche de lœss investiguée est constituée d'horizons ayant des caractéristiques mécaniques types variant entre une argile limoneuse et un sable limoneux. Cette variabilité tranche assez nettement avec les résultats obtenus par l'analyse granulométrique et celle des limites d'Atterberg. En effet, ces analyses en laboratoire ont montré que la couche de lœss est, dans son ensemble, relativement homogène. L'application de la classification USCS indique d'ailleurs que le matériau en présence correspond à une argile limoneuse (CL-ML) ou à une argile pauvre (CL). Les résultats obtenus par le diagramme de Douglas & Olsen (1981) indiquent une bien plus large gamme de types de sol. L'existence de potentielles différences entre les deux systèmes de classification sur la détermination du type de sol, avait déjà été soulevée dans le chapitre 2. La classification internationale se base uniquement sur des données de granulométrie et des limites d'Atterberg. Par contre, les mesures au pénétromètre statique sont bien plus complexes et peuvent être influencées par d'autres paramètres (p. ex. la cohésion, l'état de contraintes initial, la porosité, le degré de saturation, etc.).

Dans un second temps, la suite de l'analyse porte sur la position d'horizons caractéristiques au sein de la séquence lœssique, dans les diagrammes de classification des sols. Pour ce faire, suite à l'analyse stratigraphique du site de Romont développée dans le chapitre 4, sept horizons caractéristiques ont été sélectionnés sur base de l'évolution de la résistance au cône en fonction de la profondeur. Leur position stratigraphique, pour le CPTE-05, est représentée à la Figure 5-24. Ces horizons particuliers ont donc été identifiés

sur chacun des essais de pénétration statique munis d'une pointe électrique. Leurs caractéristiques mécaniques moyennes ont été reportées dans les différents diagrammes de classification (Figure 5-25).

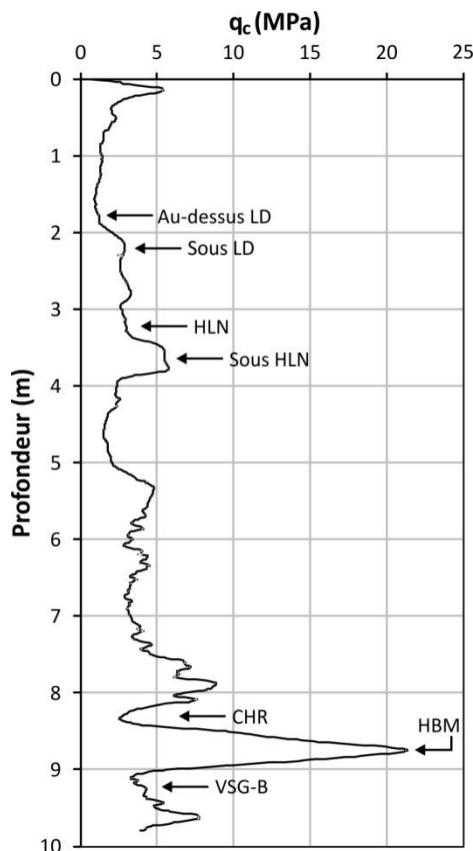


Figure 5-24 : Localisation stratigraphique des horizons particuliers utilisés dans l'analyse détaillée de la classification des sols, pour le CPTe-05. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Cette analyse montre que les horizons particuliers ainsi définis occupent des zones relativement restreintes au sein des diagrammes de classification des sols. Ceci indique que les caractéristiques semblent peu variables au sein d'un même horizon stratigraphique. L'Horizon blanchi de Momalle occupe un emplacement correspondant à un type de sol parmi les plus sableux de la séquence lœssique. À l'inverse, l'horizon qui lui est sous-jacent, le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, apparaît comme un sol de type argile limoneuse à limon argileux. Des différences dans la proportion de particules argileuses ( $< 2 \mu\text{m}$ ) entre ces deux horizons, ont déjà été mises en évidence dans l'analyse granulométrique. L'Horizon blanchi de Momalle correspondrait à un horizon éluvié (Haesaerts, 1999 ; Haesaerts *et al.*, 2016). L'horizon sous-jacent, le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, devient par conséquent illuvié, c'est-à-dire enrichi en particules argileuses. Les horizons situés de part et d'autre de la limite de décarbonatation possèdent également des zones bien distinctes au sein des diagrammes de classification, alors qu'ils ne sont séparés stratigraphiquement que par quelques décimètres. Une constatation similaire peut être tirée entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et l'horizon qui lui est directement sous-jacent, correspondant au sommet des lœss hesbaysens.

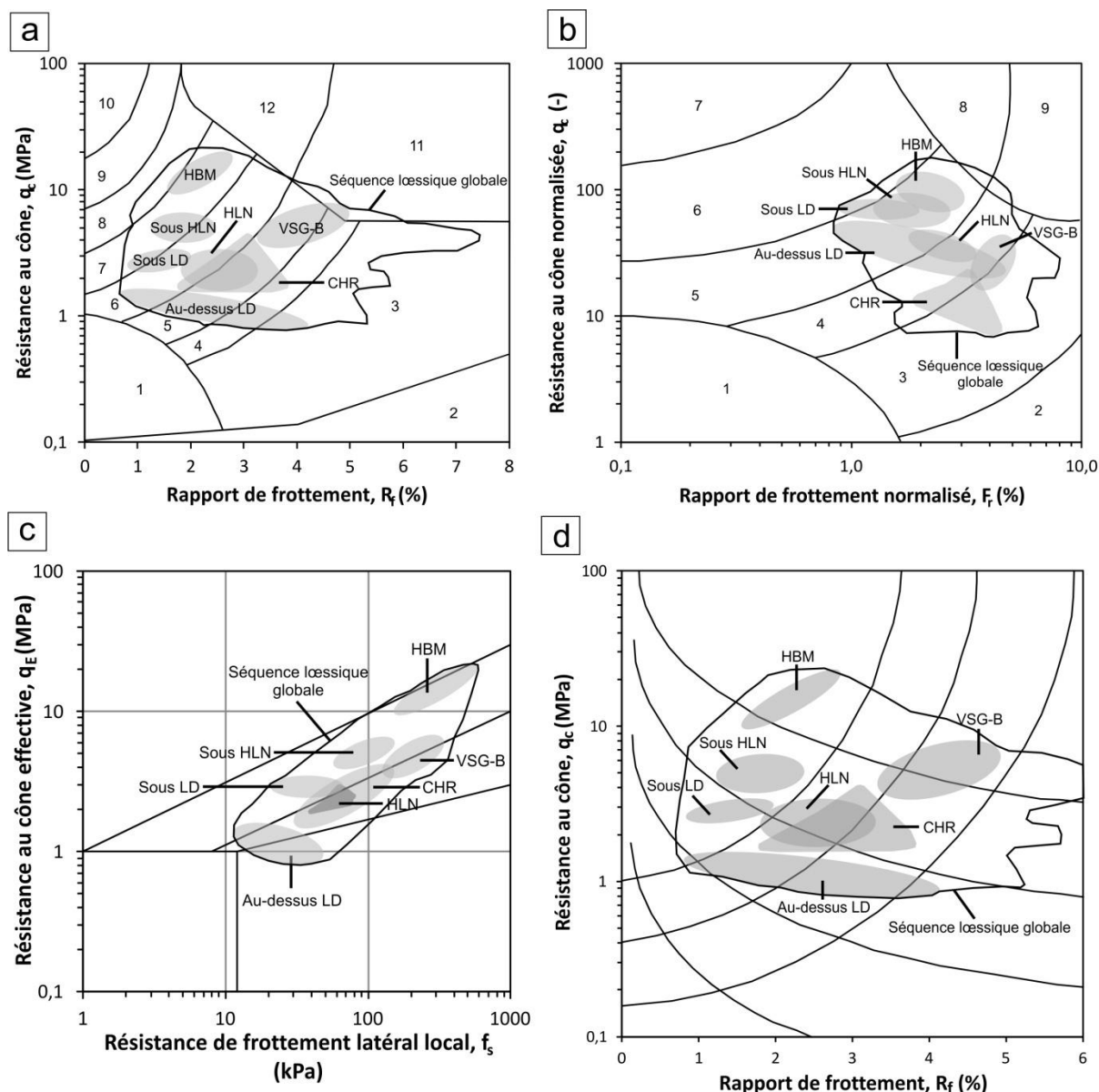


Figure 5-25 : Représentation des résultats issus d'horizons particuliers au sein de la séquence loessique investiguée sur le site de Romont, sur les diagrammes de classification des sols. (a) Diagramme de Robertson et al. (1986). (b) Diagramme normalisé de Robertson (1990). (c) Diagramme de Eslami & Fellenius (2004). (d) Diagramme de Douglas & Olsen (1981). La légende détaillée des diagrammes présentés est développée à la Figure 5-23. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Enfin, un troisième volet à l'analyse des données issues des CPT au travers des diagrammes de classification des sols, concerne les horizons sous-jacents à l'Horizon blanchi de Momalle et au Sol de Villers-Saint-Ghislain-B. Une question qui reste encore posée à ce stade, concerne la présence de dépôts de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern sous les dépôts quaternaires loessiques au droit du site investigué à Romont. Cette formation se compose de dépôts marins sableux, limoneux et argileux (Laga, 1988). Plusieurs études attestent la présence de ces dépôts au niveau de la carrière de Romont (Juvigné, 1992 ; Mottequin & Marion, 2012). Dès lors, l'essai de pénétration statique est-il capable de distinguer la séquence loessique de ces dépôts marins ? Pour tenter de répondre à cette

question, les résultats obtenus par le CPTE-05, qui occupe une position centrale sur le site investigué, sont représentés à la Figure 5-26. Cet essai a atteint la profondeur maximale de 15,14 m. Sont représentées sur les graphiques suivants, les mesures situées entre cette profondeur maximale et la profondeur correspondant à 1 m sous l'Horizon blanchi de Momalle (localisé vers 8,80 m). Ces points de mesures sont superposés à l'enveloppe des valeurs obtenues à la suite de l'analyse précédente, réalisée sur l'ensemble des CPT munis d'une pointe électrique, et limitée à la séquence lœssique exclusivement (c'est-à-dire, situés entre la surface topographique et la profondeur arbitraire de 1 m sous l'HBM).

Les résultats indiquent un recouvrement pratiquement total entre l'enveloppe des dépôts lœssiques et les points de mesure correspondant aux niveaux sous-jacents. Ces derniers correspondent à des dépôts présentant des comportements mécaniques types s'échelonnant entre un limon sableux et une argile limoneuse. Ces types de dépôts sont en accord avec ceux qui composent la Formation de Sint-Huibrechts-Hern (Laga, 1988). Il en résulte que l'essai de pénétration statique n'est pas capable de distinguer clairement ces deux types de dépôts, probablement trop proches en termes de caractéristiques physiques et mécaniques.

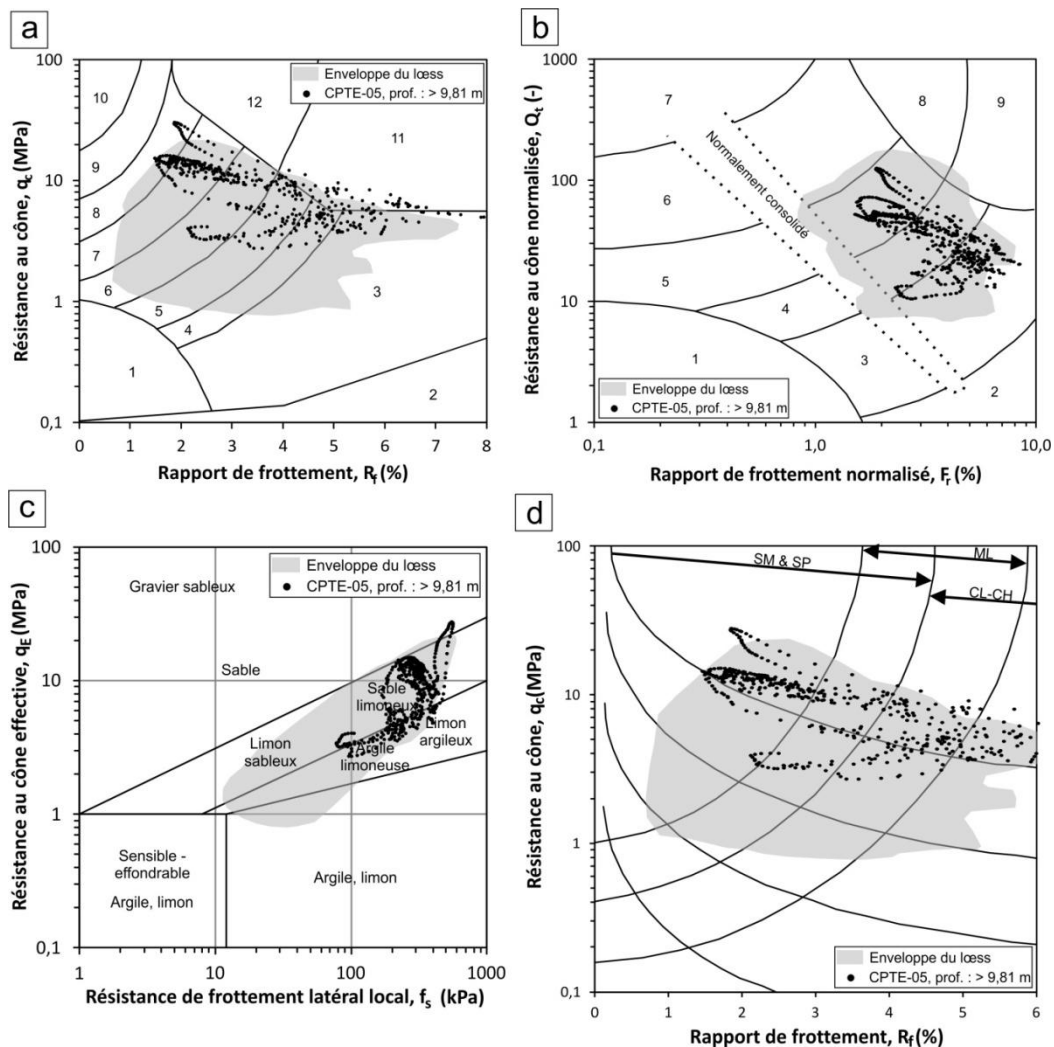


Figure 5-26 : Représentation sur les diagrammes de classification des sols, des résultats issus d'horizons sous-jacents à l'Horizon blanchi de Momalle et au Sol de Villers-Saint-Ghislain-B de la séquence lœssique investiguée sur le site de Romont. (a) Diagramme de Robertson et al. (1986). (b) Diagramme normalisé de Robertson (1990). (c) Diagramme de Eslami & Fellenius (2004). (d) Diagramme de Douglas & Olsen (1981). La légende détaillée des diagrammes présentés est développée à la Figure 5-23.

#### 4.3. Synthèse intermédiaire

L'analyse complète en termes de classification des sols, réalisée sur les dépôts investigués sur le site de Romont aboutit aux résultats suivants :

- (1) L'analyse globale de la séquence lœssique, au travers de la granulométrie et des limites d'Atterberg, montre une relative homogénéité des caractéristiques physiques. Les dépôts sont caractérisés par un fuseau granulométrique assez étroit, et appartiennent à un sol peu plastique. L'application de la classification internationale des sols (USCS) permet d'attribuer aux dépôts lœssiques, les dénominations suivantes : argile limoneuse (CL-ML) ou argile pauvre (CL).
- (2) La proportion de particules  $< 2 \mu\text{m}$  est assez variable au sein de la séquence lœssique. Cette variable atteint des valeurs assez différentes aux alentours de la limite de décarbonatation. Par ailleurs, l'Horizon blanchi de Momalle est caractérisé par une faible proportion en particules argileuses alors que l'horizon qui lui est directement sous-jacent, le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, est plus riche en particules argileuses. Cette observation est en accord avec l'histoire pédosédimentaire qui caractérise ces horizons. L'HBM est effet attribué à un horizon éluvié, alors que le Sol de VSG-B représente l'horizon illuvié correspondant.
- (3) L'échantillon F1-25 (base du forage F1) présente des caractéristiques physiques assez différentes des autres échantillons. Il se caractérise par une proportion en particules sableuses plus importante. Il pourrait avoir été prélevé au sein d'un niveau remanié sablo-graveleux intercalé entre des horizons lœssiques.
- (4) Les diagrammes de classification des sols conçus au départ de données issues du CPT, indiquent que le lœss investigué présente une relative variabilité en termes de type de sol. Il se répartit entre une argile limoneuse et un sable limoneux. Cette variabilité contraste avec les résultats obtenus au moyen des granulométries et des limites d'Atterberg.
- (5) Les quelques horizons lœssiques particuliers étudiés, sont localisés dans des zones assez restreintes au sein des diagrammes de classification des sols. Ceci indique que les caractéristiques semblent peu variables au sein d'un même horizon stratigraphique. L'Horizon blanchi de Momalle y occupe un pôle localisé parmi les plus sableux. Le Sol de Villers-Saint-Ghislain B occupe un pôle correspondant à une argile limoneuse. Ce résultat est en accord avec la variabilité de la proportion de particules  $< 2 \mu\text{m}$ .
- (6) Les CPT, ainsi que les analyses en laboratoire n'ont pas réussi à distinguer clairement les dépôts quaternaires de la séquence lœssique, des dépôts marins oligocènes de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern. Ces derniers possèdent probablement des caractéristiques physiques et mécaniques très proches de celles du lœss.

## 5. Caractéristiques de déformabilité

Cette section est consacrée à l'analyse des caractéristiques en lien avec la déformabilité du matériau. Les résultats des essais œdométriques sont d'abord présentés et discutés. Ensuite, certains paramètres issus de l'essai œdométrique, tels que l'indice de compression et le module œdométrique, sont croisés avec la résistance au cône du CPT. Ceci permet de vérifier une relation très commune en géotechnique qui relie le module œdométrique (ou l'indice de compression) à la résistance au cône du CPT. Cette relation est fréquemment employée pour estimer d'éventuels tassements sous une fondation superficielle au moyen du CPT. Enfin, une analyse succincte vis-à-vis de la susceptibilité à l'effondrement du loess rencontré à Romont, est présentée dans la troisième partie de cette section.

### 5.1. Résultats œdométriques

Un total de 15 essais œdométriques a été réalisé en laboratoire, sur les échantillons non remaniés prélevés sur le site de Romont. La plupart des échantillons sont issus du forage principal F1. Les éprouvettes ont été saturées préalablement au chargement. Les niveaux de charges appliquées lors des paliers de chargement/déchargement sont indiqués dans le Tableau 5-7. La charge approchant au mieux la contrainte verticale effective in situ  $y$  est mise en évidence.

Les résultats sont d'abord présentés pour l'ensemble des échantillons et sont comparés à ceux de la littérature pour un matériau comparable. L'ensemble des courbes œdométriques ( $e = f(\log \sigma'_v)$ ) relatives aux échantillons du forage F1 sont présentées à la Figure 5-27. Chacune de ces courbes se compose d'une première partie liée au chargement et d'une seconde partie liée au déchargement de l'éprouvette. Lors de la phase de chargement, les points s'alignent classiquement selon deux droites de pentes différentes. L'une correspond à la partie élastique et l'autre caractérise le comportement plastique. Certaines éprouvettes ne présentent pas clairement de changement de pente au cours de la phase de chargement. C'est notamment le cas des échantillons F1-20 haut et F1-20 bas (Figure 5-27 (b)). Cette observation est probablement le résultat d'un remaniement trop important du sol en cours d'échantillonnage. Le nombre de coups de battage nécessaires pour prélever la section de sol incluant cet horizon, a d'ailleurs été particulièrement élevé (130 coups contre 60 en moyenne). L'enfoncement du carottier correspondant à chaque coup de battage, en fonction de la profondeur, est renseigné en annexe 4.

Tableau 5-7 : Échantillons sélectionnés pour l'essai œdométrique et programme de chargement/déchargement. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Horizon stratigraphique	Prof. (m)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\sigma'_v$ (kPa)	Paliers de chargement/déchargement (kPa)
F1-4	Bt holocène	1,63	18,32	20,77	30,04	12,5- <b>25</b> -50-100-200-400 200-100-50-25-12,5-5
F1-5	Limon brabantien sous LD	2,10	18,52	16,36	38,82	12,5- <b>37,5</b> -50-100-200-400 200-100-50-37,5-12,5-5
F1-7	HLN	2,98	18,61	16,46	54,99	12,5-37,5- <b>62,5</b> -100-200-400 200-100-62,5-37,5-12,5-5
F1-12	Limon sus-jacent à MAL	4,98	17,61	21,09	91,96	12,5-25-50- <b>100</b> -200-400 200-100-50-25-12,5-5
F1-18	Complexe stratifié inférieur	7,70	18,75	16,87	142,33	25-50- <b>100</b> -200-400-800 400-200-100-50-25-5
F1-19 haut	CHR – partie supérieure	8,01	18,24	22,71	148,12	25-50- <b>100</b> -200-400-800 400-200-100-50-25-5
F1-19 bas	CHR – partie inférieure	8,24	18,56	21,98	152,28	25-50-100- <b>200</b> -400-800 400-200-100-50-25-5
F1-20 haut	Transition CHR et HBM	8,46	18,50	15,31	156,66	25-50-100- <b>200</b> -400-800 400-200-100-50-25-5
F1-20 bas	Transition HBM et VSG-B	8,73	18,57	15,63	161,28	25-50-100- <b>200</b> -400-800 400-200-100-50-25-5
F1-21 haut	VSG-B	8,98	19,73	19,75	165,90	25-75-125- <b>200</b> -400-800 400-200-125-75-25-5
F1-21 bas	VSG-B	9,23	18,87	20,73	170,52	25-75-125- <b>200</b> -400-800 400-200-125-75-25-5
F1-25	Sous PR ?	10,80	20,63	11,90	199,63	50- <b>150</b> -250-400-800-1600 800-400-250-150-50-5
F2-3	Bt holocène	1,20	18,00	21,35	22,18	12,5- <b>25</b> -50-100-200-400-800-1600 800-400-200-100-50-25-12,5-5
F2-4	Bt holocène	1,70	17,07	17,90	31,42	12,5- <b>25</b> -50-100-200-400-800-1600 800-400-200-100-50-25-12,5-5
F2-5	Limon brabantien sous LD	2,20	17,29	13,20	40,67	12,5-25- <b>50</b> -100-200-400-800-1600 800-400-200-100-50-25-12,5-5



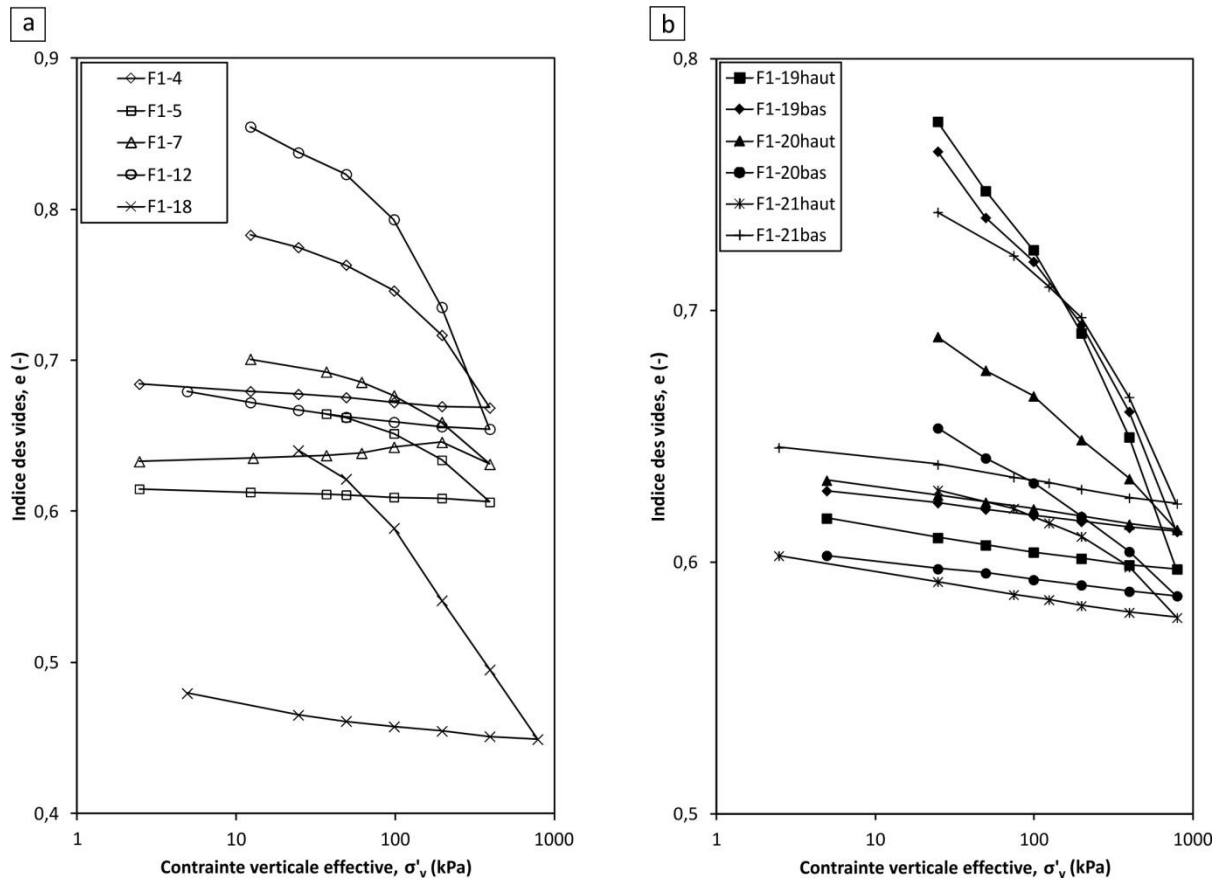


Figure 5-27 : Courbes œdométriques  $e = f(\log \sigma'_v)$  pour les échantillons issus du forage F1 de Romont. (a) Échantillons de la partie supérieure de la séquence lœssique. (b) Échantillons de la partie inférieure.

Les valeurs moyennes des principaux paramètres liés aux caractéristiques physiques et mécaniques (déformabilité) du matériau étudié sont présentées dans le Tableau 5-8. Elles sont en accord avec les valeurs déjà mesurées par d'autres études pour des matériaux similaires de Belgique et du nord de la France.

Les valeurs moyennes de l'indice de compression ( $C_c$ ) et de la constante de compression ( $C$ ), obtenues pour le lœss de Romont, valent respectivement 0,136 et 34. Comme le montre le Tableau 5-9 suivant, ces résultats sont en accord avec les caractéristiques de déformabilité d'un matériau limoneux. Le module œdométrique sécant moyen, calculé d'après l'équation 5-14, équivaut à 9,6 MPa. Ces valeurs sont habituelles pour un matériau limoneux relativement ferme.

Tableau 5-8 : Valeurs moyennes (et écarts-types) des principaux paramètres mesurés dans le cadre de l'essai œdométrique. Les résultats obtenus pour le site de Romont sont comparés avec les valeurs obtenues par d'autres études, pour un matériau comparable.

	Lœss de Romont (Belgique)	Limon d'Awans <sup>a</sup> (Belgique)	Limon de plateau (carte Vottem) <sup>b</sup> (Belgique)	Lœss <sup>c</sup> (N. France)	Lœss <sup>d</sup> (N. France)
w (%)	18,6 (±3,0)	15	20,1 (±2,8)		16,6
$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,3 (±0,7)	18,53	19,7 (±0,8)	18 - 19	
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,5 (±0,6)	16,1	16,4 (±0,8)	15 - 16	15,7
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,2 (±0,3)				
$e_i$ (-)	0,76 (±0,08)	0,61			0,71
n (%)	43,0 (±2,6)	38			
$S_r$ (%)	67,8 (±9,9)	64			64,8
$c_v$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s)	29,3 (±15)				
$C_c$ (-)	0,136 (±0,06)				
C (-)	34 (±17)		44 (±17)		
$C_s$ (-)	0,012 (±0,007)				
A (-)	404 (±143)		320 (±71)		
$E_{œd, sec}$ (MPa)	9,6 (±5,1)				
k (10 <sup>-8</sup> m/s)	6,9 (±6,3)				

<sup>a</sup> Masekanya (2008) ;

<sup>b</sup> Fagnoul *et al.* (1982) ;

<sup>c</sup> Leplat (1968) ;

<sup>d</sup> Muñoz-Castelblanco *et al.* (2012).

Tableau 5-9 : Valeurs moyennes de l'indice de compression ( $C_c$ ), de la constante de compression (C) et du module œdométrique ( $E_{œd}$ ) pour différents types de sol.

Sols	$C_c$ (-)	C (-)	$E_{œd}$ (MPa)
Sable	0,01 – 0,1	50 - 300	10 - 80
Limon		20 - 50	3 - 30
Argile	0,17 – 2,5		2 - 20
Tourbe	> 2	3 - 10	0,1 - 2

Un graphique montrant l'évolution de la déformation axiale en fonction de la charge appliquée est illustré à la Figure 5-28. Cette dernière permet déjà d'observer une certaine variabilité dans la déformation entre échantillons, pour un même niveau de chargement donné. Les deux éprouvettes issues du Complexe Humifère de Remicourt (F1-19 haut et bas) sont parmi celles qui se déforment le plus. À l'opposé, les échantillons F1-20 haut, F1-20 bas et F1-21 haut sont parmi les moins déformés. Ils correspondent au sommet du Pédocomplexe de Rocourt (partie supérieure du Sol de Villers-Saint-Ghislain B et Horizon blanchi de Momalle).

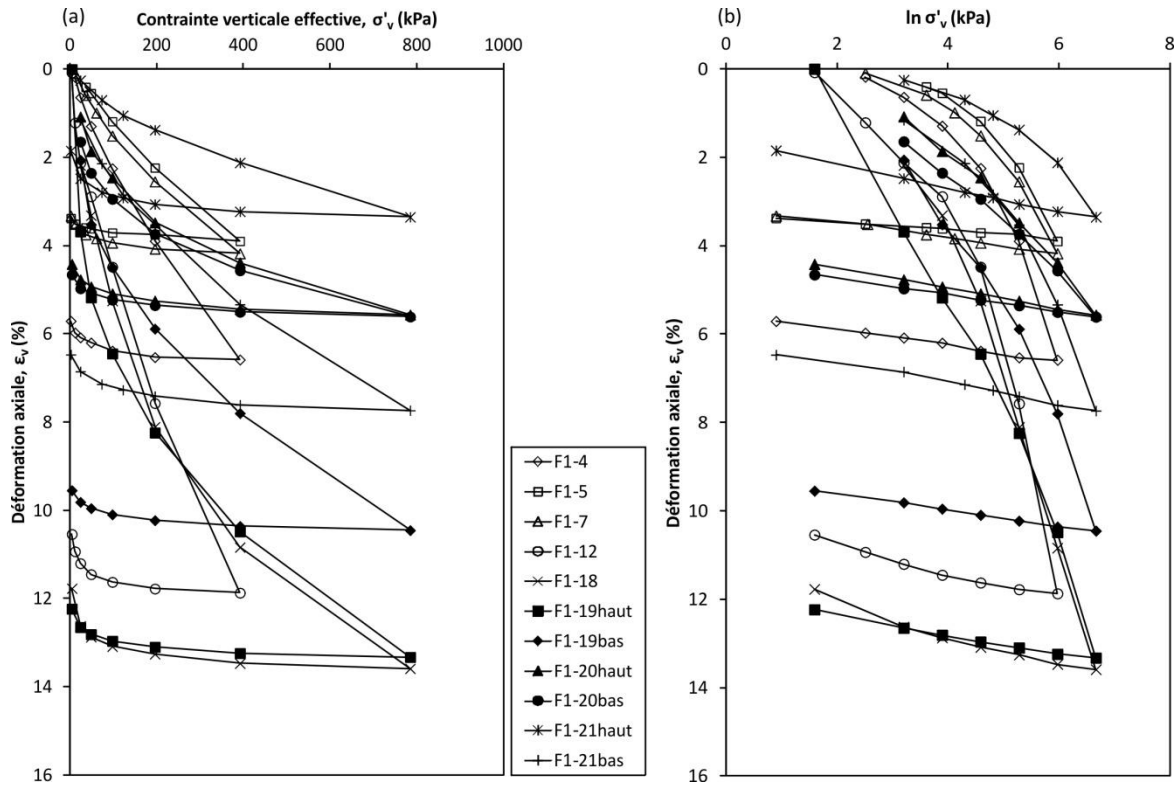


Figure 5-28 : Évolution de la déformation verticale ( $\epsilon_v$ ) des éprouvettes œdométriques en fonction de la charge appliquée ( $\sigma'_v$ ). (a)  $\sigma'_v$  représenté en échelle linéaire. (b) Représentation plus conventionnelle avec  $\ln \sigma'_v$ .

La variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques des différents horizons analysés, est illustrée au travers de la Figure 5-29. Un tableau reprenant l'ensemble des valeurs numériques obtenues pour les principaux paramètres ( $w$ ,  $\gamma_h$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_s$ ,  $e_i$ ,  $n$ ,  $S_r$ ,  $c_v$ ,  $k$ ,  $C_s$ ,  $C_c$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $E_{\text{œd, sec}}$ ,  $\sigma'_p$  et OCR) est également disponible en annexe 5.

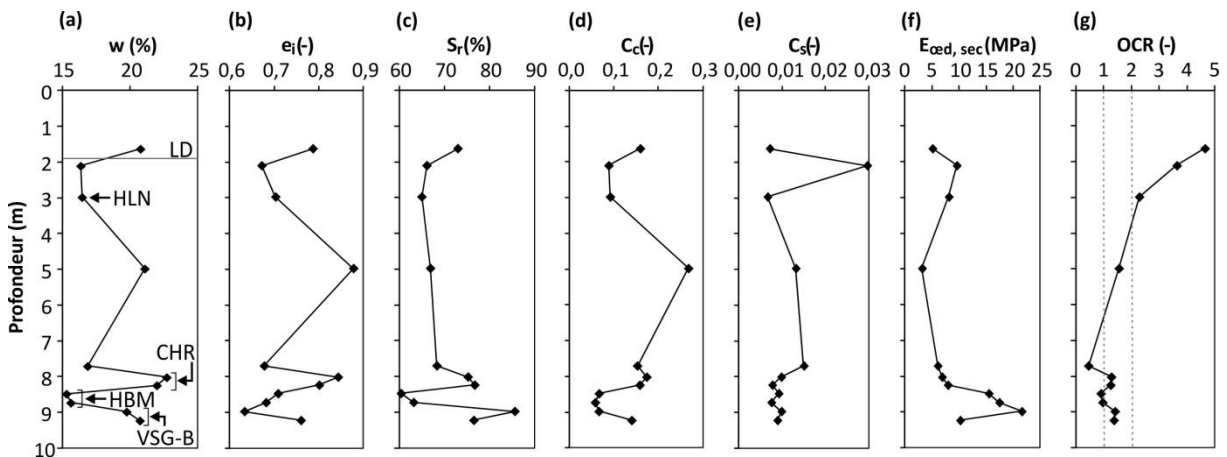


Figure 5-29 : Évolution de différents paramètres en fonction de la profondeur. (a) Teneur en eau ( $w$ ). (b) Indice des vides initial ( $e_i$ ). (c) Degré de saturation ( $S_r$ ). (d) Indice de compression ( $C_c$ ). (e) Indice de gonflement ( $C_s$ ). (f) Module œdométrique sécant ( $E_{\text{œd, sec}}$ ). (g) Rapport de surconsolidation (OCR). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Le passage de la limite de décarbonatation se traduit par une diminution de la teneur en eau, de l'indice des vides initial et du degré de saturation. Les paramètres caractérisant la déformabilité montrent une augmentation du module œdométrique et une diminution de l'indice de compression sous la limite de décarbonatation. D'une manière générale, ces observations indiquent un matériau moins déformable sous la limite de décarbonatation par rapport au matériau sus-jacent à cette limite. Le Complexe Humifère de Remicourt se caractérise par une teneur en eau et un indice des vides initial relativement élevés, ainsi que par un module œdométrique assez faible. Cet horizon diffère clairement de l'horizon qui lui est sous-jacent, à savoir l'Horizon blanchi de Momalle. Ce dernier est caractérisé par une teneur en eau et un degré de saturation assez faibles. Les paramètres relatifs à la déformabilité indiquent que l'horizon présente les caractéristiques les plus favorables de l'ensemble des horizons analysés. Le module œdométrique sécant  $\gamma$  est deux fois plus élevé que dans le Complexe Humifère de Remicourt, alors que l'indice de compression est 2 à 3 fois plus faible.

La Figure 5-29 (g) représente l'évolution du rapport de surconsolidation (OCR). Ce dernier est défini comme étant le rapport entre la contrainte de préconsolidation et la contrainte effective verticale in situ. Les horizons peu profonds, situés jusqu'à 3-4 m de profondeur, sont caractérisés par un OCR relativement élevé, supérieur à 2. Cette variable augmente d'ailleurs en se rapprochant de la surface topographique. Les horizons plus profonds présentent un OCR habituellement entre 1 et 2, donc normalement consolidés à légèrement surconsolidés. L'état de surconsolidation des échantillons peut être une caractéristique in situ du matériau, mais peut également avoir été généré par la technique d'échantillonnage. Ces résultats peuvent être reliés à ceux issus du diagramme de classification des sols établi par Robertson (1990) et illustré à la Figure 5-23 (b). La plupart des points de mesure obtenus au moyen du CPT indiquent également un matériau légèrement surconsolidé.

## 5.2. Comparaison avec l'essai de pénétration statique

L'essai de pénétration statique est utilisé pour de nombreuses applications, comme cela a déjà été abordé dans le chapitre 2. Parmi celles-ci, l'évaluation des caractéristiques de déformabilité des matériaux sondés est fréquemment réalisée au départ de la résistance au cône du CPT. Il existe, pour ce faire, la relation empirique commune suivante :

$$E_{\text{œd}} = \alpha \cdot q_c \quad (5-26)$$

où :

- $E_{\text{œd}}$  = le module œdométrique,
- $q_c$  = la résistance au cône du CPT, et
- $\alpha$  = un coefficient empirique dont la valeur dépend du type de sol.

Le module œdométrique (tangent) s'exprime classiquement comme étant :

$$E_{\text{œd}} = \frac{\delta \sigma'_v}{\delta \varepsilon} = \frac{2,3(1 + e_0)\sigma'_v}{C_c} \quad (5-27)$$

En pratique, la relation (5-27) est appliquée en première approche pour évaluer des tassements sous une charge superficielle donnée. Les valeurs obtenues sont alors, idéalement, validées au moyen d'essais œdométriques ou au moyen d'essais pressiométriques. Ceux-ci permettent en effet d'évaluer les caractéristiques de déformabilité du matériau de manière plus fiable que ne le permet l'essai de pénétration statique. Mitchell et Gardner (1975) synthétisent les nombreuses valeurs du coefficient  $\alpha$  proposées jusqu'alors dans la littérature,

couvrant au total une vingtaine d'études différentes. Quelques-unes des principales études sont développées ci-après.

Dans une toute première approche, A. Buisman (1940) attribua la valeur de 1,5 au coefficient  $\alpha$ , pour des sols compressibles sans cohésion. Plus tard, Bachlier et Parez (1965), et G. Sanglerat (1972) relient le module œdométrique à la résistance au cône du CPT pour des types de sol assez diversifiés. Afin de prendre en compte la partie plastique de la courbe œdométrique, Sanglerat suggéra d'utiliser la relation (5-29) ci-dessous pour les sols normalement consolidés ( $OCR = 1$ ) ou partiellement consolidés ( $OCR < 1$ ), et la relation (5-30) pour les sols surconsolidés ( $OCR > 1$ ). Le calcul de l'indice de compression ( $C_c$ ) se réalise alors sur un intervalle de contrainte correspondant à 1 bar (100 kPa). Cet incrément est considéré comme cohérent pour des problématiques de tassements sous les fondations superficielles. Le Tableau 5-10 reprend les valeurs de  $\alpha$  proposées par Sanglerat (1972) pour différents types de sol.

$$\alpha = \frac{2,3(1 + e_0)\sigma'_{v0}}{C_{c0} \cdot q_c} \quad \text{si } OCR \leq 1 \quad (5-28)$$

où :

- $\sigma'_{v0}$  = la contrainte effective verticale in situ,
- $e_0$  = l'indice des vides initial, et
- $C_{c0}$  = l'indice de compression calculé entre les contraintes  $\sigma'_{v0}$  et ( $\sigma'_{v0}+1$ bar).

$$\alpha = \frac{2,3(1 + e_p)\sigma'_p}{C_{cp} \cdot q_c} \quad \text{si } OCR > 1 \quad (5-29)$$

où :

- $\sigma'_p$  = la contrainte effective verticale in situ,
- $e_p$  = l'indice des vides correspondant à  $\sigma'_p$ , et
- $C_{cp}$  = l'indice de compression calculé entre les contraintes  $\sigma'_p$  et ( $\sigma'_p+1$ bar).

Par ailleurs, l'Eurocode 7 (EN 1997-2, 2007)) fait référence aux valeurs de  $\alpha$  obtenues par Sanglerat (1972) (Tableau 5-10) pour évaluer les caractéristiques de déformabilité des sols à partir de résultats d'essais de pénétration statique. Or, l'Eurocode 7 suggère de déterminer le module œdométrique selon la norme ISO 17892-5 (2014), à savoir sous la formulation d'un module œdométrique sécant déterminé entre deux charges successives à l'œdomètre. Le calcul du coefficient  $\alpha$  est exprimé par l'équation 5-30. Par contre, il n'est nulle part fait mention explicitement des valeurs des chargements successifs à considérer pour le calcul du module œdométrique. En effet, ce dernier varie en fonction de la valeur de la contrainte verticale effective appliqué à l'éprouvette. S'il est déterminé entre deux niveaux de chargement successifs situés en début de partie plastique de la courbe œdométrique, la valeur de  $\alpha$  calculée sera proche de celle obtenue par la méthode proposée par Sanglerat (1972). Il est toutefois fréquent de déterminer le module œdométrique dans la partie linéaire plastique de la courbe œdométrique. Cela revient souvent à considérer les deux niveaux de chargement les plus élevés sur base des essais œdométriques réalisés dans ce travail.

$$\alpha = \frac{\sigma'_{v,(n+1)} - \sigma'_{v,(n)}}{\varepsilon_{v,(n+1)} - \varepsilon_{v,(n)}} \cdot \frac{1}{q_c} \quad (5-30)$$

où :

- $\sigma'_v$  = la contrainte effective verticale appliquée à l'éprouvette entre deux valeurs de chargement successives (n) et (n+1), et  
 $\varepsilon_v$  = déformation verticale entre deux paliers de chargement successifs (n) et (n+1).

Tableau 5-10 : Valeurs de  $\alpha$  pour différents types de sol (d'après Sanglerat, 1972).

Type de sol	$q_c$ (MPa)	w (%)	$\alpha$ (-)
<b>Sols argileux et limoneux</b>			
CL – argile faiblement plastique	< 0,7		3 - 8
	0,7 - 2		2 - 5
	> 2		1 - 2,5
ML – limon faiblement plastique	< 2		3 - 6
	> 2		1 - 2
OH – argile très plastique ; MH – OH – limon très plastique	< 2		2 - 6
	> 2		1 - 2
<b>Sols tourbeux et sols très organiques</b>			
OL – limon très organique	< 1,2		2 - 8
T – OH – tourbe et argile très organique	< 7	50 - 100	1,5 - 4
		100 - 200	1 - 1,5
		> 300	< 0,4
<b>Craie et sable</b>			
Craie	2-3		2-4
	> 3		1,5 - 3
Sable	< 5		2
	> 10		1,5

Enfin, Senneset *et al.* (1989) suggèrent de calculer le module œdométrique sécant entre deux paliers de chargement successifs, dans la partie linéaire plastique de la courbe œdométrique. C'est cette valeur de module œdométrique que les auteurs expriment en fonction de la résistance au cône nette du CPT pour déterminer le coefficient  $\alpha$ . Le Tableau 5-11 reprend les valeurs de  $\alpha$  pour différents types de sol. Le coefficient  $\alpha$  équivaut alors à :

$$\alpha = \frac{E_{\text{œd, sec}}}{(q_c - \sigma'_{v0})} \quad (5-31)$$

Tableau 5-11 : Valeurs de  $\alpha$  pour différents types de sol (d'après Mayne, 2007).

Types de sol	$\alpha$ (-)
Argiles plastiques à raides ; Sables normalement consolidés	$\approx 5$
Argiles organiques plastiques de Suède	1 - 2
Argiles très raides	10 - 20

Dans la suite de cette section, le coefficient  $\alpha$  est déterminé à partir des résultats de l'œdomètre et de ceux des CPT réalisés sur le site de Romont, au moyen des différentes relations précitées. Les valeurs ainsi obtenues sont alors comparées avec celles proposées dans la littérature pour un matériau correspondant. Le Tableau 5-12 synthétise les résultats de cette analyse. Les essais œdométriques pris en compte dans cette analyse correspondent aux 11 éprouvettes issues du forage F1 (échantillon F1-25 exclus car trop différent des autres). La résistance au cône considérée correspond à la valeur moyenne des trois essais CPT les plus proches du forage F1, à savoir les CPTE-04, CPTE-05 et CPTE-06 (Figure 4-13).

 Tableau 5-12 : Application des différentes approches de calcul du coefficient  $\alpha$ , au départ de données œdométriques et de CPT issus du site de Romont. Abréviations : CL = argile faiblement plastique ; NC = normalement consolidé ; OCR = rapport de surconsolidation.

Auteurs et normes	Calcul de $\alpha$	Valeurs de $\alpha$ proposées dans la littérature	Valeurs moyennes de $\alpha$ calculées (et écarts-types)
Eurocode 7 (EN 1997-2, 2007), avec $E_{\text{œd}}$ déterminé dans la partie linéaire plastique	éq. (5-30)	de 1 à 2,5 (pour CL avec $q_c > 2$ MPa) <sup>a</sup> de 1 à 2 (pour ML avec $q_c > 2$ MPa) <sup>a</sup>	3,57 ( $\pm 1,33$ )
Sanglerat (1972) pour $\text{OCR} \leq 1$	éq. (5-28)	de 1 à 2,5 (pour CL avec $q_c > 2$ MPa) de 1 à 2 (pour ML avec $q_c > 2$ MPa)	1,42 ( $\pm 0,64$ )
Sanglerat (1972) pour $\text{OCR} > 1$	éq. (5-29)	de 1 à 2,5 (pour CL avec $q_c > 2$ MPa) de 1 à 2 (pour ML avec $q_c > 2$ MPa)	1,85 ( $\pm 1,10$ )
Senneiset <i>et al.</i> (1989), avec $E_{\text{œd}}$ déterminé dans la partie linéaire plastique	éq. (5-31)	$\approx 5$ (pour de l'argile tendre à raide, et pour du sable NC) <sup>b</sup> ; de 1 à 2 (pour des argiles organiques plastiques de Suède) <sup>b</sup>	3,66 ( $\pm 1,36$ )

<sup>a</sup>Sanglerat (1972) ; <sup>b</sup>Mayne (2007)

À l'issue de cette analyse, les valeurs de  $\alpha$  obtenues par l'approche proposée par Sanglerat (1972) sont en accord avec la gamme de valeurs correspondant à un sol comparable (CL-ML), et ce quelque soit l'état de consolidation considéré. Les valeurs de  $\alpha$  calculées par l'approche de l'Eurocode 7 (EN 1997-2, 2007) sont plus élevées que celles recommandées par l'Eurocode 7 pour un sol comparable. Cela est lié à la façon de calculer le module œdométrique. L'Eurocode 7 considère un module œdométrique sécant, entre deux niveaux de chargement successifs, qui est souvent calculé dans la partie plastique linéaire de la courbe œdométrique. Les valeurs suggérées par la norme ont quant à elles été établies par Sanglerat (1972), en calculant un module œdométrique tangent au début de partie plastique de la courbe œdométrique, dans une section où la pente de la courbe est souvent moins importante que dans la partie plastique linéaire. Enfin, les valeurs calculées par l'approche proposée par de Sennezet *et al.* (1989), sont également en accord des valeurs renseignées par cette approche, pour un sol comparable.

Sanglerat (1972) est allé plus loin dans son analyse entre l'indice de compression et la résistance au cône du CPT. Il représenta graphiquement plus de 600 couples de points, correspondant à des matériaux différents, à des teneurs en eau variables, dans des contextes géologiques variés. Ceci permit de définir les bornes inférieure et supérieure de la corrélation entre ces deux variables. Ces bornes supérieure et inférieure possèdent respectivement les équations suivantes :

$$C_c = \frac{q_c - 4,2}{6q_c - 40} \quad (5-32)$$

$$C_c = \frac{0,05q_c}{q_c - 2} \quad (5-33)$$

Les courbes sont représentées sur la Figure 5-30. Le graphique initial de Sanglerat se limite aux valeurs de  $q_c \leq 4$  MPa. Elles ont ici été prolongées jusqu'à 12 MPa. En deçà de la valeur de 1 MPa, l'indice de compression peut atteindre des valeurs très variables et potentiellement très élevées. Par contre, au-delà de 1 MPa, l'indice de compression correspondant est beaucoup plus contraint, avec une valeur maximale habituellement sous 0,2, et ce quelque soit la valeur de  $q_c$ . Les points de mesures obtenus pour la séquence lœssique de Romont sont représentés sur le graphique suivant (Figure 5-30). L'ensemble des points se situent dans (ou à proximité immédiate de) l'intervalle de valeurs défini par Sanglerat (1972).

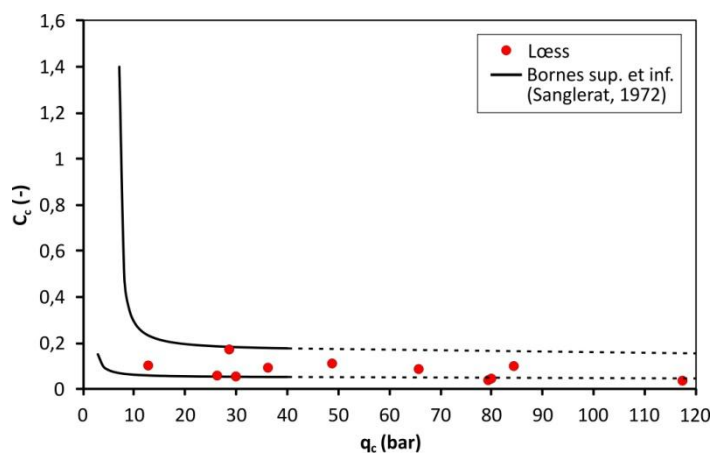


Figure 5-30 : Corrélation entre l'indice de compression ( $C_c$ ) et la résistance au cône ( $q_c$ ) du CPT pour le lœss du site de Romont.



Une remarque doit encore être mentionnée concernant l'état saturé ou non du matériau ayant servi à établir les relations entre  $q_c$  et  $C_c$  au moyen du coefficient  $\alpha$ . En effet, la teneur en eau peut avoir une influence considérable sur la déformabilité d'un matériau. La littérature n'est toutefois guère explicite sur ce point. Elle ne mentionne que trop rarement si l'essai œdométrique a été réalisé sur des échantillons ayant conservés leur teneur en eau in situ. Dans le cadre de l'analyse proposée pour les limons du site de Romont, le matériau in situ est partiellement saturé, alors que les essais œdométriques ont été réalisés sur des échantillons saturés. Ce choix d'avoir saturé les échantillons n'est dès lors probablement pas optimal en vue d'établir une corrélation avec la résistance au cône du CPT issue d'un matériau partiellement saturé. Les résultats obtenus par Sanglerat (1972) (synthétisés à la Figure 5-30), montrent que ce sont les matériaux ayant une résistance au cône inférieure à 1 MPa, qui voient leurs caractéristiques de déformabilité grandement influencées par la teneur en eau. Au-delà de 1 MPa, l'indice de compression varie nettement moins, et ce quelque soit la teneur en eau du matériau. Les analyses in situ, réalisées sur les trois sites d'étude en région hesbignonne, ont montré que les dépôts lœssiques étudiés possèdent rarement des valeurs de  $q_c$  inférieures à 1 MPa.

### 5.3. Susceptibilité à l'effondrement

Les essais œdométriques réalisés en condition saturée ont permis d'évaluer la déformabilité du lœss sous une charge verticale croissante et décroissante. Les résultats de cette analyse ont été développés en début de section (section 5.1). Le lœss est également bien connu pour être un sol pouvant présenter des risques d'effondrement, comme cela a déjà été observé en Europe de l'Est, en Russie, en Chine, en Amérique du Nord, ainsi que dans le nord de la France (Krinitsky & Turnbull, 1967 ; Li, 1995 ; Delage *et al.*, 2005). Le phénomène d'effondrement se traduit généralement par l'apparition de déformations irréversibles importantes en lien avec un réarrangement des particules. Il se produit habituellement par imbibition de sols lâches initialement partiellement saturés. L'évaluation du potentiel effondrable du matériau se réalise classiquement au moyen d'essais œdométriques spécifiques, dont l'approche générale vise à comparer la déformation mesurée entre un matériau partiellement saturé et ce même matériau saturé.

Cependant, en Belgique, les dépôts lœssiques ne sont pas réputés pour présenter fréquemment des effondrements. La campagne expérimentale réalisée en laboratoire, n'a dès lors pas été orientée pour évaluer en détail ce comportement particulier. Toutefois, certains paramètres, acquis au moyen de la granulométrie, des limites d'Atterberg, et de l'essai œdométrique en condition saturée, permettent une estimation qualitative succincte du potentiel d'effondrement du lœss. Cette approche se base sur une série de critères empiriques qui ont été proposés dans la littérature. La suite de cette section présente dans un premier temps les principaux critères renseignés dans la littérature, puis développe les résultats obtenus pour le lœss issu du site de Romont. Cependant, ni l'analyse bibliographique, ni l'analyse des résultats n'ont été particulièrement poussées, étant donné que le lœss ne présente a priori pas de risque d'effondrement en Belgique.

Le caractère effondrable d'un sol dépend de nombreux facteurs. Les propriétés importantes qui l'influencent concernent notamment son état naturel (teneur en eau, degré de saturation, poids volumique sec ou humide, limites de liquidité et de plasticité, indice de plasticité, indice des vides...). D'autres facteurs influencent également la susceptibilité à l'effondrement d'un sol : le type de sol (minéralogie, granulométrie), la nature des agents de liaison et de cimentation, la contrainte appliquée, ou encore la quantité et la dynamique de mouillage (Bruchon, 2014).

Afin d'identifier un sol potentiellement effondrable, plusieurs critères empiriques ont été proposés dans la littérature. Les principales méthodes sont développées ci-après. Elles se basent essentiellement sur les propriétés physiques qui caractérisent le matériau. Le Tableau 5-13 reprend les différents critères servant à identifier les sols effondrables au moyen de ces méthodes.

- Denisov (1951) propose une méthode qui compare l'indice des vides initial ( $e_0$ ) à l'indice des vides correspondant à la limite de liquidité ( $e(w_L) = w_L \gamma_s$ ). Le rapport entre  $e(w_L)$  et  $e_0$  mène à la détermination du paramètre  $K_e$ . Lorsque  $K_e = 0,5-0,75$ , le matériau est considéré comme étant fortement effondrable, alors qu'au-delà de 1,5, le sol est non effondrable.
- Priklonskij (1952) utilise uniquement la teneur en eau naturelle et les limites d'Atterberg. Cette méthode considère qu'un sol est fortement effondrable lorsque sa teneur en eau naturelle est supérieure à la limite de liquidité, et ce quelle que soit sa densité.
- Clevenger (1958) prend en compte uniquement la densité sèche du matériau pour évaluer le caractère effondrable d'un sol. La valeur seuil est fixée à 14,1 kN/m<sup>3</sup>. En deçà, le sol peut subir des tassements moyens à importants.
- Gibbs et Bara (1962) comparent la teneur en eau de l'état saturé ( $w_{sat} = \gamma_w / \gamma_d - 1 / \gamma_s$ ) à la limite de liquidité. Le sol est effondrable lorsque la teneur en eau de l'état saturé est supérieure à la limite de liquidité.
- La Code russe de la construction (1962) considère les mêmes paramètres initiaux que Denisov (1951), en y ajoutant le degré de saturation, qui doit être supérieur à 60 % pour que le sol ne soit pas effondrable.
- Feda (1964) définit un critère légèrement plus élaboré qui prend en compte la teneur en eau naturelle, le degré de saturation, la limite de plasticité et l'indice de plasticité. Pour cette méthode, il faut atteindre un degré de saturation inférieur à 100 % pour que le sol soit effondrable.
- Handy (1973) propose un critère très simple à la suite d'étude sur le lœss de l'Iowa. Seule la proportion de passant à 2  $\mu\text{m}$  est prise en compte. Lorsque celle-ci est inférieure à 16 %, le sol présente un risque élevé d'effondrement.
- Kassiff et Henkin (1967) considèrent le produit du poids volumique sec (exprimé en g/cm<sup>3</sup>) et de la teneur en eau naturelle (exprimée en %). Le sol est alors fortement effondrable lorsque ce produit est inférieur à 15.

Ces critères sont souvent définis par des notions simples pour identifier les sols effondrables. Chaque critère favorise généralement une propriété par rapport aux autres. C'est pourquoi, il est préférable de croiser les résultats de plusieurs critères pour s'assurer du caractère effondrable d'un sol. En pratique, ils sont surtout utilisés en première approche, afin d'identifier d'éventuelles couches pouvant présenter des risques d'effondrement. Cette approche qualitative doit alors, le cas échéant, être complétée par d'autres essais en laboratoire, permettant d'évaluer l'ampleur du tassement lors d'une imbibition. Les essais les plus fréquents sont le simple œdomètre et le double œdomètre. Dans le cas de l'essai au simple œdomètre (Knight, 1963), l'échantillon est d'abord chargé en condition partiellement saturée, jusqu'à un niveau de chargement désiré (p. ex. 200 kPa). Une fois ce palier de chargement atteint, l'éprouvette est alors mouillée à charge constante, et la déformation résultante est finalement mesurée. Un essai au double œdomètre consiste à réaliser deux essais œdométriques en parallèle (Jennings & Knight, 1957). L'un est réalisé en condition partiellement saturée, alors que la seconde éprouvette est saturée préalablement à l'application

d'un quelconque chargement. La méthode consiste in fine à comparer les déformations ou indices de vides obtenus pour chacun des essais, pour une même charge donnée. Cette deuxième méthode présente comme avantage d'évaluer la différence de déformation pour plusieurs paliers de chargement. Par contre, la méthode du double œdomètre se réalise au départ de deux éprouvettes normalement identiques mais en pratique toujours légèrement différentes, ce qui peut amener à une estimation erronée de l'effondrement.

La suite de cette section présente une brève analyse de la susceptibilité à l'effondrement des horizons rencontrés au sein de la séquence lœssique du site de Romont. Cette analyse repose sur l'identification des ces horizons au moyen des critères développés préalablement et synthétisés dans le Tableau 5-13. Une analyse plus quantitative au moyen de l'essai œdométrique (simple ou double) n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail, puisque le lœss ne présente pas de risque particulier vis-à-vis de son effondrement, en Belgique.

Les valeurs obtenues pour chacun des critères d'identification des sols effondrables sont présentées dans le Tableau 5-14 suivant. Un total de 15 échantillons a été utilisé pour cette analyse. Les valeurs indiquant une certaine susceptibilité à l'effondrement sont mises en évidence dans le Tableau 5-14. Il en ressort que seuls trois échantillons (F1-19 haut et bas, et F2-4) sont caractérisés par un total de trois critères défavorables sur les huit analysés. Parmi ceux-ci, il semble que le critère proposé par Handy (1973) est très pessimiste en considérant dix échantillons comme présentant un risque élevé d'effondrement. C'est en effet le seul critère qui considère autant d'échantillons effondrables. Il faut ajouter que ce critère est très simple puisqu'il ne se base que sur la proportion granulométrique appartenant à l'argile. Les notions de densité, de degré de saturation et de teneur en eau ne sont pas prises en compte. Les deux autres critères qui mettent en évidence des échantillons effondrables, sont le critère de Gibbs et Bara (1962) et celui de Feda (1964). La Figure 5-31 représente graphiquement le critère de Gibbs et Bara (1962). Les horizons qui présentent le plus de risques d'effondrement, sont le Complexe Humifère de Remicourt, et dans une moindre mesure, l'horizon Bt holocène, proche de la surface topographique. Le risque semble toutefois relatif, puisque seuls trois des huit critères ont indiqué une certaine susceptibilité à l'effondrement. Des analyses complémentaires quantitatives sont nécessaires pour vérifier cette conclusion. Celles-ci peuvent être apportées par la réalisation d'essais au simple ou au double œdomètre.

Tableau 5-13 : Définition des critères pour l'identification des sols effondrables (modifié, d'après Bruchon, 2014).

Méthodes	Critères d'évaluation
Denisov (1951)	$K_e = \frac{e(w_L)}{e(w_{nat})}$ <p>Si <math>K_e = 0,5 - 0,75</math> : fortement effondrable            Si <math>K_e = 1,5 - 2</math> : non effondrable</p>
Priklonskij (1952)	$K_D = \frac{w_L - w_{nat}}{I_p}$ <p>Si <math>K_D &lt; 0</math> : fortement effondrable            Si <math>K_D &gt; 0,5</math> : non effondrable            Si <math>K_D &gt; 1</math> : gonflant</p>
Clevenger (1958)	<p>Si <math>\gamma_d &lt; 12,6 \text{ kN/m}^3</math> : tassements importants            Si <math>\gamma_d &gt; 14,1 \text{ kN/m}^3</math> : tassements faibles</p>
Gibbs & Bara (1962)	$R = \frac{w_{sat}}{w_l}$ <p>Si <math>R &gt; 1</math> : effondrable</p>
Code russe de la construction (1962)	$L = \frac{e(w_{nat}) - e(w_L)}{1 + e(w_{nat})}$ <p>Si <math>L &gt; -0,1</math> et <math>S_r &lt; 60 \%</math> : effondrable</p>
Feda (1964)	$K_L = \frac{w_{nat}/S_r - w_p}{I_p}$ <p>Si <math>K_L &gt; 0,85</math> et <math>S_r &lt; 100 \%</math> : effondrable</p>
Handy (1973)	<p>Lœss de l'Iowa avec une fraction argileuse (<math>&lt; 2 \mu\text{m}</math>) :</p> <p>si <math>&lt; 16 \%</math> : haut risque d'effondrement            si <math>&gt; 32 \%</math> : généralement pas de risque</p>
Kassiff & Henkin (1967)	<p>Si <math>\gamma_d w_{nat} &lt; 15</math> : fortement effondrable</p>

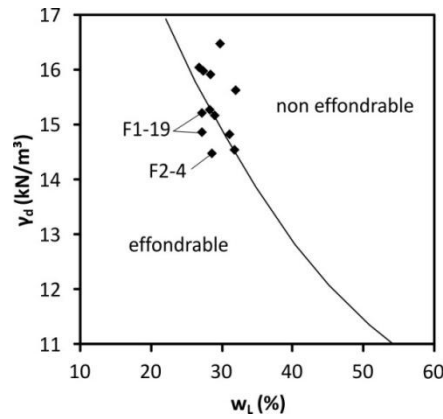


Figure 5-31 : Évaluation de la susceptibilité à l'effondrement d'échantillons lœssiques du site de Romont, au moyen du critère de Gibbs et Bara (1962).

Tableau 5-14 : Applications des critères pour l'identification de sols effondrables, aux échantillons lœssiques du site de Romont.

Éch.	Prof (m)	Denisov (1951)	Priklonskij (1952)	Clevenger (1958)	Gibbs & Bara (1962)	Code russe de la construction (1962)	Feda (1964)	Handy (1973)	Kassiff & Henkin (1967)
		$K_e$ (-)	$K_D$ (-)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	R (-)	L (-)	$K_L$ (-)	Passant à 2 $\mu\text{m}$ (%)	$\gamma_d w_{\text{nat}}$
F1-4	1,63	1,35	1,50	15,17	0,96	-0,16	<b>0,90</b>	21,00	31,51
F1-5	2,10	1,60	1,29	15,92	0,85	-0,24	0,61	<b>13,99</b>	26,04
F1-7	2,98	1,44	1,56	15,98	0,90	-0,18	0,71	<b>10,77</b>	26,30
F1-12	4,98	1,32	1,06	14,54	0,97	-0,15	<b>0,97</b>	19,99	30,67
F1-18	7,70	1,46	1,81	16,04	0,89	-0,19	0,62	<b>13,31</b>	27,07
F1-19 haut	8,01	1,18	0,74	14,86	<b>1,09</b>	-0,08	<b>1,49</b>	<b>11,29</b>	33,76
F1-19 bas	8,24	1,24	0,86	15,22	<b>1,03</b>	-0,11	<b>1,24</b>	<b>11,29</b>	33,44
F1-20 haut <sup>a</sup>	8,46	N/A	N/A	16,04	N/A	N/A	N/A	<b>8,28</b>	24,56
F1-20 bas <sup>a</sup>	8,73	N/A	N/A	16,06	N/A	N/A	N/A	<b>9,22</b>	25,10
F1-21 haut	8,98	1,76	0,98	16,48	0,75	-0,29	0,35	17,16	32,54
F1-21 bas	9,23	1,53	1,15	15,63	0,83	-0,23	0,50	22,68	32,40
F1-25	10,80	1,52	1,92	18,44	0,87	-0,16	0,49	<b>8,99</b>	21,94
F2-3	1,20	1,40	1,13	14,83	0,94	-0,18	<b>0,93</b>	19,55	31,73
F2-4	1,70	1,21	2,14	14,48	<b>1,08</b>	-0,10	<b>1,74</b>	<b>9,37</b>	25,92
F2-5	2,20	1,35	3,78	15,27	0,97	-0,15	<b>1,05</b>	<b>7,53</b>	20,16

<sup>a</sup> les limites de liquidité et de plasticité n'ont pas pu être mesurées sur l'échantillon F1-20. Ceci rend certains critères non applicables (N/A).

## 5.4. Synthèse intermédiaire

L'analyse des résultats œdométriques réalisés en conditions saturées indique bien que le lœss du site de Romont possède des caractéristiques moyennes de déformabilité typiques de celles d'un limon. Elles sont également proches d'autres données issues de matériaux lœssiques de Belgique et du nord de la France. Ainsi, le lœss de Romont possède, entre autres, les caractéristiques moyennes suivantes :  $\gamma_d = 15,5 (\pm 0,6)$  kN/m<sup>3</sup> ;  $e_i = 0,76 (\pm 0,08)$  ;  $S_r = 67,8 (\pm 9,9)$  % ;  $C_c = 0,136 (\pm 0,06)$  ;  $C_s = 0,012 (\pm 0,007)$  ;  $E_{\text{œd, sec}} = 9,6 (\pm 5,1)$  MPa. Par ailleurs, l'analyse rapide des critères d'identification des sols effondrables révèle que le lœss de Romont ne semble pas particulièrement sensible au phénomène d'effondrement. En effet, dans les cas les plus défavorables, seuls trois critères sur les huit étudiés indiquent un caractère effondrable.

Lorsque les caractéristiques des différents horizons sont comparées entre elles, il est intéressant de souligner un contraste évident entre le Complexe Humifère de Remicourt et le sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Ce dernier présente en effet les caractéristiques en termes de déformabilité les plus favorables de l'ensemble des horizons analysés. Le module œdométrique sécant  $y$  est deux fois plus élevé que dans le Complexe Humifère de Remicourt, et l'indice de compression  $y$  est 2 à 3 fois plus faible. Le Complexe Humifère de Remicourt se trouve parmi les horizons qui montrent la déformation à l'œdomètre la plus importante. C'est également ce même horizon qui rassemble le plus de critères défavorables vis-à-vis de la susceptibilité à l'effondrement. Des analyses complémentaires telles que la réalisation de simples ou de doubles œdomètres permettraient de préciser et surtout de quantifier la déformation à la suite d'une modification du degré de saturation du matériau. En outre, l'étude de l'état de surconsolidation révèle que la partie supérieure de la séquence lœssique est surconsolidée ( $\text{OCR} > 2$ ) alors que les horizons sous-jacents sont normalement à légèrement surconsolidés ( $\text{OCR}$  compris entre 1 et 2).

Enfin, les investigations géotechniques menées sur la séquence lœssique du site de Romont permettent de vérifier la relation qui relie l'indice de compression (ou le module œdométrique tangent) à la résistance au cône du CPT. Ces deux variables sont reliées de manière empirique au moyen d'un coefficient  $\alpha$  qui dépend du type de sol en présence. Les différentes méthodes proposées dans la littérature pour déterminer le module œdométrique, ont été appliquées, et la valeur correspondante du coefficient  $\alpha$  a été calculée. Il en ressort que la valeur moyenne de  $\alpha$ , obtenue pour le lœss de Romont par la méthode de Sanglerat (calcul du module œdométrique tangent au début de la partie plastique de la courbe œdométrique), est en accord avec les valeurs attendues pour un matériau comparable. Par contre, la valeur moyenne de  $\alpha$ , obtenue par la méthode préconisée par l'Eurocode 7 pour déterminer le module œdométrique sécant (entre deux niveaux de chargement successifs souvent considérés dans la partie plastique linéaire), est supérieure aux valeurs mentionnées par l'Eurocode 7 pour un matériau similaire.

## 6. Caractéristiques de résistance mécanique

Les résultats acquis à l'issue de la campagne d'essais triaxiaux et de cisaillement direct sont présentés et discutés dans cette section. Les valeurs des variables de résistance au cisaillement sont ensuite comparées à la résistance au cône de l'essai de pénétration statique pour proposer une approche permettant de déduire conjointement la cohésion et l'angle de frottement apparents d'un matériau limoneux partiellement saturé.

### 6.1. Résultats des essais triaxiaux et de cisaillement direct

Les résultats issus des essais triaxiaux sont présentés dans un premier temps, et sont suivi par ceux relatifs à la campagne d'essais de cisaillement direct. L'ensemble de ces données sont finalement discutées afin de préciser les caractéristiques liées à la résistance au cisaillement du limon du site de Romont. La discussion porte sur les différents aspects suivants :

- les paramètres susceptibles d'influencer la cohésion et l'angle de frottement. Pour ce faire une analyse de l'influence de certains de ces paramètres ( $w$ ,  $S_r$ ,  $\gamma_h$ ,  $\gamma_d$ ) sur les valeurs de  $c$  et de  $\phi$  obtenues, est présentée ;
- les valeurs de  $c$  et de  $\phi$  obtenues par les différents types d'essais sont comparées afin d'évaluer une éventuelle influence du choix du type d'essai sur les variables de résistance au cisaillement.
- une analyse stratigraphique des caractéristiques de résistance au cisaillement est présentée. Une attention particulière est portée sur les horizons situés aux alentours de l'Horizon blanchi de Momalle. Ce dernier correspond en effet à l'horizon stratigraphique le plus clairement identifiable sur base de la résistance au cône du CPT, comme cela a été discuté dans le chapitre 4.

Afin de s'approcher au mieux des conditions in situ rencontrées lors de l'enfoncement de la pointe du CPT, la plupart des essais triaxiaux ont été réalisés dans des conditions partiellement saturées. Les éprouvettes sont alors non consolidées et non drainées (UU). Seuls deux essais triaxiaux ont été soumis à une phase de consolidation précédée par la saturation des éprouvettes. La phase de cisaillement a été réalisée en condition non drainée. Ces deux essais sont donc consolidés non drainés (CU). Au total, 14 essais triaxiaux ont été effectués sur le loess du site de Romont, principalement issu du forage central F1.

Seuls trois essais ont pu être réalisés au moyen d'éprouvettes non reconstituées. En raison de nombreux plans de discontinuité présents dans les carottes, les autres éprouvettes triaxiales ont dû être reconstituées à partir du matériau échantillonné, en veillant à conserver la teneur en eau et la densité in situ. La technique de forage est probablement responsable de ces plans de discontinuité observés perpendiculairement à l'axe de la carotte. Le Tableau 5-15 suivant reprend la liste des échantillons investigués, ainsi que les principales données techniques concernant le protocole expérimental.

Tableau 5-15 : Échantillons sélectionnés pour les essais triaxiaux et données techniques sur le protocole expérimental. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; CU = essai consolidé – non drainé ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; UU = essai non consolidé – non drainé ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Horizon stratigraphique	Prof. (m)	Type	Diamètre éprouvette (mm)	Reconstitué ?	$\sigma'_v$ (kPa)	Contraintes de confinement ( $\sigma'_3$ ou $\sigma_3$ , kPa)
F1-4	Horizon Bt holocène	1,63	CU	50	Oui	30,04	50-100-200
F1-5	Limon brabantien sous LD	2,10	CU	50	Oui	38,82	50-100-200
F1-7	HLN	2,98	UU	35	Non	54,99	50-100-200
F1-9	Limon hesbayen sous HLN	3,68	UU	35	Oui	68,01	100-200-400
F1-10	Harveng ?	4,08	UU	35	Oui	73,77	100-200-400
F1-11	Harveng ?	4,53	UU	35	Oui	83,71	100-200-400
F1-12	Limon sus-jacent à MAL	4,98	UU	50	Oui	91,96	100-200-400
F1-14	Complexe stratifié inf.	5,90	UU	35	Oui	109,03	100-200-400
F1-16	Complexe stratifié inf.	6,80	UU	35	Oui	125,66	100-200-400
F1-18	Complexe stratifié inf.	7,70	UU	50	Oui	142,33	100-200-400
F1-19 haut	CHR – partie sup.	8,01	UU	50	Oui	148,12	100-200-400
F1-21 haut	VSG-B	8,98	UU	35	Non	165,90	100-200-400
F1-25	Sous PR	10,80	UU	35	Non	199,63	150-300-600
F3-23	HBM	10,50	UU	35	Oui	194,04	150-300-600

Le tableau 5-16 suivant présente les valeurs moyennes de  $c$  et de  $\phi$  obtenues au moyen des essais triaxiaux CU et UU. Les droites de Mohr-Coulomb correspondant aux valeurs moyennes, et moyennes  $\pm$  écart-type, de  $c$  et de  $\phi$  sont représentées dans le plan p-q de la Figure 5-33. Ces valeurs relatives, au site de Romont, sont comparées à celles mesurées à partir d'autres matériaux lœssiques, renseignées dans la littérature scientifique.

Dans le détail, les résultats relatifs à chaque essai triaxial UU, sont représentés dans le plan p-q à la Figure 5-32. La plupart des points correspondant à un même échantillon sont correctement alignés ( $R^2 > 0,98$ ). Cependant, les résultats relatifs aux échantillons F1-10 et F1-12 montrent un alignement des points expérimentaux moins évident (Figure 5-32 (b)). Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la droite de régression linéaire vaut respectivement, 0,48 et 0,88. Les points expérimentaux obtenus à l'issue du confinement le plus important ne semblent pas s'aligner selon la tendance globale. Les points correspondant au confinement le plus élevé, pour chacun de ces deux échantillons, ne sont pas considérés dans la suite de l'analyse, et les variables  $c$  et  $\phi$  sont déterminées à partir des deux points expérimentaux restants.



Tableau 5-16 : Valeurs moyennes obtenues au moyen des essais triaxiaux UU et CU.

	$c_{UU}$ (kPa)	$\phi_{UU}$ (°)	$c_{CU}$ (kPa)	$\phi_{CU}$ (°)	$c'_{CU}$ (kPa)	$\phi'_{CU}$ (°)
Lœss de Romont (Belgique)	42,5 (±16,2)	22,0 (±6,1)	27,5	18,0	9,8	35,6
Limon de plateau (carte de Vottem, Belgique) <sup>a</sup>			6,1 (±3,3)	20,6 (±6,9)	3,1 (±2,6)	27,2 (±3,2)
Lœss (N. France) <sup>b</sup>			20	28		
Lœss (Chine) <sup>c</sup>			3-5	18-22		
Lœss (Mississippi, USA) <sup>d</sup>	75,8 (w = 16 %)	24 (w = 16 %)				
Lœss (Iowa, USA) <sup>e</sup>	69 (w = 20 %)	13,5 (w = 20 %)				

<sup>a</sup> Fagnoul *et al.* (1982) ;

<sup>b</sup> Leplat (1968) ;

<sup>c</sup> Kie (1988) ;

<sup>d</sup> Matalucci *et al.* (1970) ;

<sup>e</sup> Kane (1968).

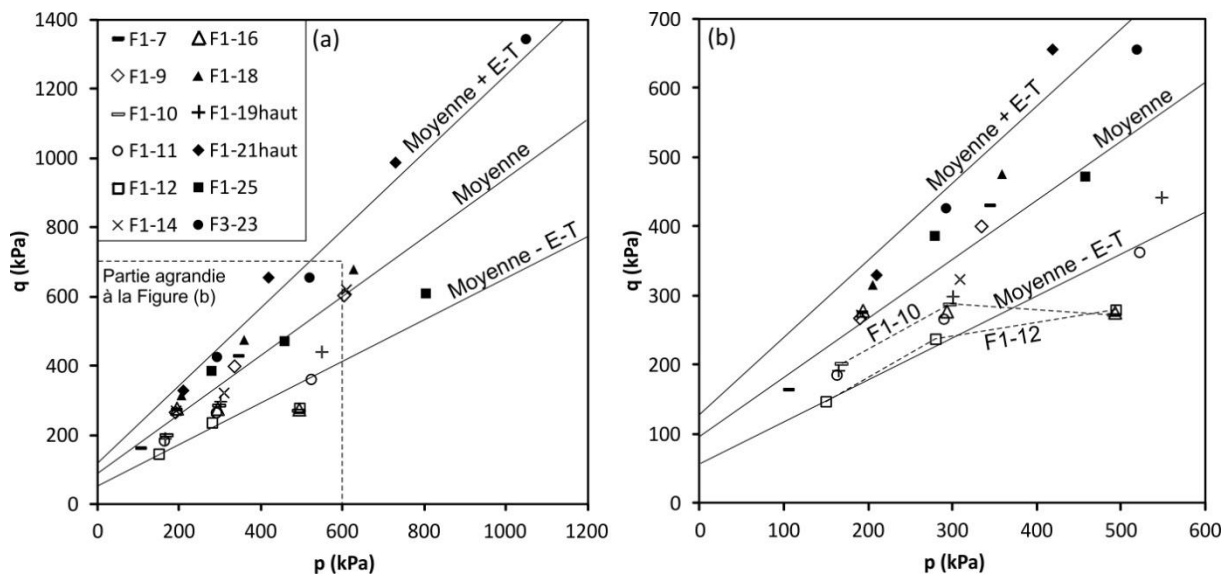


Figure 5-32 : Représentation des résultats des essais triaxiaux UU dans le plan p-q, correspondant aux valeurs maximales de la contrainte déviatorique mesurées. (a) Ensemble des résultats. (b) Agrandissement des résultats aux alentours des plus faibles états de contraintes.

Le Tableau 5-17 mentionne l'ensemble des résultats obtenus au moyen des essais triaxiaux CU et UU. Les variables  $c$  et  $\phi$  sont déterminées au moyen de la droite de régression linéaire d'équation 5-21, dans le plan p-q. Les valeurs présentées sont celles correspondant au critère de rupture  $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ . Les échantillons F1-16 et F1-25 présentent des valeurs de cohésion particulièrement élevées (respectivement, 138,9 et 129,9 kPa) et des valeurs d'angle de frottement nettement plus faibles (respectivement, 0 et 11,4°) que celles de la tendance globale, et ce malgré un alignement correct des points expérimentaux représentés dans le plan p-q. Les résultats obtenus au moyen des essais de caractérisation physique (granulométrie et limite d'Atterberg), ainsi que des essais œdométriques ont révélé que l'échantillon F1-25 possède des caractéristiques plus sablo-limoneuses, assez différentes de celles des autres échantillons analysés. Ces caractéristiques physiques vont toutefois à l'encontre des caractéristiques mécaniques mesurées. Ces dernières se rapprochent, en effet, plus d'un matériau argileux, avec une cohésion élevée et un angle de frottement faible. Le degré de saturation caractérisant l'échantillon F1-25 avant cisaillement des éprouvettes, est particulièrement élevé. Sa valeur équivaut en effet à 93,5 %, largement supérieure à la valeur moyenne des autres échantillons.

L'échantillon F1-16 est, quant à lui, plus méconnu jusqu'à présent, puisqu'il n'a pas fait l'objet d'analyse granulométrique, ni de mesures à l'œdomètre. Un angle de frottement nul est caractéristique d'une argile saturée. Le comportement mesuré pour l'échantillon F1-16 est inattendu pour un matériau majoritairement limoneux. Cet échantillon provient du même horizon stratigraphique que les échantillons F1-14 et F1-18, qui présentent des caractéristiques mécaniques cohérentes et plus plausibles pour un tel matériau. De manière comparable à l'échantillon F1-25, l'échantillon F1-16 présente une valeur du degré de saturation plus élevée (81,0 %) que la valeur moyenne. Ces différentes observations conduisent à ne pas considérer les résultats relatifs aux échantillons F1-16 et F1-25 dans la suite de l'analyse.

Tableau 5-17 : Résultats obtenus à l'issue des essais triaxiaux UU et CU. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; CU = essai consolidé – non drainé ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; UU = essai non consolidé – non drainé ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Horizon stratigraphique	Prof. (m)	w (%)	S <sub>r</sub> (%)	γ <sub>h</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	c <sub>u</sub> (kPa) <sup>a</sup>	φ <sub>u</sub> (°) <sup>a</sup>	c' (kPa) <sup>a</sup>	φ' (°) <sup>a</sup>
F1-4	Horizon Bt holocène	1,63	19,8	72,1	18,6	15,5	10,9	21,2	12,3	39,6
F1-5	Limon brabantien sous LD	2,10	17,2	60,4	17,7	15,1	44,1	14,7	7,3	31,5
F1-7	HLN	2,98	14,1	53,2	18,0	15,8	26,3	27,8		
F1-9	Limon hesbayen sous HLN	3,68	18,5	96,3	21,2	17,9	56,9	20,9		
F1-10 <sup>b</sup>	Harveng ?	4,08	20,9	87,3	19,9	16,5	42,8	5,4		
F1-11	Harveng ?	4,53	22,9	74,7	18,2	14,8	54,7	12,9		
F1-12 <sup>b</sup>	Limon sus-jacent à MAL	4,98	20,9	70,0	18,2	15,0	20,8	9,9		
F1-14	Complexe stratifié inf.	5,90	18,9	76,2	19,4	16,4	40,5	22,3		
F1-16 <sup>c</sup>	Complexe stratifié inf.	6,80	20,7	81,0	19,4	16,0	138,9	0		
F1-18	Complexe stratifié inf.	7,70	17,1	70,6	19,1	16,3	71,9	21,9		
F1-19	CHR – partie sup. haut	8,01	22,7	71,4	18,0	14,7	44,6	16,9		
F1-21	VSG-B haut	8,98	13,8	67,3	19,7	17,3	44,1	31,2		
F1-25 <sup>c</sup>	Sous PR	10,80	17,6	93,5	20,8	17,7	129,9	11,4		
F3-23	HBM	10,50	18,4	75,7	19,4	16,4	22,7	30,7		

<sup>a</sup> le critère de rupture correspond à  $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$  ;

<sup>b</sup> les valeurs de cohésion et d'angle de frottement indiquées dans le tableau correspondent aux valeurs corrigées en ne considérant que deux des trois points expérimentaux ;

<sup>c</sup> l'échantillon n'est pas pris en compte dans la suite de l'analyse.

Les essais de cisaillement direct ont été réalisés sur neuf échantillons issus principalement du forage F1. Ils ont été effectués à teneur en eau in situ, sur des éprouvettes reconstituées à la densité in situ. Une légère consolidation précède la phase de cisaillement, afin de remettre l'échantillon dans un état de contraintes voisin de celui dans lequel il était en place. La phase de cisaillement se réalise en condition non drainée. Les différentes contraintes normales appliquées sont semblables entre les échantillons. Le Tableau 5-18 synthétise les principales données techniques concernant la procédure expérimentale relative aux essais de cisaillement direct.

Tableau 5-18 : Échantillons sélectionnés pour les essais de cisaillement direct et données techniques sur le protocole expérimental. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; MAL = Sol de Malplaquet ; UU = essai non consolidé – non drainé.

Éch.	Horizon stratigraphique	Prof. (m)	Type	Reconstitué ?	$\sigma'_v$ (kPa)	Contraintes normales (N, kPa)
F1-9	Limon hesbayen sous HLN	3,68	UU	Oui	68,01	100-200-400
F1-10	Harveng ?	4,08	UU	Oui	73,77	100-200-400
F1-11	Harveng ?	4,53	UU	Oui	83,71	100-200-400
F1-12	Limon sus-jacent à MAL	4,98	UU	Oui	91,96	100-200-400
F1-14	Complexe stratifié inf.	5,90	UU	Oui	109,03	100-200-400
F1-16	Complexe stratifié inf.	6,80	UU	Oui	125,66	100-200-400
F1-18	Complexe stratifié inf.	7,70	UU	Oui	142,33	100-200-400
F1-19 haut	CHR – partie sup.	8,01	UU	Oui	148,12	100-200-400
F3-23	HBM	10,50	UU	Oui	194,04	100-200-400

L'ensemble des résultats obtenus au moyen de la campagne d'essais de cisaillement direct est représenté dans le plan  $\sigma$ - $\tau$  à la Figure 5-33. Les valeurs des paramètres  $c_u$  et  $\phi_u$ , ainsi que celles correspondant à la teneur en eau, au degré de saturation, à la densité in situ et à la densité sèche, sont indiquées dans le Tableau 5-19. Les valeurs de  $c_u$  et  $\phi_u$  sont déterminées par régression linéaire dans le plan  $\sigma$ - $\tau$ . Toutes les droites de régression possèdent un coefficient de détermination ( $R^2$ ) supérieur à 0,98. Les valeurs moyennes ( $\pm$  l'écart-type) ainsi obtenues valent, à la rupture :  $c_u = 24,1 (\pm 23,8)$  kPa et  $\phi_u = 24,2 (\pm 4,8)^\circ$ . Les droites de Mohr-Coulomb correspondant aux valeurs moyennes ( $\pm$  l'écart-type) à la rupture sont également représentées sur la Figure 5-33. Les valeurs résiduelles obtenues sont très proches des valeurs à la rupture, et valent en moyenne :  $c_u = 22,1 (\pm 24,8)$  kPa et  $\phi_u = 23,7 (\pm 4,7)^\circ$ .

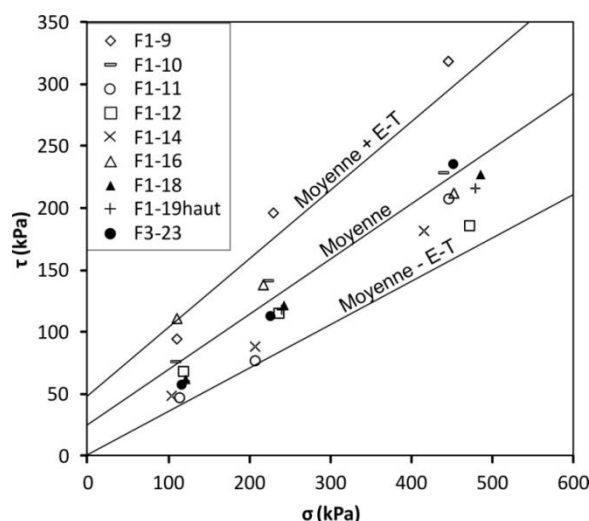


Figure 5-33 : Représentation des résultats des essais de cisaillement direct non drainé.

Il existe de nombreux facteurs qui peuvent influencer plus ou moins grandement les paramètres apparents (en condition non drainée) de la résistance au cisaillement. Certaines variables affectent plus la cohésion que l'angle de frottement. Pour d'autres, c'est l'inverse qui s'observe. Pour comprendre plus clairement l'influence d'une seule variable sur le comportement mécanique du matériau, il est habituellement nécessaire de réaliser une analyse au départ d'un matériau homogène pour lequel une ou plusieurs autres variables sont constantes. Cela nécessite souvent de remanier le matériau afin de reconstituer des éprouvettes avec les caractéristiques physiques souhaitées. La synthèse bibliographique qui suit se base sur des résultats obtenus sur des matériaux limoneux, essentiellement lœssiques, au moyen d'essais triaxiaux ou d'essai de cisaillement direct en condition non drainée.

La teneur en eau est une variable déterminante pour la résistance au cisaillement d'un limon. Dans le cas d'un tel matériau, la teneur en eau influence la cohésion. D'une manière générale, la cohésion diminue en lien avec une augmentation de la teneur en eau. Depuis un état sec, une augmentation de la teneur en eau engendre d'abord une rapide diminution de la cohésion, lorsque celle-ci est inférieure à 14 %. La cohésion diminue toujours, mais de manière moins marquée, pour une augmentation de la teneur en eau au-delà de la valeur de 14 % (Kane, 1968). Ce résultat, réalisé sur du lœss provenant de Chine, rejoint celui obtenu plus tard par Leclercq et Verbrugge (1985) sur le limon de Sterrebeek (Belgique). Une relation a d'ailleurs été proposée liant la cohésion apparente à la teneur en eau, pour une densité sèche constante :

$$c_u = 27247 w^{-2,3574} (\gamma_d = 15,0 \text{ kN/m}^3) \quad (5-34)$$

L'influence de la teneur en eau sur l'angle de frottement est un sujet toujours débattu aujourd'hui. Certaines études indiquent que l'angle de frottement tend à diminuer lorsque la teneur en eau augmente (Kane, 1968 ; Kie, 1988). D'autres études n'observent pas d'influence entre les deux variables, alors que d'autres encore observent une augmentation de l'angle de frottement en lien avec une augmentation de la teneur en eau. D'une manière générale, pour une teneur en eau qui augmente, l'angle de frottement semble diminuer pour les sols plutôt plastiques et denses, alors qu'il semble augmenter pour les sols peu plastiques et lâches (Delage & Cui, 2001).

La densité du matériau joue également un rôle dans la résistance au cisaillement. J.P. Masekanya (2008) a étudié du limon provenant de la commune d'Awans, au Nord de Liège (Belgique) au moyen d'essais triaxiaux UU non saturés. L'auteur a mis en évidence qu'une augmentation de la densité sèche du matériau augmente conjointement l'angle de frottement et la cohésion, et ce pour une teneur en eau maintenue constante.

R. Matalucci (1969) a constaté une anisotropie dans l'orientation des grains composant les dépôts lœssiques des alentours de la ville de Vicksburg (Mississippi, USA). Les grains sont préférentiellement orientés selon un plan horizontal correspondant à celui de la stratification. L'auteur tenta alors d'évaluer l'influence de cette anisotropie sur la résistance au cisaillement du lœss. Pour ce faire, R. Matalucci réalisa des essais de cisaillement direct et des essais triaxiaux UU à teneur en eau constante. Les essais de cisaillement direct montrèrent que la résistance au cisaillement (valeur à la rupture) est légèrement plus importante, d'environ 10 %, lorsque le plan de cisaillement est positionné perpendiculairement à la stratification. Les essais triaxiaux vont dans le même sens. Ils indiquèrent que la cohésion et, dans une moindre mesure, l'angle de frottement, sont plus importants lorsque la stratification est positionnée perpendiculairement à la direction de la contrainte principale, par comparaison à une configuration à 45°.

Tableau 5-19 : Résultats obtenus à l'issue des essais triaxiaux UU et CU. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; CU = essai consolidé – non drainé ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; UU = essai non consolidé – non drainé ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Horizon stratigraphique	Prof. (m)	w (%)	$S_r$ (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_u$ (kPa) <sup>a</sup>	$\phi_u$ (°) <sup>a</sup>
F1-9	Limon hesbayen sous HLN	3,68	19,4	92,5	20,6	17,2	32,1	33,3
F1-10 <sup>b</sup>	Harveng ?	4,08	20,7	89,4	19,6	16,2	32,9	24,4
F1-11	Harveng ?	4,53	22,3	75,7	18,0	14,7	0,0	25,9
F1-12 <sup>b</sup>	Limon sus-jacent à MAL	4,98	20,9	83,1	19,5	16,2	36,7	17,9
F1-14	Complexe stratifié inf.	5,90	18,1	73,1	18,7	15,8	8,5	23,1
F1-16 <sup>c</sup>	Complexe stratifié inf.	6,80	19,9	81,2	19,0	15,9	76,4	17,0
F1-18	Complexe stratifié inf.	7,70	17,1	72,2	19,1	16,3	9,0	25,8
F1-19 haut	CHR – partie sup.	8,01	22,3	80,3	19,0	15,6	17,0	23,4
F3-23	HBM	10,50	18,4	71,0	18,4	15,5	4,6	26,6

<sup>a</sup> valeurs à la rupture ;

Au moyen d'essais de cisaillement direct réalisés sur du lœss provenant de Chine, Wen et Yan (2014) ont étudié l'influence du remaniement du matériau sur sa résistance au cisaillement. La cohésion semble clairement diminuée lorsque les éprouvettes sont reconstituées. La réduction de cette résistance est attribuée à des modifications de la structure interne du matériau. En effet, le remaniement engendre l'endommagement du ciment intergranulaire, la modification de la distribution de la taille des pores et un réarrangement des grains. L'angle de frottement apparent reste par contre peu influencé par le remaniement du matériau.

D'autres variables encore influencent la résistance au cisaillement, telles que la forme et la rugosité des grains, et la distribution granulométrique. Ces différents facteurs ne seront pas abordés plus en détail dans ce travail.

La campagne d'essais sur le lœss de Romont, a été réalisée au départ d'un matériau dans les conditions les plus proches possibles des conditions rencontrées in situ. Par conséquent, de nombreuses variables développées ci-avant, peuvent influencer simultanément le comportement mécanique du matériau étudié. Il est dès lors difficile d'établir des corrélations claires entre  $c_u$  ou  $\phi_u$  et une variable physique considérée isolément. En effet, les résultats issus de la campagne d'essais sur le lœss du site de Romont, ne montrent aucune tendance claire entre les paramètres de cisaillement ( $c_u$  et  $\phi_u$ ) et les variables d'état telles que la teneur en eau, la densité à la teneur en eau in situ, la densité sèche et le degré de saturation. Ce manque de corrélation est probablement lié à l'hétérogénéité du matériau testé. En effet, la teneur en eau varie entre 13,8 et 22,9 %, la densité in situ entre 18 et 21,2 kN/m<sup>3</sup>, la densité sèche entre 14,7 et 17,9 kN/m<sup>3</sup> et le degré de saturation entre 54 et 98 %. L'ensemble de ces

paramètres, ainsi que d'autres encore, influencent de manière conjointe la cohésion et l'angle de frottement du matériau testé. Dans ces conditions, il devient dès lors difficile d'établir des corrélations entre une seule variable d'état et un paramètre de résistance au cisaillement. En outre, la plupart des essais triaxiaux et l'ensemble des essais de cisaillement direct ont été effectués sur des éprouvettes reconstituées. Comme l'ont montré Wen et Yan (2014), la cohésion mesurée sur ces éprouvettes peut ne pas être représentative de la cohésion in situ.

La seule tendance qui se marque modérément ( $R^2 = 0,74$ ), lie la teneur en eau à l'angle de frottement apparent, pour les essais triaxiaux UU (Figure 5-34). Une telle tendance n'est cependant pas observée pour les résultats des essais de cisaillement direct. D'une manière générale, la variation de l'angle de frottement en lien avec une variation de la teneur en eau n'est pas encore bien comprise (Delage & Cui, 2001).

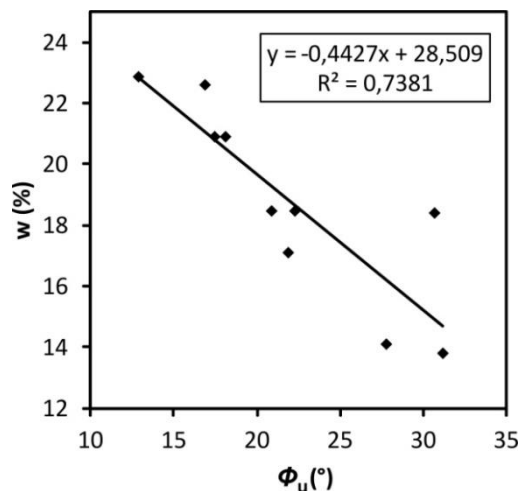


Figure 5-34 : Corrélation entre l'angle de frottement apparent ( $\phi_u$ ) et la teneur en eau ( $w$ ) pour les essais triaxiaux UU sur le lœss de Romont.

La Figure 5-35 suivante représente graphiquement les valeurs obtenues de  $c_u$  en fonction de  $\phi_u$ , pour l'ensemble des essais triaxiaux et de cisaillement direct. Les mesures se distribuent selon un nuage de points pour lequel il n'est pas envisageable d'établir de corrélation entre les deux variables présentées. Les nuages de points correspondant aux essais triaxiaux UU et aux essais de cisaillement direct UU, se recouvrent relativement bien. Par contre, les points de mesure relatifs aux essais triaxiaux CU, se localisent en bordure du nuage de points, dans une zone correspondant à de plus faibles valeurs de cohésion et d'angle de frottement apparents. Ces plus faibles valeurs sont attendues puisque les éprouvettes ont été préalablement saturées dans le cas des essais triaxiaux CU. Les valeurs moyennes correspondant à chacun des types d'essais sont également représentées à la Figure 5-35. Pour les essais réalisés à teneur en eau in situ, l'angle de frottement apparent moyen varie peu, entre 22,0 et 24,1°. La cohésion apparente moyenne est plus variable, entre 24,1 et 42,5 kPa. Ces valeurs sont considérées comme concordantes et pertinentes pour un matériau limoneux. Elles caractérisent la résistance au cisaillement du limon dans son ensemble, investigué sur le site de Romont. La relative dispersion observée des valeurs de  $c_u$  et  $\phi_u$ , indique toutefois une certaine hétérogénéité du matériau. Ceci confirme les résultats obtenus plutôt dans ce chapitre, à savoir ceux en lien avec la classification des sols au moyen du CPT, ainsi que ceux relatifs aux caractéristiques de déformabilité.

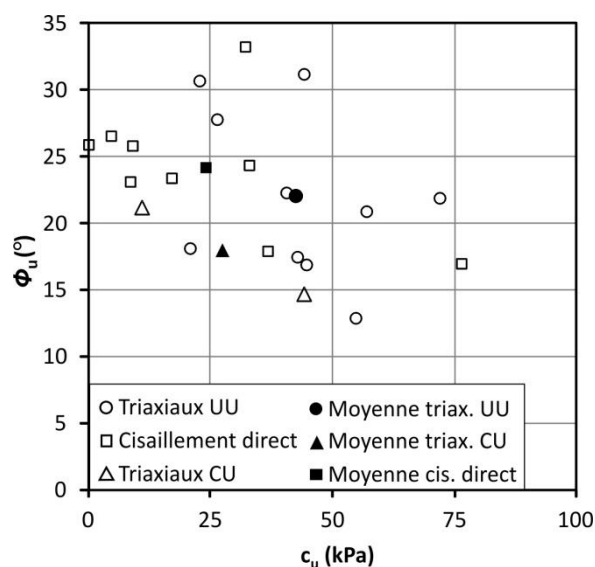


Figure 5-35 : Résultats des variables de cisaillement  $c_u$  et  $\phi_u$ , obtenues par les différents essais triaxiaux et de cisaillement direct réalisés sur le limon du site de Romont.

Une autre façon d'appréhender l'hétérogénéité des résultats, consiste à représenter l'évolution des caractéristiques de résistance au cisaillement, en fonction de la profondeur (Figure 5-36). Les résultats relatifs à l'Horizon blanchi de Momalle ont été acquis au départ du forage F3 (F3-23). Afin de les intégrer à l'analyse stratigraphique, ces résultats ont été artificiellement repositionnés dans la séquence stratigraphique du forage F1, à la profondeur de 8,50 m.

La cohésion apparente est une variable assez sensible à mesurer expérimentalement. Cela se traduit par de relativement grands écarts entre les valeurs obtenues par les essais triaxiaux UU et celles issues des essais de cisaillement direct (Figure 5-36 (a)). En termes d'analyse stratigraphique, l'Horizon blanchi de Momalle semble être caractérisé par une cohésion plus faible que les horizons qui lui sont adjacents. Contrairement à la cohésion, l'angle de frottement apparent est nettement plus concordant entre les deux types d'essais (Figure 5-36 (b)). Le Complexe Humifère de Remicourt semble présenter un angle de frottement apparent plus faible que l'Horizon blanchi de Momalle et que le Sol de Villers-Saint-Ghislain B. La contrainte de cisaillement présentée à la Figure 5-36 (c) a été calculée à partir de l'équation de Mohr-Coulomb (éq. 5-19), en considérant comme contrainte normale, la contrainte verticale in situ. Les résultats obtenus entre les deux types d'essais sont relativement concordants. D'une manière générale, la résistance au cisaillement augmente avec la profondeur au sein de la séquence lœssique. Par ailleurs, l'Horizon blanchi de Momalle ne présente pas une résistance au cisaillement clairement plus importante par rapport aux horizons environnants, comme cela a été observé au moyen de l'analyse de la résistance au cône du CPT (p. ex. Figure 4-21 (a)).



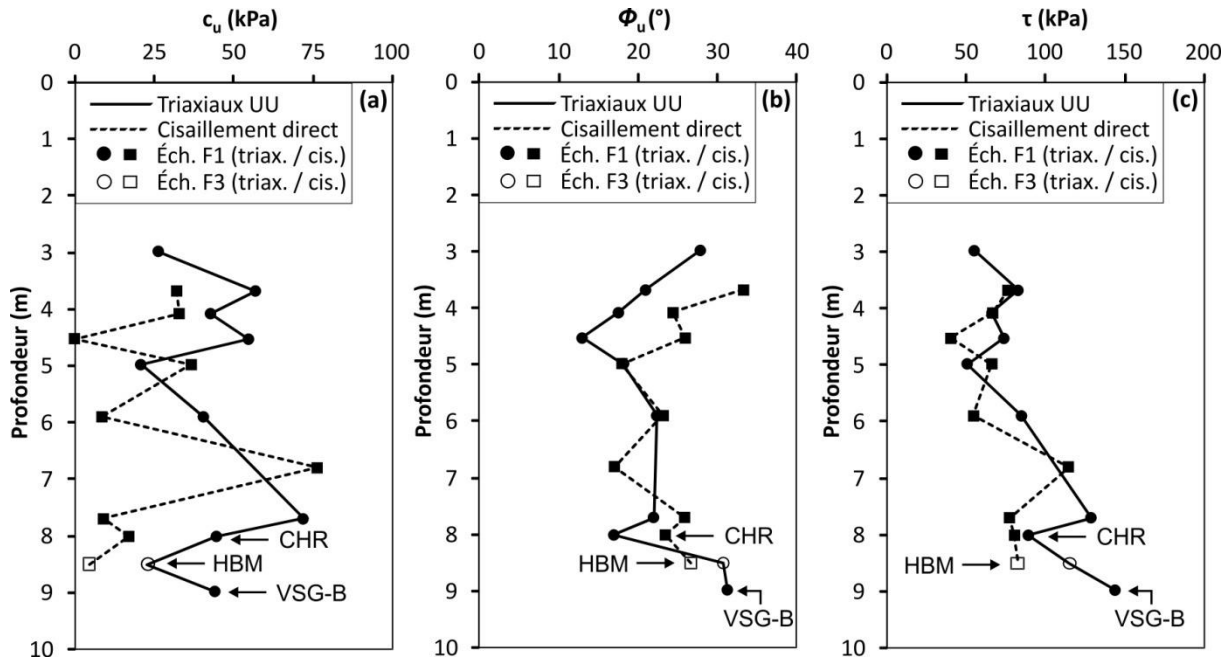


Figure 5-36 : Évolution des caractéristiques de résistance au cisaillement en fonction de la profondeur, en intégrant les données issues des essais triaxiaux UU et celles provenant des essais de cisaillement direct. L'échantillon issu du forage F3 (F3-23) a été repositionné artificiellement dans la séquence stratigraphique correspondant au forage F1. (a) Évolution de la cohésion apparente ( $c_u$ ). (b) Évolution de l'angle de frottement apparent ( $\phi_u$ ). (c) Évolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

## 6.2. Comparaison avec l'essai de pénétration statique

Les essais triaxiaux et de cisaillement direct ont montré une certaine variabilité des caractéristiques de résistance mécanique entre les différents échantillons analysés. Cependant, les valeurs moyennes de  $c_u$  et  $\phi_u$  obtenues par l'essai triaxial d'une part, et par l'essai de cisaillement direct d'autre part, sont respectivement assez proches les unes des autres. Les valeurs de résistance au cisaillement calculées à partir de l'équation de Mohr-Coulomb, indiquent également des résultats relativement concordants entre les deux types d'essais en laboratoire. Dans cette section, la résistance au cône du CPT est utilisée afin d'estimer les valeurs moyennes des variables de résistance au cisaillement  $c$  et  $\phi$ , correspondant à la couche de limon dans son ensemble. Les valeurs moyennes de résistance mécanique obtenues à l'issue de l'approche proposée, sont ensuite comparées à celles déterminées en laboratoire au moyen des essais triaxiaux et de cisaillement direct.

Différentes approches existent pour estimer l'angle de frottement d'un matériau granulaire sans cohésion (typiquement du sable) au moyen de la résistance au cône du CPT. Parmi celles-ci, peuvent être citées les corrélations empiriques expérimentales, l'application de la théorie de la capacité portante des fondations ou encore, le recours à la théorie d'expansion de cavité. Ces formulations tiennent compte de la résistance au cône du CPT, de la contrainte verticale in situ, et éventuellement d'autres variables telles que la distribution granulométrique des grains, la densité relative, le module de cisaillement, la déformabilité verticale, le coefficient de poussée des terres au repos (Kulhawy & Mayne, 1990 ; Lunne *et al.*, 1997). L'ouvrage rédigé par Lunne *et al.* (1997) synthétise les principales études réalisées

sur ce sujet (à la page 90). Cependant, ces approches considèrent toujours un cas idéalisé de sable, caractérisé par une granulométrie assez uniforme, l'absence de ciment, avec une prédominance de grains de quartz, dont le dépôt est récent. Dans le cas de la théorie développée pour le calcul de la capacité portante de fondations profondes circulaires, la résistance au cône s'exprime comme suit :

$$q_c = \sigma_{v0} N_q s_q = \sigma_{v0} N_q^* \quad (5-35)$$

où :

$N_q^*$  = le facteur de portance qui est fonction de l'angle de frottement et du modèle de rupture par cisaillement.

D'une manière comparable aux matériaux granulaires sans cohésion, la résistance au cône du CPT peut être corrélée à la cohésion non drainée d'un matériau purement cohérent (typiquement de l'argile) tel que :

$$q_c = c_u N_c s_c + \sigma_{v0} = N_c^* c_u + \sigma_{v0} \quad (5-36)$$

où :

$N_c^*$  = le facteur de portance qui est fonction de l'angle de frottement et du modèle de rupture par cisaillement.

La variable  $N_c^*$  est dénommée facteur de cône (« cone factor ») de façon générale, ou facteur de capacité portante dans le cas de l'application de la théorie de la capacité portante des fondations profondes circulaires. Les mêmes approches que celles utilisées pour les matériaux granulaires peuvent être employées, moyennant les adaptations théoriques et/ou expérimentales nécessaires, pour un matériau argileux. D'une manière générale, l'application de la théorie de plasticité au calcul de la capacité portante de fondations profondes circulaires suggère une valeur de  $N_c^*$  aux alentours de 9, dans le cas des modèles de rupture générale en cisaillement. Les théories d'expansion de cavité aboutissent à des valeurs de  $N_c^*$  augmentant de 7 à 13 pour un indice de rigidité ( $I_r = G/c_u$ , avec  $G$  = module de cisaillement) croissant (Kulhawy & Mayne, 1990). Lunne *et al.* (1997) synthétisent différentes façons de calculer  $N_c^*$  (à la page 64). Cependant, en pratique, la détermination de  $N_c^*$  aboutit souvent à une plus large gamme de valeurs en raison du choix du modèle théorique, de la non prise en compte de la pression interstitielle en milieu saturé au moyen du CPT, de l'état de consolidation ou encore, de mesures expérimentales imprécises de la cohésion (Kulhawy & Mayne, 1990 ; Lunne *et al.*, 1997).

Du point de vue de sa résistance au cisaillement, le limon possède la particularité d'être un matériau caractérisé à la fois par un angle de frottement non nul, et par une certaine cohésion. Ce caractère intermédiaire entre un pôle sableux et un pôle argileux a d'ailleurs déjà été mis en évidence dans ce chapitre par l'utilisation des diagrammes de classification des sols au moyen de l'essai de pénétration statique. Les résultats obtenus à l'issue de la campagne d'essais triaxiaux et d'essais de cisaillement direct le montrent également. Les deux variables  $c$  et  $\phi$  doivent donc être prises en compte simultanément dans une expression les corrélant à la résistance au cône du CPT. La littérature scientifique est peu fournie pour exprimer la résistance au cisaillement du limon en fonction de la résistance au cône. Il est toutefois pertinent de mentionner les études réalisées par Senneset *et al.* (1982, 1988). Ces auteurs ont établi une corrélation (appelée modèle NTH) entre la résistance au cône du CPT et la cohésion et l'angle de frottement effectifs d'un limon saturé en condition drainée. Pour ce faire, ils ont utilisé une approche semi-empirique basée sur l'application de la théorie du calcul de la capacité portante de pieux.

La suite de cette section est consacrée à l'établissement d'une approche semi-empirique basée sur l'application de la théorie de la capacité portante des fondations profondes circulaires, considérant à la fois la cohésion et l'angle de frottement. Puisque les essais triaxiaux et de cisaillement direct ont été réalisés majoritairement en condition partiellement saturée, non consolidée et non drainée, les variables de résistance au cisaillement considérées dans cette approche sont des variables apparentes,  $c_u$  et  $\phi_u$  (et non effectives).

D'après la théorie développée pour le calcul de la capacité portante des fondations, dans un matériau limoneux, la résistance au cône du CPT peut être calculée comme suit :

$$q_c = c_u N_c s_c + \sigma_{v0} N_q s_q = N_c^* c_u + N_q^* \sigma_{v0} \quad (5-37)$$

où :

$N_q^*, N_c^*$  = les facteurs de portance qui sont fonction de l'angle de frottement et du modèle de rupture par cisaillement ;

$s_q, s_c$  = les coefficients correctifs liés à la forme de la fondation.

La valeur du paramètre  $s_q$  dépend du modèle de rupture du sol sous la fondation. Le Tableau 2-8 du chapitre 2 présente différents modèles proposés pour le calcul de  $N_q$ , ainsi que la valeur du paramètre  $s_q$  correspondant. Le facteur de portance  $N_c$  peut être calculé à partir de  $N_q$ , puisqu'il équivaut à :

$$N_c = (N_q - 1) \tan^{-1} \phi \quad (5-38)$$

La valeur du paramètre  $s_c$  correspondant à chacun des modèles mentionnés dans le Tableau 2-8 (chapitre 2), est par contre nettement moins documentée dans la littérature. La formule empirique mentionnée par Holloway *et al.* (1975), qui permet de calculer  $s_c$  à partir de  $N_q$  et  $s_q$ , a dès lors été appliquée :

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (5-39)$$

L'équation 5-37 peut être remodelée sous une forme plus proche de l'équation classique de Mohr-Coulomb :

$$q_c = (N_q - 1) \tan^{-1} \phi \left( c \cdot s_c + s_q \sigma_v \frac{N_q}{N_q - 1} \tan \phi \right) \quad (5-40a)$$

ou encore,

$$q_c = B(c \cdot s_c + s_q \sigma_v A \tan \phi) \quad (5-40b)$$

où :

A et B = coefficients uniquement fonction de  $\phi$ , tel que :

$$A = \frac{N_q}{N_q - 1} \text{ et } B = N_c \quad (5-40c)$$

En outre, l'analyse de la résistance au cône du CPT montre que cette dernière suit une tendance moyenne qui augmente avec la profondeur. Cela est développé pour le site de Romont, dans le chapitre 4, et illustré à la Figure 4-22. La résistance au cône du CPT peut dès lors être exprimée sous la forme très simple suivante, faisant intervenir la contrainte verticale in situ ( $\sigma_v$ ) :

$$q_c = D + E \sigma_v \quad (5-41)$$

où :

D et E = variables déterminées graphiquement (Figure 5-37) :

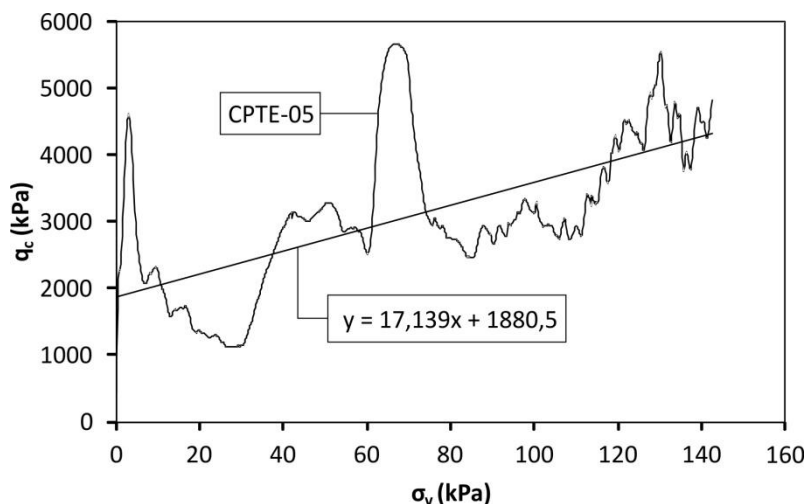


Figure 5-37 : Évolution de la résistance au cône ( $q_c$ ) du CPT E-05 en fonction de la contrainte verticale in situ ( $\sigma_v$ ), jusqu'à 8 m de profondeur.

En considérant uniquement le CPT E-05 (CPT le plus proche du forage F1), l'équation 5-41 devient :

$$q_c = 1880,5 \text{ (en kPa)} + 17,14\sigma_v \quad (5-42a)$$

En considérant une résistance au cône moyenne issue de l'ensemble des CPT réalisés sur le site de Romont, l'équation 5-41 devient :

$$q_c = 1832,4 \text{ (en kPa)} + 22,34\sigma_v \quad (5-42b)$$

En combinant l'équation 5-40b avec l'équation 5-41, les variables D et E valent :

$$E = s_q \cdot A \cdot B \cdot \tan \phi \quad (5-43)$$

et,

$$D = s_c \cdot c \cdot B \quad (5-44)$$

Au moyen des équations 5-42a, 5-42b, 5-43 et 5-44, il devient possible de déterminer les valeurs moyennes de la cohésion et de l'angle de frottement non drainé pour le limon rencontré sur le site de Romont.

Plusieurs formulations pour le calcul de  $N_q$  et  $s_q$  ont été utilisées dans cette approche. Il s'agit des formulations de Terzaghi (1943), de Caquot & Kerisel (1966), de De Beer (1945) et de Janbu & Senneset (1974). Elles sont mentionnées au Tableau 2-8 du chapitre 2. Les résultats en termes de  $c$  et de  $\phi$ , obtenus à l'issue de cette approche, sont illustrés à la Figure 5-38 (b). Ils sont comparés avec les résultats obtenus expérimentalement et présentés précédemment dans ce chapitre (Figure 5-38 (a)). Les différentes formulations de  $N_q$  et  $s_q$  utilisées aboutissent à des valeurs de cohésion et d'angle de frottement relativement proches des valeurs moyennes obtenues expérimentalement. L'angle de frottement ainsi calculé varie entre 17,5 et 27,5°, et la cohésion entre 28 et 55 kPa. La dispersion des points observée à la Figure 5-38 (b) peut être considérée comme raisonnable lorsqu'elle est comparée aux valeurs obtenues expérimentalement (Figure 5-38 (a)). L'approche est réalisée pour deux tendances différentes de l'évolution du  $q_c$  en fonction de  $\sigma_v$ . L'une considère uniquement le CPT E-05

(*éq. 5-42a*), alors que l'autre prend en compte l'ensemble des CPTÉ réalisés sur le site de Romont (*éq. 5-42b*). Les résultats obtenus et illustrés à la Figure 5-38 (b) rendent compte de l'influence du choix de cette tendance sur les valeurs de  $c$  et de  $\phi$  calculées.

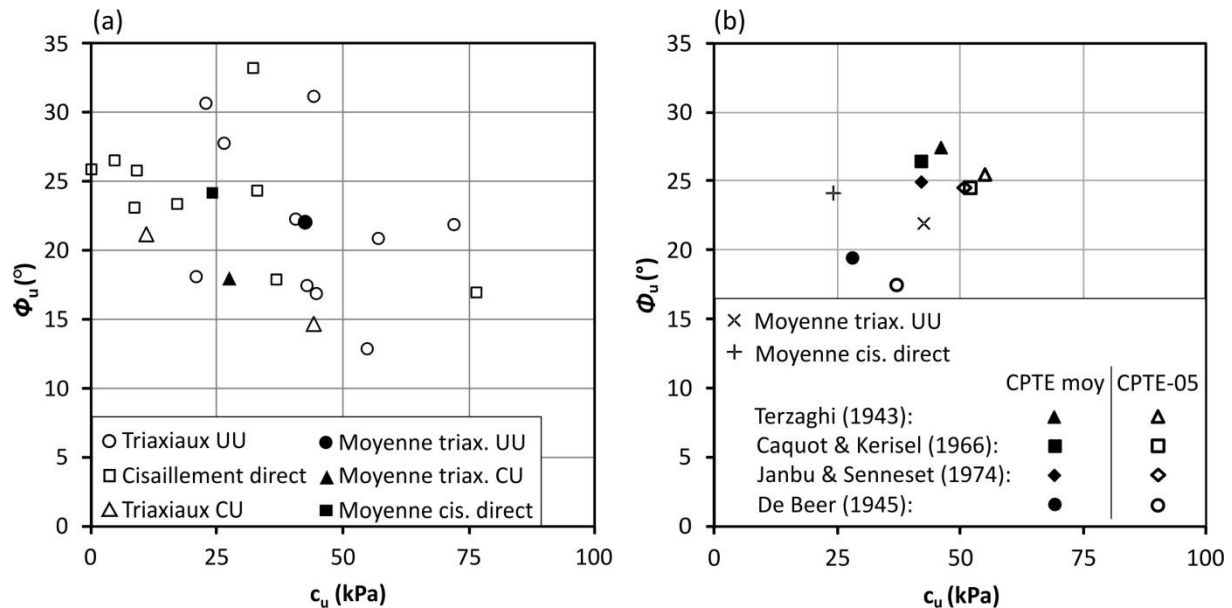


Figure 5-38 : (a) Résultats expérimentaux des variables de cisaillement  $c_u$  et  $\phi_u$ , obtenues par les différents essais triaxiaux et de cisaillement direct réalisés sur le limon du site de Romont. (b) Résultats des variables de cisaillement  $c_u$  et  $\phi_u$  calculées au moyen de l'approche semi-empirique basée sur la théorie du calcul de la capacité portante des fondations.

Cette approche semi-empirique, basée sur la théorie du calcul de la capacité portante des fondations, permet donc de calculer simultanément une cohésion et un angle de frottement apparents moyens au départ de l'analyse de l'évolution moyenne du  $q_c$  en fonction de  $\sigma_v$ , dans un milieu partiellement saturé. Les valeurs obtenues approchent celles mesurées en laboratoire. Il faut toutefois rappeler les hypothèses qui sont considérées par cette approche. Les théories développées pour le calcul de la capacité portante des fondations considèrent un mode de rupture par cisaillement avec un comportement du sol de type rigide-plastique, régi par la loi de Mohr-Coulomb. La déformabilité du sol n'est pas prise en compte, tout comme l'état des contraintes initial autour de la pointe du CPT au cours de son enfoncement. Il semble toutefois intéressant de tester cette approche sur d'autres sites limoneux, voir d'autres types de sols.

### 6.3. Synthèse intermédiaire

La campagne d'essais triaxiaux et d'essais de cisaillement direct réalisée en laboratoire confirme le caractère intermédiaire du limon à propos de sa résistance au cisaillement. Les résultats obtenus indiquent que ce matériau est caractérisé à la fois par une cohésion et un angle de frottement non nuls. Son comportement mécanique se trouve donc entre celui d'un sable drainé ( $\phi \neq 0$  et  $c = 0$ ) et d'une argile non drainée ( $\phi_u = 0$  et  $c_u \neq 0$ ). Cette caractéristique avait déjà été mise en évidence de façon qualitative par les diagrammes de classification des sols au moyen des données issues des essais de pénétration statique. Les essais triaxiaux UU caractérise le limon du site de Romont avec une cohésion apparente moyenne de 42,5 kPa et un angle de frottement apparent moyen de 22,0°. Les essais de cisaillement direct confirment ces valeurs moyennes, avec les résultats suivants mesurés à la rupture :  $c_u = 24,1$  kPa et  $\phi_u = 24,2^\circ$ . Ces valeurs sont également concordantes avec des valeurs obtenues pour d'autres matériaux lœssiques.

Les valeurs moyennes ne traduisent pas la variabilité des paramètres de résistance au cisaillement observées expérimentalement. Une des raisons principales de cette variabilité est probablement l'hétérogénéité des échantillons testés, notamment en termes de teneur en eau, de densité sèche et de degré de saturation.

L'analyse stratigraphique a été réalisée aux alentours de l'Horizon blanchi de Momalle. Ce dernier semble être caractérisé par une cohésion plus faible que les horizons qui lui sont adjacents. Le Complexe Humifère de Remicourt semble, quant à lui, posséder un angle de frottement apparent légèrement plus faible que l'Horizon blanchi de Momalle et que le Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Les données obtenues expérimentalement sont ensuite utilisées afin de les corrélérer avec la résistance au cône du CPT. Une approche semi-empirique est proposée pour déterminer à la fois  $c$  et  $\phi$  à partir de l'évolution moyenne de la résistance au cône en fonction de la contrainte verticale in situ. L'approche se base sur la théorie développée pour le calcul de la capacité portante des fondations. Plusieurs modèles théoriques sont testés et aboutissent à des valeurs de cohésion et d'angle de frottement apparents cohérentes avec celles obtenues expérimentalement. Cette approche possède l'avantage d'être très simple d'utilisation. Elle ne requière que peu de paramètres initiaux : évolution moyenne du  $q_c$  et poids volumique humide moyen. Elle repose par contre sur des modèles de rupture et comportementaux très simplifiés. Il serait intéressant de la tester sur d'autres sites limoneux et d'autres types de sols.

## 7. Conclusions intermédiaires

Les analyses réalisées en laboratoire, à l'échelle de l'échantillon, permettent de caractériser en détail la séquence lœssique du site de Romont d'un point de vue physique et mécanique. Les résultats illustrent une relative hétérogénéité des caractéristiques de déformabilité et de résistance mécanique entre les différents horizons qui composent la séquence.

D'un point de vue stratigraphique, les investigations menées en laboratoire se sont principalement focalisées sur la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle. Il en ressort que le Complexe Humifère de Remicourt se caractérise par une déformabilité parmi les plus importantes de l'ensemble des horizons analysés. De manière comparable aux observations liées à la résistance au cône du CPT, l'Horizon blanchi de Momalle tranche assez nettement par rapport aux autres horizons qui composent la séquence lœssique. Il se caractérise par une faible proportion de la fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ), par une déformabilité clairement moindre que celle mesurée pour le Complexe Humifère de Remicourt, et par une cohésion apparente relativement faible. L'horizon blanchi de Momalle surmonte le Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Ce dernier se caractérise notamment par une proportion élevée de la fraction argileuse, et par une déformabilité relativement faible. Ces deux caractéristiques sont, d'un point de vue mécanique, antinomiques. La déformabilité est habituellement plus importante dans un matériau argileux. Les analyses réalisées à l'échelle microscopiques et présentées dans le chapitre 6 suivant permettront de mieux comprendre ces caractéristiques. Ailleurs dans la séquence lœssique, la proportion de la fraction argileuse diminue légèrement sous la limite de décarbonatation, parallèlement à une diminution de la déformabilité. Ces résultats permettent donc d'affiner encore les caractéristiques de certains horizons repères, précédemment mis en évidence au sein de la séquence lœssique. Les analyses réalisées à l'échelle microscopique devraient permettre de mieux comprendre les raisons physiques de l'hétérogénéité des caractéristiques de déformabilité et de résistance mécanique observées. Les résultats de cette étude sont présentés dans le chapitre 6.

Ni les tomographies de résistivité électrique, ni les CPT, ni les analyses menées en laboratoire n'ont réussi à distinguer clairement les dépôts quaternaires de la séquence lœssique, des dépôts marins oligocènes de la Formation de Sint-Huibrechts-Hern. Ces derniers possèdent probablement des caractéristiques physiques et mécaniques très proches de celles du lœss.

Les données obtenues en laboratoire ont été comparées aux résultats acquis in situ, au moyen du CPT. Cette analyse géotechnique constitue le second volet du chapitre. Elle se compose de trois parties assez distinctes les unes des autres :

- les diagrammes de classification des sols basés sur les données du CPT confirment la relative hétérogénéité du matériau investigué. Les résultats indiquent une dispersion des points de mesure entre un pôle argilo-limoneux d'une part, représenté notamment par le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, et un pôle sablo-limoneux d'autre part, où se rencontre l'Horizon blanchi de Momalle. Ce résultat est en accord avec l'analyse granulométrique, et reflète la complémentarité qui caractérise les deux horizons d'un point de vue pédologique. En effet, l'Horizon blanchi de Momalle est relié à un horizon éluvié, appauvri en particules argileuses, alors que le Sol de Villers-Saint-Ghislain B est attribué à un horizon illuvié, donc enrichi en argile ;

- la relation empirique reliant le module œdométrique à la résistance au cône du CPT, au moyen d'un coefficient  $\alpha$  dépendant du type de sol, a été vérifiée. La méthode proposée par Sanglerat (calcul du module œdométrique tangent au début de la partie plastique de la courbe œdométrique) est en accord avec les valeurs de  $\alpha$  attendues pour un matériau limoneux. Par contre, la valeur moyenne de  $\alpha$ , obtenue par la méthode préconisée par l'Eurocode 7 pour déterminer le module œdométrique sécant (entre deux valeurs de chargement successives dans la partie plastique linéaire de la courbe œdométrique), est supérieure aux valeurs renseignées par l'Eurocode 7, pour un matériau similaire ;
- une approche semi-empirique basée sur la théorie du calcul de la capacité portante des fondations a été développée pour estimer simultanément la cohésion et l'angle de frottement apparents moyens du limon rencontré sur le site de Romont. Cette approche est calibrée sur les résultats des essais triaxiaux et de cisaillement direct. In fine, les seules données nécessaires sont l'évolution de la résistance au cône du CPT, ainsi que le poids volumique moyen du limon. Les résultats des différents modèles théoriques testés, aboutissent à des valeurs de  $c_u$  et  $\phi_u$  cohérentes avec celles mesurées expérimentalement.

Enfin, une étude succincte réalisée sur la susceptibilité à l'effondrement du lœss du site de Romont, a été menée au départ de critères d'évaluation simples et empiriques. Cette approche qualitative indique que le lœss investigué ne semble pas présenter de risque particulier d'effondrement en cas d'une augmentation du degré de saturation. Des analyses plus complètes sont toutefois nécessaires pour confirmer, de manière plus quantitative, ces résultats préliminaires.



**Chapitre 6 :**  
**Étude à l'échelle microscopique**



## 1. Introduction

En vue de compléter les analyses réalisées aux échelles locale et macroscopique, une étude à l'échelle microscopique a été réalisée sur le limon de la séquence stratigraphique du site de Romont. Les investigations menées in situ ont révélé la présence de plusieurs marqueurs stratigraphiques au sein de la séquence lœssique, sur base de la variation de la résistance mécanique du matériau. L'analyse à l'échelle microscopique s'intéresse plus spécifiquement à ces horizons particuliers, en vue de comprendre les raisons des variations du comportement mécanique, observées aux autres échelles d'étude. Les essais sont réalisés en laboratoire, à partir d'échantillons non remaniés issus du site de Romont, prélevés d'une part par forage, et d'autre part directement depuis la paroi.

Ce chapitre décrit d'abord les différentes méthodes de caractérisation mises en œuvre. Ensuite, les résultats relatifs à chacune de ces techniques sont analysés et développés. Enfin, une troisième section clôture ce chapitre. Elle est consacrée à l'analyse de l'ensemble des données acquises par les différentes échelles d'étude, au droit des quatre marqueurs stratigraphiques définis précédemment.

## 2. Démarche expérimentale suivie

Ce chapitre vise à caractériser à une échelle microscopique, la séquence lœssique de Romont. Un accent est porté plus spécifiquement aux quatre repères stratigraphiques soulignés par la variation de la résistance au cône du CPT. Ces quatre horizons sont représentés par : la limite de décarbonatation superficielle, la transition entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous-jacents, le Complexe Humifère de Remicourt et le sommet du Pédocomplexe de Rocourt, marqué par la présence de l'Horizon blanchi de Momalle.

Outre l'aspect lié à la caractérisation du limon à une échelle microscopique, ce chapitre a pour objectif de comprendre les raisons des variations de la résistance mécanique au droit des marqueurs stratigraphiques prédéfinis. Pour ce faire, les méthodes expérimentales utilisées sont variées et complémentaire. D'un point de vue de la géochimie, la teneur en matière organique est déterminée par perte au feu et par oxydation du carbone organique par voie humide. Les proportions relatives des éléments majeurs sont mesurées par spectrométrie de fluorescence des rayons X. Les principales phases minéralogiques sont identifiées au moyen de la diffractométrie des rayons X. La teneur en carbonates est déterminée par titrage. Les aspects liés à la microstructure du lœss, et plus particulièrement vis-à-vis de sa porosité, sont investigués au moyen de la porosimétrie par intrusion de mercure. L'ensemble de ces caractéristiques sont finalement observées par l'étude de lames minces au microscope polarisant. La variété de ces méthodes illustre bien la démarche expérimentale recherchée tout au long de cette thèse, en faisant intervenir de manière conjointe une approche géologique et une approche mécanique.

Une partie des échantillons utilisés pour les analyses expérimentales provient du forage central F1 réalisé sur le site de Romont, au même titre que les échantillons utilisés pour l'analyse à l'échelle macroscopique. Ce premier lot est complété par une seconde série d'échantillons prélevés manuellement directement à partir de la paroi de Romont. Ce mode d'échantillonnage présente en effet l'avantage d'être certain de la position stratigraphique précise des échantillons à tester. Certains d'entre eux ont d'ailleurs été prélevés à la transition entre deux horizons stratigraphiques distincts. C'est le cas au droit de la limite de décarbonatation superficielle, et au droit de la transition entre la base de l'Horizon à Langues

de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous-jacents. Les échantillons provenant de la paroi sont utilisés pour les analyses de porosimétrie et pour les observations des lames minces. Leur position stratigraphique est comparée à la colonne stratigraphique synthétique de Romont, illustrée à la Figure 6-1.

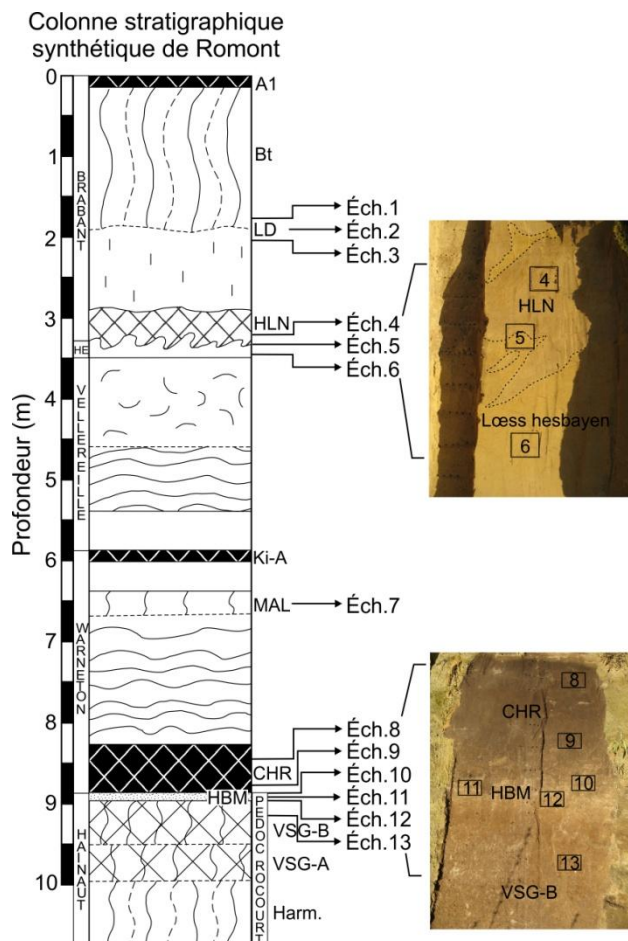


Figure 6-1 : Position stratigraphique des échantillons prélevés sur la paroi de Romont. La légende des symboles utilisés dans la colonne stratigraphique est mentionnée à la Figure 4-14. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; Harm = Sol d'Harmignies ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HE = lœss hesbayens ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; Ki-A = Kincamp-A ; LD = limite de décarbonatation ; Rm = Romont ; VSG-A et B = Sols de Villers-Saint-Ghislain-A et B. Photographies prises le 28/11/2016 par S. Delvoie.

### 3. Méthodes expérimentales principales

Les méthodes expérimentales réalisées à l'échelle microscopique couvrent différents aspects complémentaires sur la caractérisation du loess. Ainsi, un certain nombre d'essais concernent la caractérisation géochimique du matériau (teneur en matière organique, teneur en carbonate, proportion relative en éléments majeurs et proportion relative des phases minéralogiques). La distribution de la taille des pores est également étudiée au moyen de la porosimétrie au mercure. Les principaux horizons stratigraphiques ont aussi fait l'objet d'observations au microscope polarisant, au départ de lames minces. Le Tableau 6-1 reprend l'ensemble des échantillons ayant été investigués à une échelle microscopique, ainsi que les différents essais se rapportant à chacun d'eux.

#### 3.1. Teneur en matière organique

Les deux méthodes les plus souvent utilisées pour déterminer la teneur en matière organique sont : la perte au feu (LOI, en anglais, « loss on ignition ») et l'oxydation par voie humide (Hoogsteen *et al.*, 2015). Ces deux techniques ont été utilisées dans le cadre de cette thèse, afin de déterminer de manière quantitative la teneur en matière organique présente dans une sélection d'horizons de la séquence loessique de Romont. Les échantillons analysés proviennent du forage F1 (pour la localisation, voir la Figure 4-13). La méthode d'oxydation par voie humide est plus complexe, dangereuse et coûteuse à réaliser. C'est pourquoi, une sélection restreinte de cinq échantillons ont été investigués au moyen de cette technique (Tableau 6-1). La perte au feu est, par contre, nettement plus simple et rapide à effectuer. Elle a dès lors été appliquée sur une sélection étendue de 17 échantillons couvrant la séquence loessique depuis l'horizon Bt holocène, au sommet du Pédocomplexe de Rocourt (Tableau 6-1). Afin de valider les résultats obtenus, les deux approches seront alors comparées entre elles.

##### 3.1.1. Perte au feu

La perte au feu permet de mesurer directement la teneur en matière organique d'un sol. Cette dernière est déterminée par différence de masse entre un échantillon sec et le même échantillon calciné à une certaine température. Celle-ci ne doit pas dépasser 600°C, au risque de déstabiliser certaines phases minéralogiques telles que les carbonates (p. ex. calcite, dolomite). Il n'existe pas de protocole expérimental standardisé pour déterminer la quantité de matière organique présente dans un sol, au moyen de la perte au feu. La méthodologie appliquée dans le cadre de cette thèse se réfère à celle proposée par Schulte et Hoskins (2011). L'échantillon de sol est d'abord séché à 105°C. Il est alors pesé précisément. D'une manière générale, l'échantillon est ensuite placé dans un four à une température constante située habituellement entre 350°C et 650°C, durant une période de 3 h à 24 h (Hoogsteen *et al.*, 2015). L'échantillon est alors une nouvelle fois pesé. Dans le cadre de ce travail, les essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des matériaux de construction de l'Université de Liège. Des échantillons d'environ 5 g y ont été calcinés à une température de 360°C durant 2 h, après avoir été préalablement séchés à 105°C durant 2 h également. Le four utilisé est de la marque Carbolite, muni d'un préchauffage. Chaque échantillon testé a été doublé en vue de valider la reproductibilité de la mesure. La perte au feu (LOI) se calcule comme suit :

$$LOI = \frac{m_{s,105^{\circ}C} - m_{s,360^{\circ}C}}{m_{s,105^{\circ}C}} \cdot 100 \quad (6-1)$$

où :

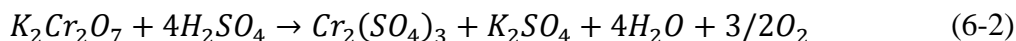
$m_{s, 105/360^{\circ}C}$  = la masse de l'échantillon sec mesurée après passage à l'étuve à 105°C ou après passage au four à 360°C.

Tableau 6-1 : Synthèse des essais de caractérisation à l'échelle microscopique réalisés sur les échantillons issus du forage F1 et de la paroi du site de Romont (Ében-Émael). Abréviations liées à la caractérisation : Carb. = carbonates ; DRX = diffractométrie des rayons X ; LOI = perte au feu (« loss on ignition ») ; L.M. = lame mince ; M.O. = matière organique ; oxyd. hum. = oxydation par voie humide ; Poro. Hg = porosimétrie par intrusion de mercure ; SFX – élém. maj. = spectrométrie de fluorescence des rayons X – mesure des éléments majeurs. Abréviations liées à la stratigraphie : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet ; PR = Pédocomplexe de Rocourt ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

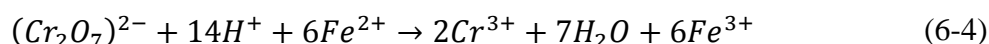
Échantillon	Profondeur (m)	Position stratigraphique	Via forage				Via paroi		
			DRX	SFX Élém. maj.	M.O.		Carb.	L.M.	Poro. Hg
					LOI	Oxyd. hum.			
F1-4	1,40-1,85	Horizon Bt holocène							
F1-5	1,85-2,35	Limon brabantien sous LD							
F1-7	2,80-3,15	HLN							
F1-9	3,50-3,85	Limon hesbayen sous HLN							
F1-10	3,85-4,30	Harveng ?							
F1-11	4,30-4,75	Harveng ?							
F1-12	4,75-5,20	Limon sus-jacent à MAL							
F1-14	5,70-6,10	Complexe stratifié inférieur							
F1-16	6,55-7,05	Complexe stratifié inférieur							
F1-18	7,50-7,90	Complexe stratifié inférieur							
F1-19 haut	7,90-8,35	CHR – partie supérieure							
F1-19 bas	7,90-8,35	CHR – partie inférieure							
F1-20 haut	8,35-8,85	Transition CHR et HBM							
F1-20 bas	8,35-8,85	Transition HBM et VSG-B							
F1-21 haut	8,85-9,35	VSG-B							
F1-21 bas	8,85-9,35	VSG-B							
F1-24	10,10-10,55	Base du PR							
F1-25	10,55-11,05	Sous PR							
Éch. 1		10 cm au-dessus de LD							
Éch. 2		Au droit de LD							
Éch. 3		10 cm sous LD							
Éch. 4		Partie inférieure de HLN							
Éch. 5		Transition HLN et lim. hesb.							
Éch. 6		Limon hesbayen sous HLN							
Éch. 7		MAL							
Éch. 8		CHR – partie supérieure							
Éch. 9		CHR – partie inférieure							
Éch. 10		Transition CHR et HBM							
Éch. 11		HBM							
Éch. 12		Transition HBM et VSG-B							
Éch. 13		VSG-B							

## 3.1.2. Oxydation par voie humide

La méthode permet de quantifier le carbone organique présent dans un sol. Pour ce faire, elle combine l'oxydation de la matière organique par un excès de dichromate de potassium en milieu sulfurique porté à ébullition, et le titrage en retour de l'excès de dichromate de potassium en présence d'un indicateur coloré (NF X 31-109, 1993 ; ISO 14235, 1998). Durant la phase d'oxydation, le carbone organique de l'échantillon est oxydé par le dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en milieu sulfurique. Le dichromate doit être en excès. Le chrome passe du degré d'oxydation  $Cr^{6+}$  à  $Cr^{3+}$  en libérant trois atomes d'oxygène (éq. 6-2). Ces derniers vont alors oxyder le carbone organique présent dans l'échantillon (éq. 6-3).



Le dichromate en excès, non utilisé dans la réaction d'oxydation précédente, est ensuite titré par une solution de sel de Mohr  $[(NH_4)_2SO_4 \cdot FeSO_4 \cdot 6H_2O]$ . Il est alors réduit par le sel ferreux ( $Fe^{2+}$ ) qui donnera un sel ferrique ( $Fe^{3+}$ ). La réaction est la suivante :



L'indicateur coloré qui est utilisé lors du titrage est l'acide diphenylaminosulfonique, qui vire du bleu-violet au vert lorsque tout le  $Fe^{2+}$  est transformé en  $Fe^{3+}$ , autrement dit quand tout le dichromate restant a été réduit.

Finalement, le pourcentage de carbone organique ( $C_{org}$ ) équivaut à :

$$C_{org}(\%) = \frac{0,12(V_0 - V)}{m_s} \quad (6-5)$$

où :

- $m_s$  = la masse sèche de l'échantillon (en g) ;
- $V$  = le volume de sel de Mohr utilisé pour le titrage de l'échantillon de sol (en ml) ;
- $V_0$  = le volume de sel de Mohr utilisé pour le titrage du blanc (en ml).

La teneur en matière organique (MO) est déterminée au moyen de la teneur en carbone organique ( $C_{org}$ ), moyennant un facteur de conversion, habituellement compris entre 1,7 et 2,0, tel que :

$$MO = (1,7 \text{ à } 2,0) \cdot C_{org} \quad (6-6)$$

Les essais ont été réalisés par le Centre d'expertise en traitement et gestion des eaux (CEBEDEAU).

## 3.2. Diffractométrie des rayons X

La minéralogie du limon est déterminée par diffractométrie des rayons X (DRX), au moyen d'un diffractomètre Bruker D8-Advance muni d'une source de radiation  $CuK\alpha$  de longueur d'onde de 1,5406 Å. Au total, 17 échantillons ont été caractérisés au moyen de cette méthode (Tableau 6-1). Préalablement à l'analyse, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 40°C durant un minimum de 48 h. Une aliquote a ensuite été séparée du reste de chaque échantillon pour être placée dans un support en PVC, de telle façon à éviter toute orientation préférentielle des grains, par la méthode « back-side » (Brindley & Brown, 1980). Les échantillons de poudres désorientées ont ensuite été soumis au rayonnement X entre 2 et 45° 2 $\theta$ . Les données ont finalement été analysées de manière semi-quantitative ( $\pm 5\%$ ) selon la

méthode proposée par Cook *et al.* (1975). Ces auteurs ont défini, pour chaque phase minéralogique, un facteur multiplicatif utilisé pour convertir l'intensité du pic de diffraction principal d'une phase minéralogique en proportion relative de cette phase. La minéralogie relative aux argiles n'a pas fait l'objet d'analyses complémentaires. Les analyses DRX ont été réalisées au sein de l'unité de recherche Argile, géochimie et environnement sédimentaires de l'Université de Liège.

### 3.3. Spectrométrie de fluorescence des rayons X

Les proportions relatives des éléments majeurs composant le limon ont été quantifiées par spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX), au moyen du spectromètre ARL 9400XP. Les éléments majeurs ont été analysés sur des disques de verre résultant de la fusion à 1000°C de la poudre de roche mélangée à du borate de lithium dans un moule de platine. Les effets de matrice ont été corrigés selon l'algorithme de Traill-Lachance. L'imprécision obtenue sur la valeur calculée est estimée à moins de 1 %. Un total de 17 échantillons ont ainsi été analysés (Tableau 6-1) par l'unité de recherche de Pétrologie, géochimie endogènes et pétrophysique de l'Université de Liège.

### 3.4. Teneur en carbonate

La méthode consiste à traiter l'échantillon avec un acide dilué, puis à titrer le surplus d'acide (ISRIC & FAO, 2002). Environ 5 g d'échantillon de départ sont utilisés pour l'essai. Les échantillons analysés ont préalablement été placés à l'étuve à 40°C pendant une durée supérieure à 48 h. L'acide chlorhydrique (HCl) 0,2 M est utilisé pour dissoudre les carbonates (calcite et dolomite). La réaction est maintenue durant 24 h. La solution résiduelle est ensuite titrée par de l'hydroxyde de sodium (NaOH) 0,1 M au moyen de la phénolphthaléine comme indicateur coloré. La teneur en carbonate de calcium équivaut alors à :

$$CaCO_3(\%) = 50.M \frac{V_0 - V}{m_s} w \quad (6-7)$$

où :

- $m_s$  = la masse sèche de l'échantillon (en g) ;
- $V$  = le volume de NaOH utilisé pour le titrage de l'échantillon de sol (en ml) ;
- $V_0$  = le volume de NaOH utilisé pour le titrage du blanc (en ml) ;
- $M$  = la molarité de la solution de NaOH ;
- $w$  = la teneur en eau de l'échantillon (%).

Il est possible que cette méthode surestime la quantité de carbonate présente dans l'échantillon suite à la dissolution de composants non carbonatés. L'erreur peut être significative pour des teneurs en carbonate inférieures à 1 %. Un total de cinq échantillons ont été analysés par cette méthode (Tableau 6-1), au sein du Laboratoire des matériaux de construction de l'Université de Liège.

### 3.5. Porosimétrie par intrusion de mercure

La porosimétrie par intrusion de mercure permet de déterminer la taille des pores présents dans un matériau poreux (ASTM D4404-10, 2010). Le mercure possède la propriété de se comporter comme un liquide non-mouillant vis-à-vis de la plupart des matériaux solides. Grâce à cette propriété, le mercure pénètre dans les pores ouverts sous l'effet de la



pression. D'après l'équation de Washburn (1921) (éq. 6-8), le rayon des pores ( $r_p$ ) est inversement proportionnel à la pression d'intrusion appliquée (P).

$$P = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r_p} \quad (6-8)$$

où :

- P = la pression d'injection du mercure ;
- $r_p$  = le rayon des pores ;
- $\gamma$  = la tension superficielle à l'interface liquide-gaz (= 480 mNm<sup>-1</sup> à 25°C pour le mercure) ;
- $\theta$  = l'angle de mouillage du liquide avec le matériau (= 140° pour le mercure).

Plusieurs hypothèses doivent toutefois être considérées :

- la tension de surface et l'angle de contact du mercure avec le solide sont constants tout au long de la mesure ;
- la pression d'intrusion du mercure doit être à l'équilibre ;
- les pores sont considérés cylindriques ;
- les solides ne sont pas sujets à une déformation sous l'effet de la pression.

Les mesures ont été réalisées sur sept échantillons non remaniés issus de la paroi de Romont (Tableau 6-1). Ils ont été lyophilisés préalablement aux mesures par porosimétrie. La lyophilisation est la technique la plus appropriée pour sécher un matériau poreux tout en préservant sa structure interne (Ahmed *et al.*, 1974 ; Delage & Pellerin, 1984 ; Delage *et al.*, 1996). Un fragment de sol sec d'une masse d'environ 0,5 g a été utilisé pour l'essai. L'appareil utilisé pour la porosimétrie est un porosimètre Quantachrome Poromaster 60. Ces essais ont été réalisés par le laboratoire NCE (Nanomaterials, Catalysis, Electrochemistry) de l'Université de Liège.

### 3.6. Analyse pétrographique

Un total de 13 échantillons non remaniés issus de la paroi de Romont ont été étudiés au microscope polarisant (Tableau 6-1). Pour ce faire, autant de lames minces (une par échantillon), de dimension 30 x 45 mm<sup>2</sup>, ont été soigneusement amenées à 30  $\mu$ m d'épaisseur. La confection des lames minces a été réalisée par le Laboratoire de Pétrologie sédimentaire de l'Université de Liège. Les observations ont été effectuées sur un microscope Zeiss Sigma 300, au sein du « Georesources-GeoImaging Lab » de l'unité de recherche « Minerals Engineering and Recycling » de l'Université de Liège.

## 4. Résultats

Les résultats sont présentés dans cette section. Ils sont repris en trois sous-sections : la géochimie (minéralogie, éléments majeurs et matière organique), la microstructure et les observations pétrographiques. Chacune de ces analyses sont évidemment complémentaires et permettent, lorsqu'elles sont considérées ensemble, d'améliorer significativement la connaissance du matériau limoneux étudié. Toutefois, cette analyse globale de l'étude à l'échelle microscopique sera réalisée plus tard, dans ce chapitre. La section qui suit s'intéresse donc à la caractérisation des échantillons aux moyens des différentes techniques utilisées, qui sont considérées individuellement.

### 4.1. Géochimie

L'analyse géochimique réalisée concerne les éléments majeurs, les différentes phases minéralogiques, la teneur en carbonates, et la teneur en matière organique. Les résultats détaillés correspondant à chaque échantillon analysé, sont présentés en annexe 6.

#### 4.1.1. Minéralogie

Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) indiquent une très nette prédominance du quartz, avec une proportion relative moyenne approximative de 87 % ( $\pm 5$  %), variant entre 52 et 95 % ( $\pm 5$  %) (Figure 6-2 (a)). Cette proportion relative est plus élevée que celle renseignée dans la définition du loess par M. Pécsi (1990), qui indique une proportion s'étalant plutôt entre 60 et 70 % de quartz. Les valeurs mesurées à Romont sont, par contre, en accord avec celles obtenues sur le site proche de Veldwezelt-Hezerwater (Vancampenhout *et al.*, 2013a), où des proportions relatives moyennes de 68 % à 88 % en quartz, selon les profils analysés, ont été mesurées.

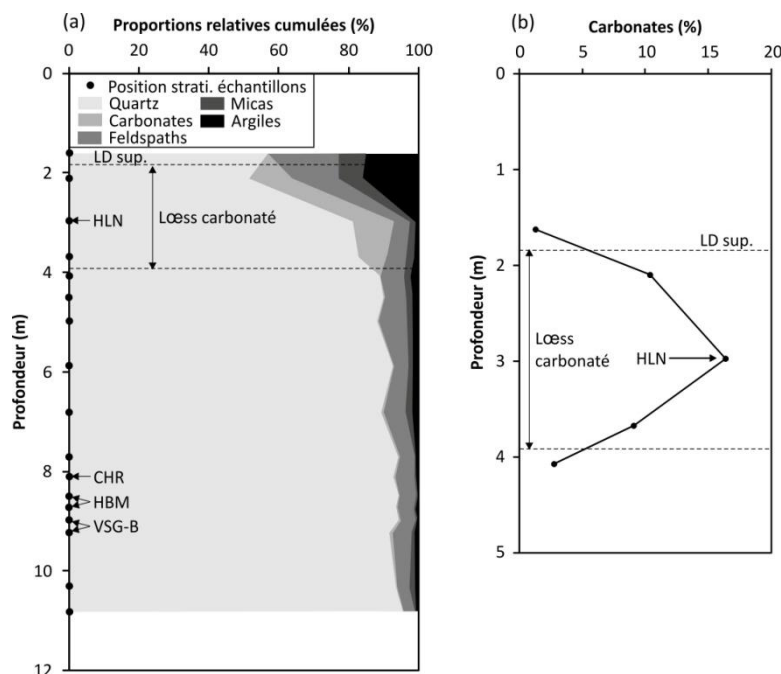


Figure 6-2 : (a) Variation des proportions relatives approximatives ( $\pm 5$  %) des différentes phases minéralogiques en fonction de la profondeur (par DRX). (b) Variation de la teneur en carbonates (par dissolution et titrage). Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

La calcite et la dolomite sont deux phases minéralogiques assez présentes dans la partie carbonatée de la séquence lœssique de Romont. La somme des proportions relatives de ces deux phases atteint jusqu'à 12 % ( $\pm 5$  %) sous la limite de décarbonatation superficielle (Figure 6-2 (a)). La quantité précise de carbonates présents dans le limon est apportée au moyen du titrage de la solution d'acide chlorhydrique en excès dans l'échantillon, après dissolution des carbonates. Les résultats de cette analyse sont concordants avec les mesures par DRX. Les carbonates sont essentiellement présents entre approximativement 2 et 4 m de profondeur (Figure 6-2 (b)). Ils atteignent la quantité maximale mesurée de 16,4 % à proximité de l'Horizon à Langues de Nagelbeek. Les autres phases minéralogiques détectées par DRX sur le site de Romont sont représentées, en proportion relative moyenne décroissante, par le feldspath, les argiles et le mica. Des minéraux lourds (épidote, amphibole, grenat, zircon, tourmaline, rutile) sont également fréquemment renseignés dans le lœss, en quantité très réduite (Gullentops, 1954 ; Juvigné, 1978 ; Pirson *et al.*, 2017).

#### 4.1.2. Éléments majeurs

L'analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX) permet de quantifier les principaux éléments majeurs présents au sein du limon. Les éléments qui ont fait l'objet d'une quantification sont :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Par ailleurs, la perte au feu (LOI) a également été déterminée entre les températures de 105°C et 1000°C. Ce paramètre reflète la quantité variable de carbonates, de phases hydratées (essentiellement des argiles) et de matière organique. Ces phases sont en effet calcinées ou modifiées à une telle température.

La quantité de  $\text{SiO}_2$  est évidemment la plus importante en raison de la grande proportion de quartz et de phases silicatées mises en évidence par DRX. Il atteint une proportion moyenne de 81,5 % (variant entre 74,8 et 88,9 %). Les autres éléments principaux correspondent, en proportions relatives moyennes décroissantes :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9,0 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3,5 %),  $\text{K}_2\text{O}$  (1,9 %) et  $\text{CaO}$  (1,8 %). Les autres éléments sont inférieurs à 1 %. Ces valeurs moyennes ne reflètent toutefois par la variabilité de leur quantité en fonction des différents horizons investigués au sein de la séquence lœssique.

Quatre éléments majeurs, ainsi que la perte au feu, sont mis en évidence dans l'analyse stratigraphique qui suit. Les autres sont, soit présents en quantité très faible ( $< 1$  %), soit ne montrent pas de variation significative en fonction de la profondeur. La Figure 6-3 illustre la variation des ces éléments et de la perte au feu en fonction de la profondeur. Les principaux horizons stratigraphiques de la séquence lœssique de Romont sont également renseignés. Tout d'abord, la Figure 6-3 (a) met en évidence les tendances comparables que suivent les quantités de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , tout au long de la séquence. La transition entre l'Horizon blanchi de Momalle et le Sol de Villers-Saint-Ghislain B est bien identifiable. Le premier est appauvri en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , alors que le second est plutôt enrichi en ces éléments. La quantité de  $\text{MgO}$  (Figure 6-3 (b)) suit également une tendance comparable au droit de ces horizons. Un appauvrissement en ces éléments est caractéristique d'un horizon éluvié, alors qu'un enrichissement est plutôt en relation avec les horizons pédologiques B, illuviés (Schaetzl & Anderson, 2005). Ensuite, les éléments représentés sur la Figure 6-3 (b) mettent en évidence, dans la partie superficielle du profil, la présence des lœss carbonatés, entre approximativement 2 et 4 m de profondeur. Cette couche carbonatée se caractérise par une augmentation du  $\text{CaO}$ , en relation avec la présence de calcite et de dolomite, et de  $\text{MgO}$ , en lien avec la dolomite. Enfin, la variation du LOI (Figure 6-3 (b)) reflète la présence des phases carbonatées. Elle dépend également de la présence de matière organique et de minéraux hydratés.

L'échantillon F1-25 semble différent des autres échantillons analysés. Il présente en effet les quantités les plus faibles pour l'ensemble des éléments majeurs, hormis le  $\text{SiO}_2$ , qui lui, constitue en contre partie la quantité la plus élevée de la séquence.

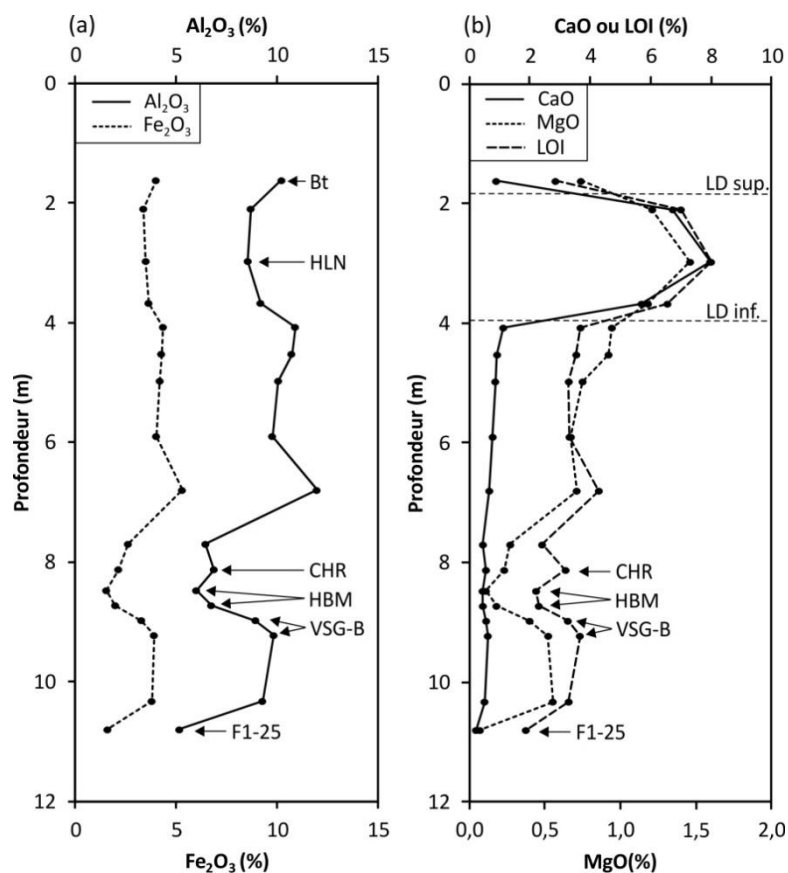


Figure 6-3 : Variation de la proportion des éléments majeurs et de la perte au feu (LOI) en fonction de la profondeur. (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (b)  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  et LOI. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

#### 4.1.3. Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été déterminée au moyen de deux méthodes : par perte au feu et par oxydation par voie humide. Afin de corrélérer la teneur en matière organique mesurée par perte au feu ( $\text{MO}_{\text{LOI}}$ ) avec celle déterminée par oxydation par voie humide, il est nécessaire de convertir la teneur en carbone organique en matière organique. Pour ce faire, il existe le facteur généralement utilisé, de 1,724, à appliquer au carbone organique. Ce facteur a été proposé par van Bemmelen (1891) et considère que la matière organique d'un sol contient 58 % de carbone organique. Or, il a par la suite été démontré que cette proportion de  $\text{C}_{\text{org}}$  au sein de la matière organique d'un sol varie en fonction du type de sol (Jain *et al.*, 1997) et de la profondeur du sol (Westman *et al.*, 2006). Différentes études ont proposé une gamme étendue de valeurs pour le facteur de corrélation : [1,72-2,40] d'après Broadbent (1953), [1,77-2,07] d'après Howard (1965), ou encore [1,54-2,00] d'après David (1988).

Cinq échantillons (Tableau 6-1) ont été utilisés pour établir cette corrélation entre les deux méthodes expérimentales. Les résultats sont illustrés à la Figure 6-4. Quatre des cinq échantillons s'alignent raisonnablement ( $R^2 = 0,77$ ) selon une droite de pente valant 2,0. Cette valeur équivaut donc au facteur permettant de corrélérer la teneur en  $\text{C}_{\text{org}}$  à la teneur en matière

organique moyenne, pour les dépôts de la séquence lœssique de Romont. Elle est cohérente avec les valeurs proposées dans la littérature.

Le cinquième échantillon (F1-21bas) n'a pas été considéré dans le calcul de la droite de régression linéaire en raison de son éloignement important, par rapport aux autres échantillons. Pour cet échantillon, la teneur en  $MO_{LOI}$  pourrait avoir été surestimée, ou la teneur en  $C_{org}$  pourrait avoir été sous-estimée. Il n'est toutefois guère aisé de comprendre pourquoi cet échantillon ne suit pas la tendance observée par les autres. Il pourrait s'agir de l'hétérogénéité de l'échantillon initial, de l'oxydation incomplète du carbone par le dichromate de potassium, ou encore de l'extraction de l'eau intervenant dans la structure minéralogique des argiles lors de la calcination. L'analyse granulométrique a justement révélé que l'échantillon F1-21bas est également l'échantillon le plus riche en fraction argileuse (fraction  $< 2 \mu m$ ) (Figure 5-20 (a)). Il faut également signaler que les teneurs en carbone organique les plus faibles, mesurées par oxydation par voie humide, sont proches de la limite inférieure de détection de la méthode.

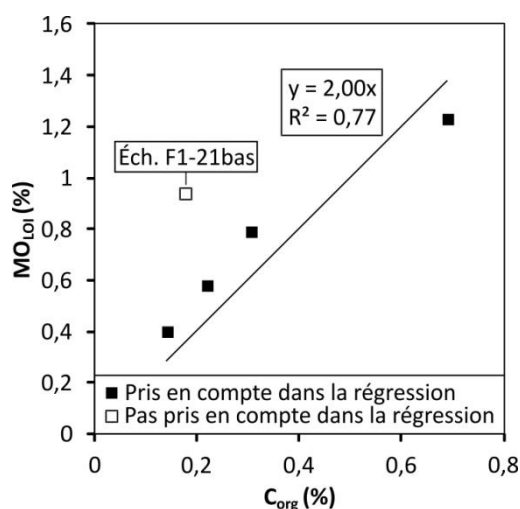


Figure 6-4 : Corrélation entre la teneur en carbone organique ( $C_{org}$ ) mesurée par oxydation par voie humide, et la teneur en matière organique mesurée par perte au feu ( $MO_{LOI}$ ).

Le graphique suivant (Figure 6-5) indique la variation de la teneur en matière organique en fonction de la profondeur. Le facteur de 2,0 a été appliqué pour convertir le pourcentage en  $C_{org}$  mesuré par oxydation par voie humide, en matière organique. La teneur en matière organique mesurée varie entre 0,4 et 1,4 % au sein du lœss. Elle ne présente aucun changement significatif de part et d'autre de la limite de décarbonatation. Plus bas dans la séquence, le Complexe Humifère de Remicourt correspond à l'horizon qui présente la teneur en matière organique la plus élevée. Cet horizon surmonte l'Horizon blanchi de Momalle, qui lui, est plutôt pauvre en matière organique. En considérant les mesures obtenues par perte au feu, la teneur en matière organique augmente sous l'Horizon blanchi de Momalle, au sein du Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Comme cela a été souligné lors de l'étude à l'échelle macroscopique (chapitre 5), l'échantillon F1-25 semble relativement différent des autres horizons de la séquence. Il présente en effet un pourcentage en matière organique parmi les plus faibles mesurés.

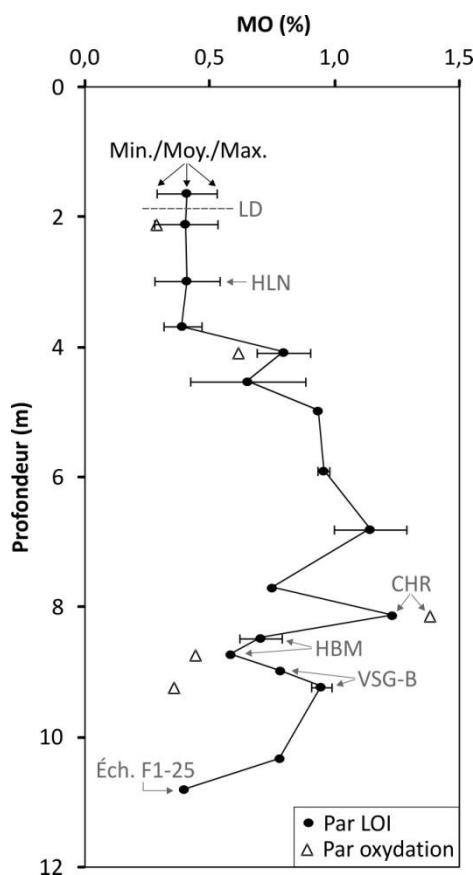


Figure 6-5 : Évolution de la teneur en matière organique (MO) en fonction de la profondeur. La teneur en matière organique a été mesurée par perte au feu (LOI) et par oxydation par voie humide. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

#### 4.2. Microstructure

La microstructure a été investiguée en termes de porosité, au moyen de la porosimétrie par intrusion de mercure. Il s'agit d'une technique assez onéreuse. Une sélection de sept échantillons non remaniés, prélevés sur la paroi de Romont, ont dès lors été caractérisés par porosimétrie. La masse sèche ( $m_s$ ) des fragments de sol analysés, varie entre 0,24 et 0,60 g (Tableau 6-2). Ils proviennent d'horizons caractéristiques mis en évidence au moyen de la résistance au cône du CPT, comme cela a été discuté dans le chapitre 4. Dans l'analyse qui suit, la nomenclature utilisée pour décrire les pores en fonction de leur taille, est définie arbitrairement de la façon suivante :

- macropore : diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$  ;
- mésopore : diamètre compris entre 1 et 10  $\mu\text{m}$  ;
- micropore : diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .

La Figure 6-6 (a) représente, le volume apparent des pores cumulé normalisé par gramme d'échantillon sec, en fonction du diamètre des pores. Les courbes dessinent une sigmoïde. Le graphique met notamment en évidence des valeurs de volume cumulé normalisé assez différentes entre les échantillons. Ainsi, l'Horizon blanchi de Momalle (Éch. 11) présente la porosité la plus faible. À l'opposé, le Complexe Humifère de Remicourt est celui

qui est caractérisé par la porosité la plus élevée (Éch. 8). Par ailleurs, l'échantillon 1 se distingue des autres par une plus grande quantité de macropores (Figure 6-6 (a), Figure 6-7). Cet échantillon provient de l'horizon Bt holocène illuvié, sus-jacent à la limite de décarbonatation superficielle.

La Figure 6-6 (b) illustre la fréquence de la taille des pores ( $\psi$ ) en fonction de leur diamètre. Cette fréquence correspond à la dérivée du volume des pores cumulé normalisé en fonction de la taille des pores, tel que :

$$\psi(D) = \frac{-dV(D)}{d(\log D)} \quad (6-9)$$

où :

- $\psi$  = la fréquence de la taille des pores ;
- $D$  = le diamètre des pores ;
- $V$  = le volume des pores cumulé normalisé.

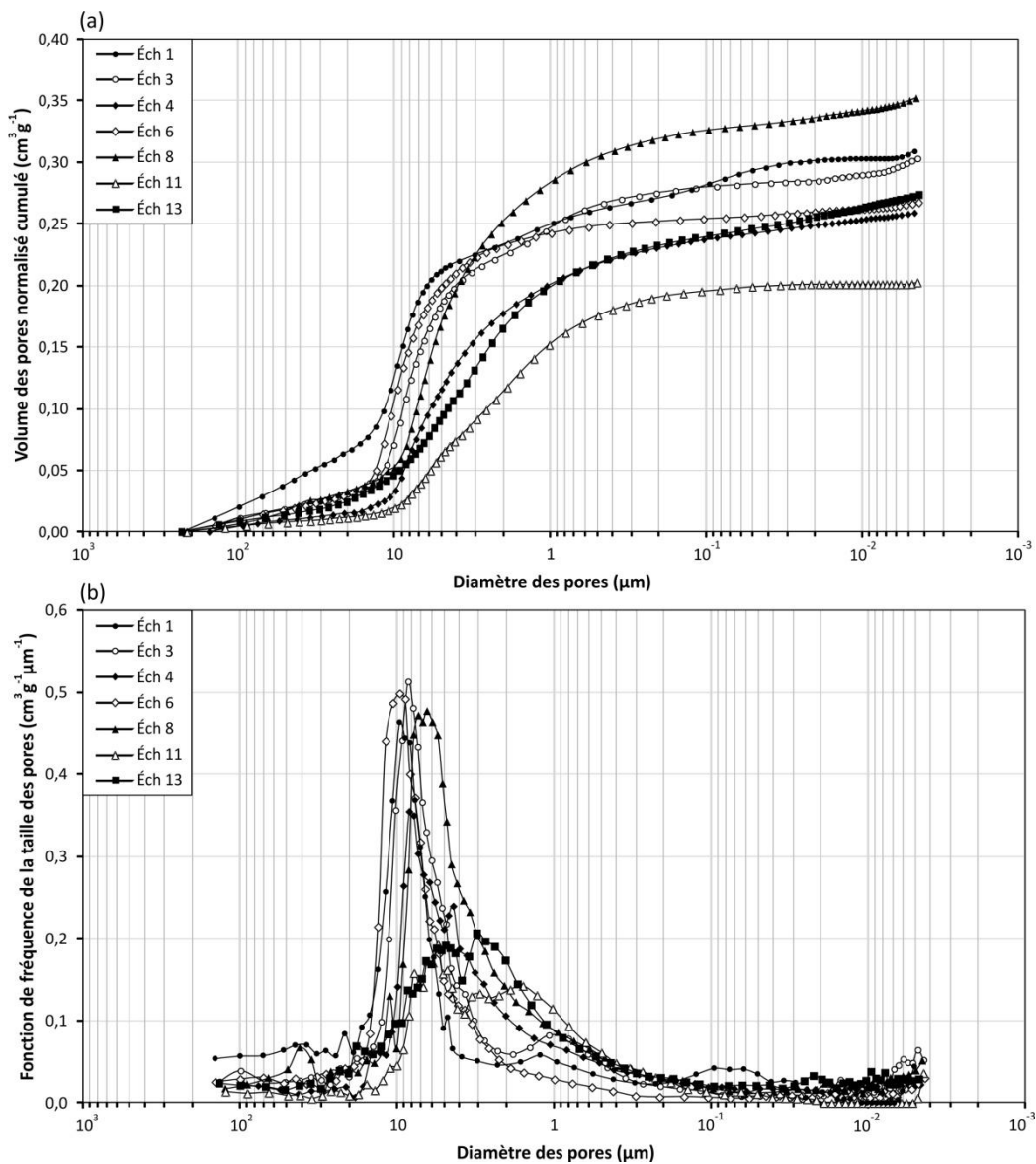


Figure 6-6 : (a) Évolution du volume des pores cumulé normalisé par gramme d'échantillon sec, en fonction du diamètre des pores. (b) Distribution de la fréquence des pores en fonction de leur diamètre.

La plupart des courbes de la Figure 6-6 (b) montrent une distribution unimodale de la taille des pores, avec une fréquence maximale très marquée aux alentours des valeurs de diamètres correspondant à 5-10  $\mu\text{m}$  (Tableau 6-2). Seuls deux échantillons (Éch. 11 et 13) diffèrent de cette tendance en présentant une distribution plus aplaniée de la fréquence de la taille des pores. La majorité des pores possèdent des diamètres qui se trouvent dans la gamme des mésopores (1-10  $\mu\text{m}$ ) (Figure 6-7).

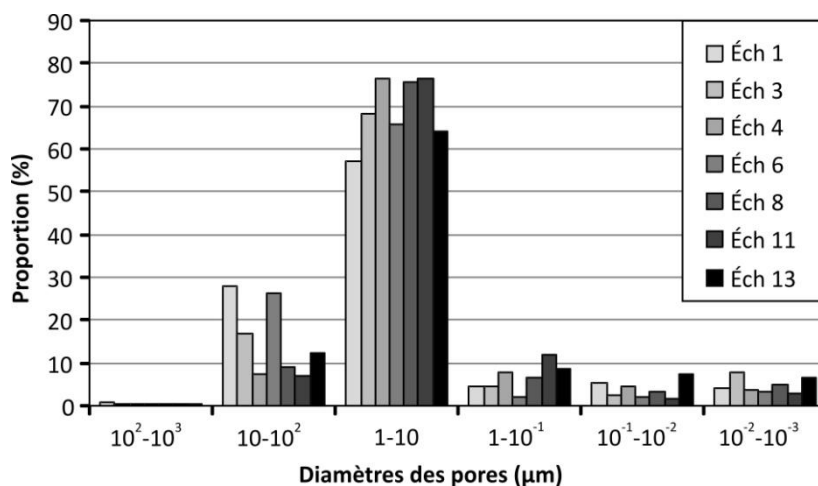


Figure 6-7 : Répartition de la proportion des pores selon différentes gammes de diamètres.

La Figure 6-8 (a) représente également la fréquence des pores en fonction de leur diamètre, en s'intéressant plus spécifiquement aux alentours de la limite de décarbonatation superficielle. L'échantillon 1, issu de la base de l'horizon Bt holocène qui surmonte la limite de décarbonatation, se caractérise par une plus grande proportion de macropores (29 %), par rapport à l'horizon carbonaté sous-jacent (Éch. 3), qui en contient 17 % (Tableau 6-2). Ils possèdent tous les deux une distribution unimodale bien marquée de la taille des pores. La transition entre la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek (Éch. 4) et les lœss hesbayens (Éch. 6) sous-jacents est présentée à la Figure 6-8 (b). Les deux échantillons sont représentés par une distribution unimodale de la taille des pores. L'échantillon 4 présente clairement une plus grande proportion de micropores et une plus faible proportion en macropores, que l'échantillon 6. Le volume total apparent des pores ne présente toutefois pas de différence significative entre les deux horizons (Figure 6-6 (a), Tableau 6-2). Enfin, la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt (Éch. 8) et l'Horizon blanchi de Momalle (Éch. 11), suivi par le Sol de Villers-Saint-Ghislain B (Éch. 13), montrent des différences importantes sur le point de leur structure poreuse (Figure 6-8 (c)). L'échantillon 8 montre une distribution unimodale bien marquée de la taille des pores. Par contre, les échantillons issus du sommet du Pédocomplexe de Rocourt se caractérisent par une distribution de la taille des pores plus aplaniées, et légèrement bimodale. Les deux maxima correspondant à cette distribution bimodale se localisent toujours dans la gamme des mésopores (diamètre de 1 à 10  $\mu\text{m}$ ). En outre, le volume total apparent de l'Horizon blanchi de Momalle est près de deux fois plus faible que celui caractérisant le Complexe Humifère de Remicourt (Figure 6-6 (a), Tableau 6-2). Le volume total apparent des pores du Sol de Villers-Saint-Ghislain B est intermédiaire entre ces deux extrêmes.



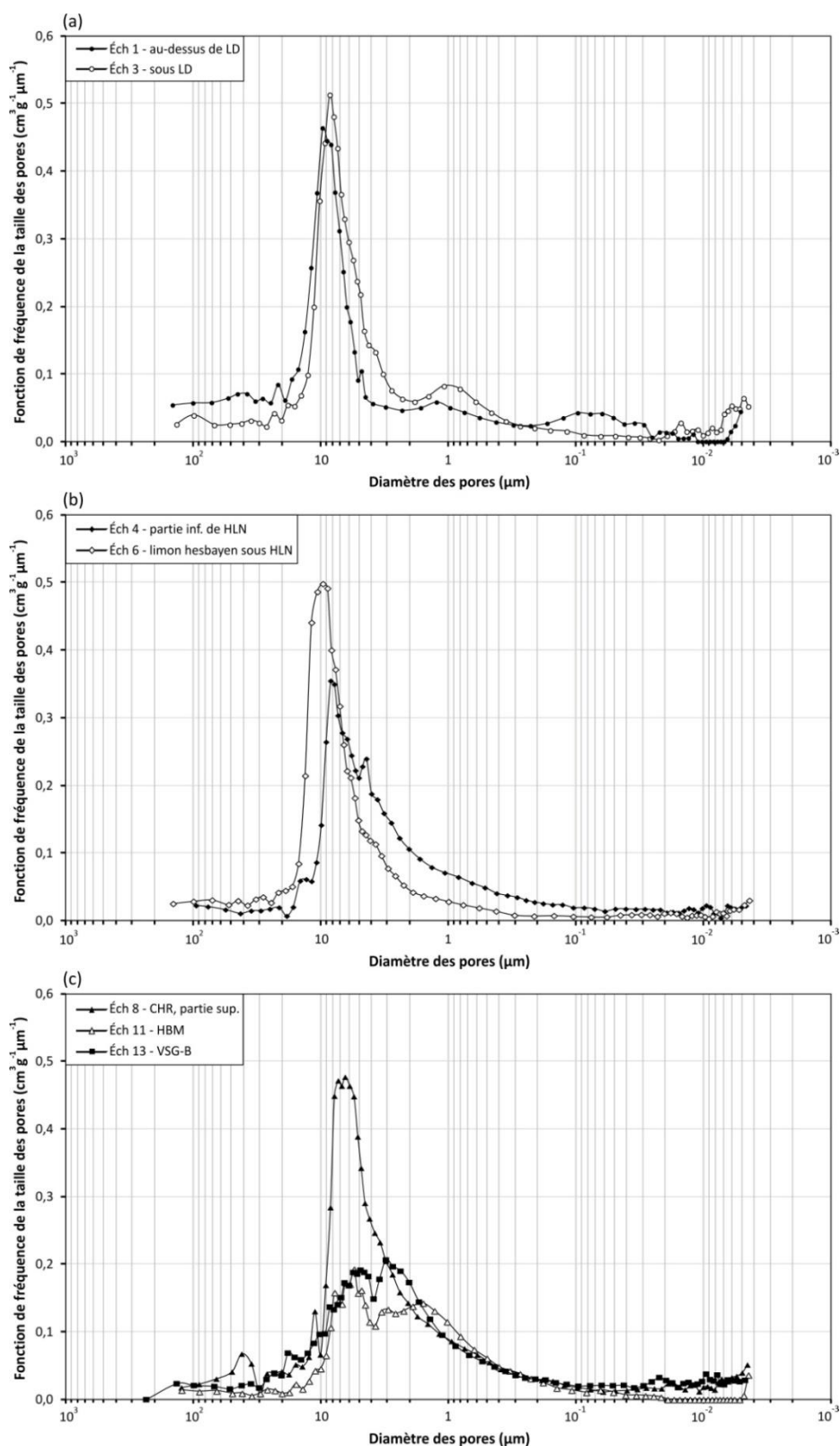


Figure 6-8 : Distribution de la fréquence des pores en fonction de leur diamètre, (a) aux alentours de la limite de décarbonatation superficielle, (b) aux alentours de la transition entre les lœss hesbayens et les lœss brabantiens, (c) à la transition entre le Complexe Humifère de Remicourt et le sommet du Pédocomplexe de Rocourt. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Tableau 6-2 : Résultats de l'analyse détaillée sur la distribution de la taille des pores par porosimétrie par intrusion de mercure. La position stratigraphique des échantillons est mentionnée au Tableau 6-1.

Éch.	m <sub>s</sub> (g)	Volume tot. normalisé de Hg introduit (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	Diamètre des pores (médiane) (µm)	Diamètre des pores (fréquence max.) (µm)	Rapport entre macro- et micropores D <sub>&gt;10µm</sub> /D <sub>&lt;1µm</sub>	Macropores (%)
Éch. 1	0,24	0,31	8,22	9,59	2,08	29,0
Éch. 3	0,36	0,30	6,90	8,48	1,19	17,2
Éch. 4	0,60	0,26	5,29	8,29	0,48	7,6
Éch. 6	0,46	0,27	8,22	9,59	3,58	26,7
Éch. 8	0,43	0,35	5,46	6,40	0,64	9,5
Éch. 11	0,35	0,20	4,48	5,46	0,44	7,2
Éch. 13	0,46	0,27	4,23	3,08	0,56	12,9

#### 4.3. Observations pétrographiques

Les observations pétrographiques ont été réalisées sur les échantillons non remaniés prélevés sur la paroi du site de Romont (Tableau 6-1). Une synthèse des observations réalisées sur chacune des lames minces est proposée au Tableau 6-3 suivant. Les principales observations sont illustrées par des photographies reprises à la Figure 6-9.

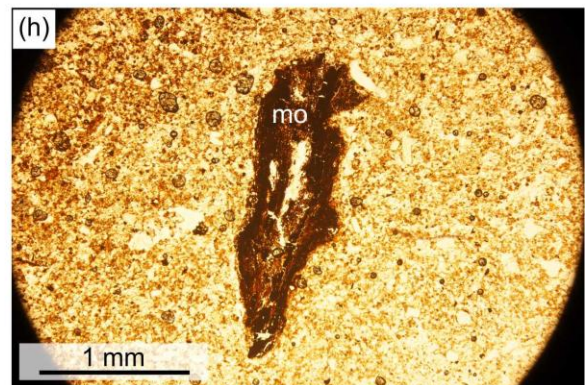
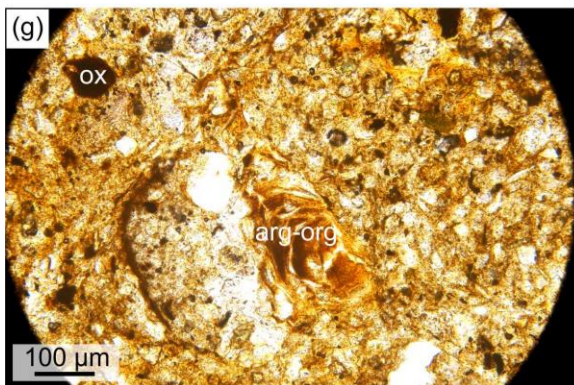
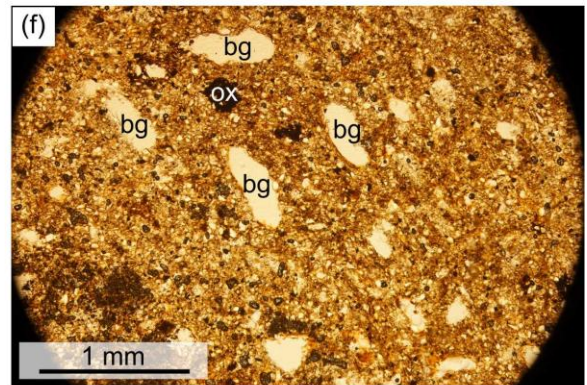
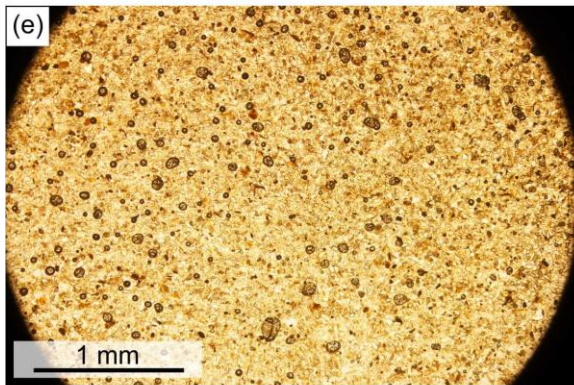
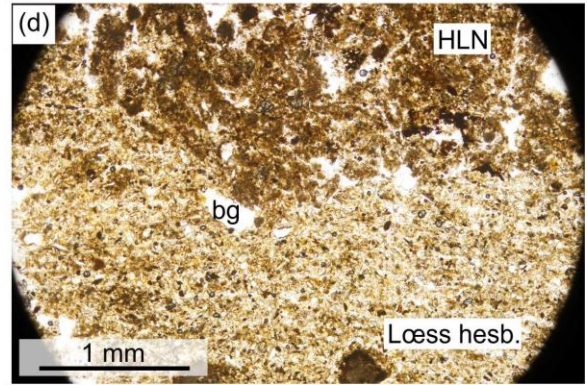
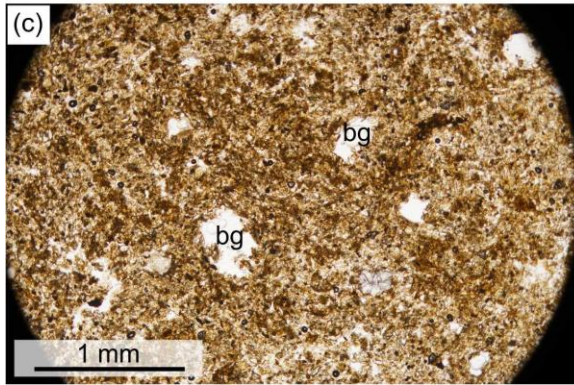
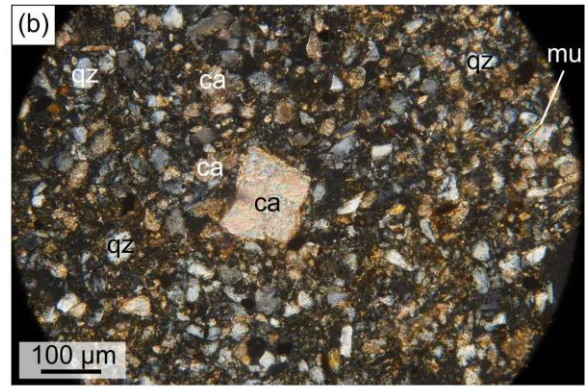
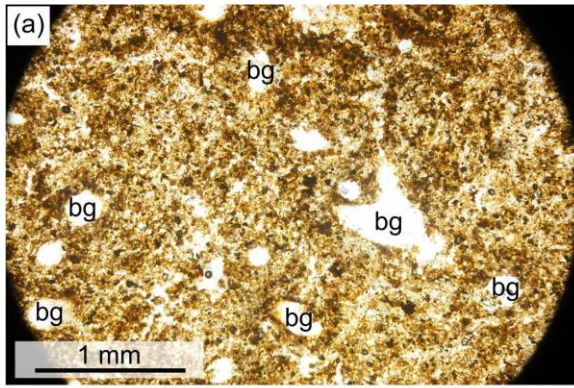
Tableau 6-3 : Description des lames minces suite l'analyse au microscope polarisant. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Remicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation superficielle ; MAL = Sol de Malplaquet ; VSG-B = Sol de Villers-Saint-Ghislain B.

Éch.	Horizon	Description pétrographique
1	Bt holocène, 10 cm au-dessus de LD	Biogaleries très fréquentes, faisant souvent quelques centaines de µm ( <b>Figure 6-9 (a)</b> ). Présence de matière argilo-organique sur le pourtour des biogaleries (traces d'illuviation). La matière organique est assez présente et forme également la matrice avec les minéraux argileux. Présence également de quartz, d'orthose, de plagioclase, de chlorite, de muscovite aciculaire, d'oxydes de Fe-Mn. Pas de lamination visible.
2	Au droit de LD	Très comparable à l'échantillon 1, avec apparition de la calcite dans la partie inférieure de l'échantillon. Présence localement de grands cristaux de calcite (> 100 µm) ( <b>Figure 6-9 (b)</b> ). La plupart des grains de calcite possèdent une taille comparable aux grains de quartz. La calcite semble également présente dans la matrice intergranulaire. Pas de lamination visible.

Éch.	Horizon	Description pétrographique (suite)
3	10 cm sous LD	Assez comparable à l'échantillon 1, avec de la calcite présente dans l'entièreté de l'échantillon. Les biogaleries sont toujours fort présentes mais semblent être en moins grande quantité que dans l'échantillon 1 ( <b>Figure 6-9 (c)</b> ). Présence localement de grands cristaux de calcite (> 100 µm). La plupart des grains de calcite possèdent une taille comparable aux grains de quartz. Pas de lamination visible.
4	Partie inférieure de HLN	Présence de biogaleries, mais moins fréquentes que dans les échantillons 1 à 3. Matière organique et minéraux argileux assez présents, souvent inclus dans la matrice intergranulaire. La calcite est toujours bien présente, sous forme de grain de taille comparable aux grains de quartz, mais également dans la matrice intergranulaire. Pas de lamination visible.
5	Transition HLN et limon hesbayen	La transition entre l'HLN et le loëss hesbayen sous-jacent est clairement visible. L'HLN apparaît plus sombre que le loëss hesbayen ( <b>Figure 6-9 (d)</b> ). Il contient plus de matière organique et de minéraux argileux. La porosité semble également plus importante dans l'HLN. Le loëss hesbayen présente une lamination localement bien marquée. Des biogaleries sont présentes dans les deux unités, et semblent plus abondantes dans l'HLN. La calcite est toujours présente.
6	Limon hesbayen sous HLN	La matière organique et les minéraux argileux sont peu présents ( <b>Figure 6-9 (e)</b> ) et se localisent principalement dans l'espace intergranulaire. Présence de quelques biogaleries de quelques centaines de µm, sans trace d'illuviation. Présence d'une lamination localement bien marquée. La calcite est toujours présente, ainsi que quelques nodules d'oxydes de Fe-Mn.
7	MAL	Présence de nombreuses biogaleries de quelques centaines de µm de diamètre ( <b>Figure 6-9 (f)</b> ). La matière organique et les minéraux argileux sont assez présents, essentiellement dans la matrice intergranulaire, mais également sous forme d'enrobages concentrés atteignant localement plus de 100 µm ( <b>Figure 6-9 (g)</b> ). Présence de nodules d'oxydes de Fe-Mn. La calcite est absente. Pas de lamination visible.
8	CHR – partie supérieure	La matière organique est très présente en petits agrégats de taille comparable à celle des grains (qqs µm à qqs dizaines de µm) ( <b>Figure 6-9 (i)</b> ), mais également sous forme de grands fragments millimétriques ( <b>Figure 6-9 (h)</b> ). De nombreuses biogaleries de quelques centaines de µm à 1 mm sont également présentes. La calcite est absente. L'échantillon ne présente pas de lamination apparente.
9	CHR – partie inférieure	L'échantillon est assez comparable au précédent (éch. 8) ( <b>Figure 6-9 (j)</b> ). Il présente par ailleurs des zones caractérisées par une porosité importante ( <b>Figure 6-9 (i)</b> ).

Éch.	Horizon	Description pétrographique (suite)
10	Transition CHR et HBM	La matière organique est nettement moins présente que dans le CHR. Elle se présente sous la forme de petits agrégats ou de grands fragments argilo-organiques. L'échantillon comprend également quelques oxydes de Fe-Mn de qqs dizaines de $\mu\text{m}$ de diamètre. La matrice argilo-organique ne semble pas présente partout entre les grains. À l'échelle de la lame mince, l'échantillon présente des plans de discontinuité ouverts, subparallèles à la stratification. Les biogaleries sont moins fréquentes que dans le CHR.
11	HBM	La matière organique est également nettement moins présente que dans le CHR. Les grains sont plus régulièrement en contact les uns avec les autres suite à la plus faible proportion de matrice argilo-organique ( <b>Figure 6-9 (k)</b> ). À l'échelle de la lame mince, l'échantillon présente des plans de discontinuité ouverts et subparallèles à la stratification. Les biogaleries sont moins fréquentes que dans le CHR. Présence de nodules d'oxydes de Fe-Mn.
12	Transition HBM et VSG-B	La matière organique est nettement moins présente que dans le CHR. La matrice argileuse intergranulaire est plus fréquente qu'au sein de l'échantillon 11. De nombreux fragments d'enrobages concentrés de matière argilo-organique, de qqs centaines de $\mu\text{m}$ , sont présents ( <b>Figure 6-9 (l)</b> ). À l'échelle de la lame mince, l'échantillon présente des plans de discontinuité ouverts et subparallèles à la stratification. De nombreux nodules d'oxydes de Fe-Mn d'une dizaine de $\mu\text{m}$ à une centaine de $\mu\text{m}$ de diamètre sont également présents ( <b>Figure 6-9 (l)</b> ).
13	VSG-B	Une matrice argilo-organique est bien présente dans l'espace intergranulaire ( <b>Figure 6-9 (n)</b> ). Des biogaleries de quelques dizaines de $\mu\text{m}$ à plus d'une centaine de $\mu\text{m}$ sont fréquentes ( <b>Figure 6-9 (m)</b> ). L'échantillon se caractérise également par de nombreux nodules d'oxydes de Fe-Mn ( <b>Figure 6-9 (m)</b> ), pouvant atteindre jusqu'à 2 mm de diamètre. De nombreuses concentrations de matière argilo-organique sont également rencontrées en fragments de taille parfois supérieure à 100 $\mu\text{m}$ , et sur le pourtour des biogaleries (traces d'illuviation) ( <b>Figure 6-9 (m)</b> ).





Remarque : la légende est proposée à la page suivante.



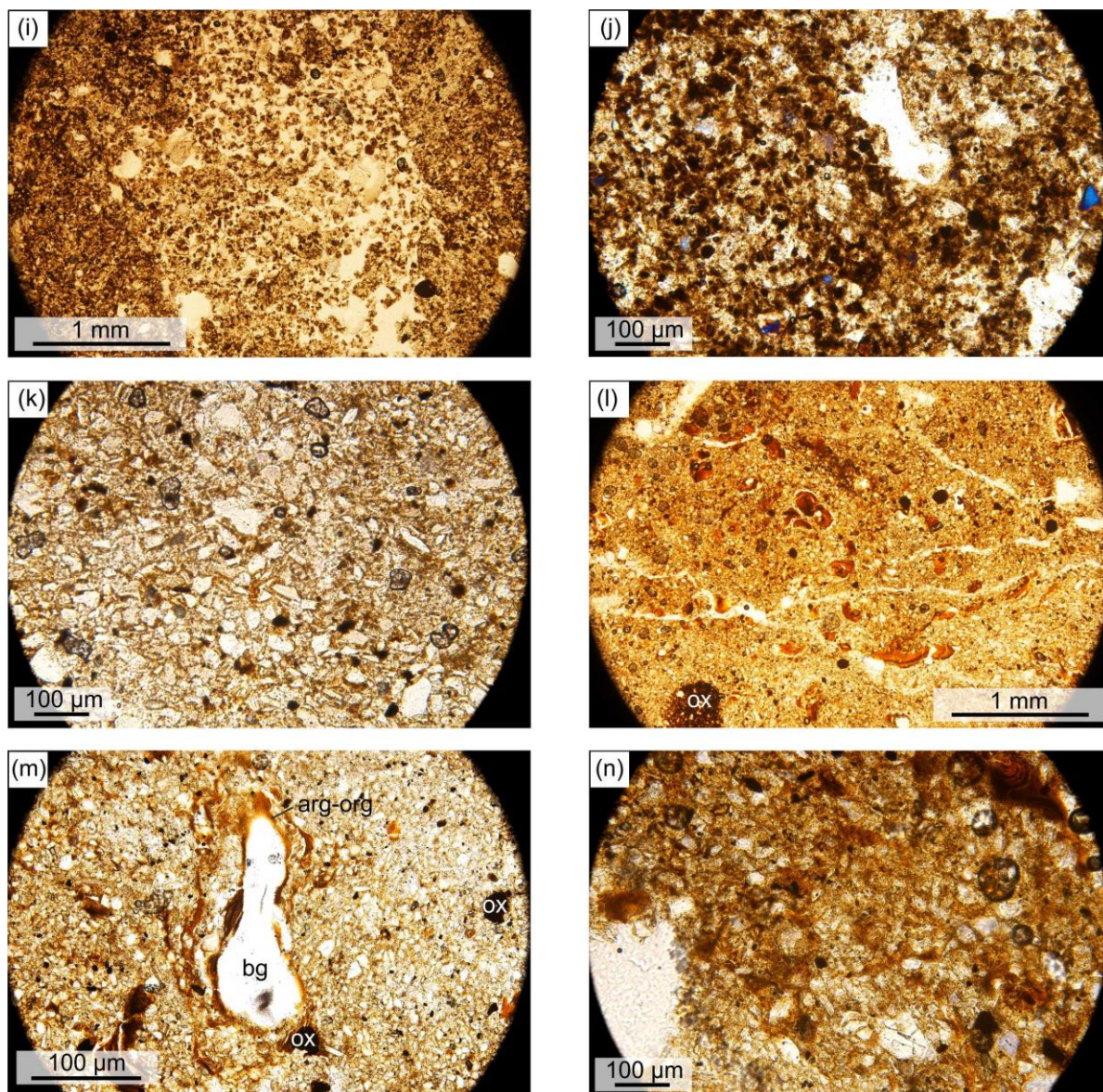


Figure 6-9 : Photographies des lames minces analysées au microscope polarisant, et réalisées sur les échantillons non remaniés issus de la paroi du site de Romont. (a) LPnA, 5x, éch. 1. Nombreuses biogaleries de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ . (b) LPA, 20x, éch. 2. Grand cristal de calcite subautomorphe. (c) LPnA, 5x, éch. 3. Biogaleries de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ . (d) LPnA, 5x, éch. 5. Transition marquée entre l'HLN (plus sombre, plus riche en matière organique et en argiles) et le læss hesbayen (plus clair). (e) LPnA, 5x, éch. 6. Globalement plus clair, moins riche en matière organique et en minéraux argileux, assez homogène. Biogaleries peu fréquentes. (f) LPnA, 5x, éch. 7. Nombreuses biogaleries de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ . (g) LPnA, 20x, éch. 7. Matière organique et minéraux argileux assez présents, essentiellement dans la matrice intergranulaire, mais également sous forme d'enrobages concentrés atteignant localement plus de 100  $\mu\text{m}$ . (h) LPnA, 5x, éch. 8. Fragment de matière organique millimétrique. (i) LPnA, 5x, éch. 9. Matière organique très présente en petits agrégats de taille comparable à celle des grains (qqs  $\mu\text{m}$  à qqs dizaines de  $\mu\text{m}$ ). Présence également d'une zone moins dense, plus poreuse. (j) LPA, 20x, éch. 9. Matière organique très présente en petits agrégats de taille comparable à celle des grains (qqs  $\mu\text{m}$  à qqs dizaines de  $\mu\text{m}$ ). (k) LPnA, 20x, éch. 11. Grains régulièrement en contact les uns avec les autres suite à une plus faible proportion de matrice argilo-organique. (l) LPnA, 5x, éch. 12. Nombreux fragments d'enrobages concentrés de matière argilo-organique, de qqs centaines de  $\mu\text{m}$ , avec quelques nodules d'oxydes de Fe-Mn. (m) LPnA, 10x, éch. 13. Biogalerie de taille supérieure à 100  $\mu\text{m}$ , avec présence de concentrations de matière argilo-organique sur le pourtour (traces d'illuviation). Présence également de nodules d'oxydes de Fe-Mn. (n) LPnA, 10x, éch. 13. Matrice argilo-organique bien présente dans l'espace intergranulaire. **Abréviations** : arg-org = concentration de matière argilo-organique ; bg = biogalerie ; ca = calcite ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LPA = lumière polarisée analysée ; LPnA = lumière polarisée non analysée ; mo = matière organique ; mu = muscovite ; ox = oxydes de Fe-Mn ; qz = quartz.

## 5. Discussions

Les différentes données collectées à l'échelle microscopique, qui ont été analysées individuellement jusqu'à présent, sont intégrées entre elles dans cette section. L'analyse présentée ici s'intéresse plus particulièrement aux différents marqueurs stratigraphiques soulignés au moyen de l'essai de pénétration statique, comme cela a été développé dans le chapitre 4. En effet, plusieurs questions restent toujours posées au terme de l'analyse macroscopique sur l'origine de la variabilité du comportement mécanique observée au sein de la séquence lœssique de Romont. Dans cette approche, un accent particulier est porté aux résultats issus de la porosimétrie par intrusion de mercure et des observations pétrographiques. Ces deux sources d'information sont, pour certains marqueurs stratigraphiques, particulièrement complémentaires entre elles. Elles permettent en outre, d'établir des liens intéressants avec les autres échelles d'étude. Les marqueurs stratigraphiques définis précédemment sur base de la variation de la résistance au cône du CPT (chapitre 4) sont : la limite de décarbonatation superficielle, la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek, le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle (situé au sommet du Pédocomplexe de Rocourt).

### 5.1. Limite de décarbonatation superficielle

La limite de décarbonatation superficielle est matérialisée à l'échelle microscopique, par la présence de phases carbonatées directement sous celle-ci. Elle résulte de la décarbonatation des lœss superficiels à la suite de la percolation des eaux de surface au sein de la séquence lœssique, en lien avec une acidification du milieu par la présence de la végétation interglaciaire. Ces phases carbonatées sont représentées par la calcite, et dans une moindre mesure, par la dolomite. La variation des pourcentages de CaO et de MgO mesurés, traduit la présence plus importante de ces phases entre 2 et 4 m de profondeur, sur le site de Romont (Figure 6-3 (b)). Au-delà de 4 m de profondeur, le limon est à nouveau décarbonaté, et ce jusqu'à la base du Pédocomplexe de Rocourt, à tout le moins. Le pourcentage en carbonates atteint une valeur maximale de 16 % à proximité de l'Horizon à Langues de Nagelbeek (Figure 6-2 (b)). Des proportions en carbonates comparables ont été mesurées dans les lœss brabantiens du site belge de Veldwezelt-Hezerwater (Vancampenhout *et al.*, 2013a).

L'horizon sus-jacent à la limite de décarbonatation superficielle est formé par l'horizon Bt holocène, à Romont. Ce dernier correspond à l'horizon illuvié du sol actuel. Des traces d'illuviation (représentées par des concentrations de matière argilo-organique sur le pourtour des biogaleries) ont d'ailleurs été observées par l'étude des lames minces. L'horizon Bt holocène est également composé d'une fraction de particules argileuses ( $< 2 \mu\text{m}$ ) plus importante que l'horizon situé sous la limite de décarbonatation (Figure 5-20 (a)).

D'un point de vue mécanique, la limite de décarbonatation superficielle se marque par une augmentation légère et rapide de la résistance au cône du CPT, de l'ordre de 1 à 2 MPa. Cette tendance s'observe de manière moins claire au moyen du pénétromètre de poche. En termes de déformabilité, l'horizon surmontant la limite de décarbonatation est caractérisé par un indice de compression ( $C_c$ ) plus élevé que dans l'horizon carbonaté sous-jacent (Figure 5-29), ce qui traduit une déformabilité également plus importante.

Par ailleurs, les résultats de la porosimétrie par intrusion de mercure révèlent une diminution de la macroporosité, et de la valeur médiane de la taille des pores (Tableau 6-2), sous la limite de décarbonatation. Le volume poreux total apparent est, quant à lui, sensiblement le même de part et d'autre de la limite de décarbonatation. Ce dernier résultat contraste avec les valeurs obtenues à l'œdomètre pour l'indice des vides initial. En effet, cette

variable montre une diminution, passant de 0,79 à 0,67, sous la limite de décarbonatation (Figure 5-29 (b)). Deux hypothèses sont avancées pour expliquer la différence observée au sujet de la porosité. L'une met en cause la technique de prélèvement par battage utilisée pour l'échantillonnage de matériau non remanié. Il s'avère que cette méthode semble avoir remanié les échantillons, de manière plus ou moins importante. Ce remaniement pourrait avoir modifié les caractéristiques intrinsèques du matériau in situ, et donc les valeurs de l'indice des vides initial déterminées à partir de ces échantillons. Cependant, un enfoncement du carottier de l'ordre de 2 à 3 cm par coup de battage a été mesuré lors de l'échantillonnage de ces horizons (annexe 4). Ceci correspond à une progression de l'enfoncement du carottier parmi les plus rapides observées pour l'ensemble de la séquence lœssique. Le remaniement de ces horizons pourrait dès lors avoir été minimisé. La seconde hypothèse met en cause la représentativité de l'échantillon utilisé pour la porosimétrie par intrusion de mercure. En effet, la mesure du volume des vides a été réalisée sur des échantillons d'une masse sèche proche de 0,5 g. Cela correspond à un volume approximatif de l'ordre de 0,33 cm<sup>3</sup>. Face à un tel volume, il devient raisonnable de mettre en cause sa représentativité par rapport à l'entièreté de l'horizon. Par comparaison, l'échantillon ayant servi à la détermination de l'indice des vides initial représente un volume total de 80 cm<sup>3</sup>.

D'après ces résultats, l'augmentation de la résistance au cône du CPT observée au droit de la limite de décarbonatation pourrait être liée à un effet couplé faisant intervenir plusieurs facteurs. Le passage au lœss carbonaté se marque par une diminution de la fraction de particules argileuses, une diminution de la macroporosité et probablement du volume des vides, ainsi que par une augmentation de la densité sèche du matériau. L'étude des lames minces ne permet pas de savoir si les carbonates jouent un rôle de ciment entre les grains de quartz et d'autres phases silicatées, comme cela est fréquemment observé dans les roches, renforçant ainsi leur résistance mécanique.

Enfin, les tomographies de résistivité électrique réalisées sur le site de Romont ont mis en évidence la présence d'une couche présentant des valeurs de résistivité légèrement plus élevées que dans le reste de la séquence lœssique (Figure 4-16). L'emplacement de cette couche se corrèle assez bien avec la localisation des lœss carbonatés. Une augmentation de la résistivité électrique en lien avec une augmentation de la teneur en carbonate, dans un matériau argileux ou limoneux, a déjà été mise en évidence expérimentalement (Lui *et al.*, 2008 ; Cai *et al.*, 2015). En outre, les échantillons prélevés entre 2 et 4 m de profondeur indiquent des valeurs de teneur en eau légèrement plus faibles, de quelques pourcents, par rapport à celles issues des horizons environnants. Ces deux facteurs ont probablement un effet conjugué sur les valeurs de résistivité électrique mesurées in situ.

## 5.2. Base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek

La transition entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et le sommet des lœss hesbayens sous-jacents bénéficie de moins de données au terme des analyses réalisées dans cette thèse, par rapport aux autres marqueurs stratigraphiques définis. D'un point de vue pédologique, la base est marquée par la présence de langues cryoturbées inclinées et très développées (Figure 3-14 (f)). Ce marqueur stratigraphique est mis en évidence par une augmentation de la résistance au cône du CPT, de l'ordre de 1 à 2 MPa, comparable à celle correspondant à la limite de décarbonatation superficielle. L'évolution de la résistance mécanique avec la profondeur, mesurée par le pénétromètre de poche, indique une tendance comparable, mais moins marquée à Romont (Figure 4-29). Sur la paroi du site de Rocourt par contre, le marqueur stratigraphique ne montre aucun changement significatif en termes de résistance mécanique au pénétromètre de poche (Figure 4-42).



L'observation des lames minces révèle une plus faible quantité en matière argilo-organique sous l'Horizon à Langues de Nagelbeek que dans ce dernier (Figure 6-9 (d)). La porosité semble également plus faible au sein des lœss hesbayens. Cependant, les résultats de la porosimétrie par intrusion de mercure indiquent une physionomie relative au lœss hesbayens assez différente. En effet, la valeur médiane de la taille des pores et le volume total apparent des macropores, sont moins élevés dans l'Horizon à Langues de Nagelbeek (Tableau 6-2). Le volume poreux total apparent est quant à lui comparable entre les deux horizons. Tout comme pour la limite de décarbonatation superficielle, les résultats de la porosimétrie par intrusion de mercure sont mis en cause. C'est le manque de représentativité de l'échantillon testé par la méthode, qui est avancé pour expliquer les différences observées avec les lames minces. Ces dernières semblent en effet plus représentatives de l'horizon dans son ensemble, puisqu'elles couvrent une superficie de près de  $2 \times 3 \text{ cm}^2$ , contre seulement un volume d'approximativement  $0,33 \text{ cm}^3$  utilisé pour la porosimétrie.

### 5.3. Complexe Humifère de Remicourt

Le Complexe Humifère de Remicourt est l'horizon le plus riche en matière organique parmi ceux qui ont été investigués en laboratoire. Son pourcentage correspond à 1,2 % par perte au feu et à 1,4 % par oxydation par voie humide (correspondant à 0,69 % de carbone organique) (Figure 6-5). Ces valeurs sont cohérentes avec celles renseignées dans la littérature et provenant d'équivalents stratigraphiques au Complexe Humifère de Remicourt. Sur le site belge de Veldwezelt-Hezerwater, des valeurs entre 0,23 et 0,34 % en  $C_{\text{org}}$  ont été mesurées (Vancampenhout *et al.*, 2008). Dans le nord de la France, les valeurs en  $C_{\text{org}}$  dépassent rarement 0,5 % (à Saint-Sauflieu, Antoine *et al.*, 1994 ; à Bettencourt, Antoine *et al.* 2003 ; à Villers-Adam, Lochet *et al.*, 2003 ; à Beugnâtre, Antoine *et al.*, 2005 ; à Havrincourt, Antoine *et al.*, 2014). Des valeurs plus élevées en  $C_{\text{org}}$ , de 1,4 % au maximum, ont été mesurées dans un horizon humifère du Pedocomplexe Kaydaky II en République Tchèque (séquence de Dolní Věstonice, Antoine *et al.*, 2013). En lame mince, la matière organique apparaît clairement. Elle se présente en petits agrégats de taille comparable à celle des grains (quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , Figure 6-9 (j)), mais également sous forme de grands fragments millimétriques (Figure 6-9 (h)).

Le Complexe Humifère de Remicourt se caractérise également par des propriétés mécaniques moindres que les horizons environnants. Les valeurs de résistance au cône sont habituellement inférieures à 3 MPa. La résistance mesurée au pénétromètre de poche suit la tendance observée par le CPT. La résistance au cône mesurée dans des niveaux riches en matière organique présente habituellement des valeurs très faibles (Robertson *et al.*, 1986 ; Lunne *et al.*, 1997 ; Missiaen *et al.*, 2015). Même si le Complexe Humifère de Remicourt est caractérisé par des teneurs en matière organique les plus élevées de la séquence lœssique étudiée, ces teneurs restent relativement faibles. La matière organique ne devrait dès lors pas expliquer seule, la raison d'une telle diminution de la résistance mécanique dans cet horizon.

En termes de déformabilité, les essais œdométriques montrent que le Complexe Humifère de Remicourt correspond à un horizon parmi les plus déformables des échantillons testés (Figure 5-28). Il possède également un indice des vides initial (0,82), ainsi qu'une teneur en eau (22 %) plus élevés que les horizons environnants (Figure 5-29). La porosimétrie par intrusion de mercure indique un volume poreux total apparent le plus important de l'ensemble des échantillons investigués. Cette mesure est en accord avec la valeur élevée obtenue pour l'indice des vides. Le volume total de l'échantillon ayant servi à la porosimétrie n'a toutefois pas été mesuré et l'indice des vides correspondant ne peut dès lors pas être recalculé pour être comparé à la valeur déterminée pour l'essai œdométrique. L'observation

des lames minces révèle la présence de zones plurimillimétriques moins denses en matériaux (Figure 6-9 (i)), avec une porosité intergranulaire s'étalant entre quelques  $\mu\text{m}$  à une centaine de  $\mu\text{m}$ . Cependant, seulement un dixième du volume poreux total apparent mesuré par porosimétrie se trouve dans la gamme des macropores. Ce résultat contraste avec les observations des lames minces. La méthode par intrusion de mercure mesure la taille des pores situés à l'entrée d'un réseau poreux. Les pores d'entrée peuvent être plus petits que la taille moyenne des pores observés au sein d'un même réseau (Delage *et al.*, 1996). Ce biais est bien connu et porte le nom d'effet de goulot. Le manque de représentativité de l'échantillon utilisé par la porosimétrie peut également expliquer la différence observée. In fine, la porosité plus importante, observée et mesurée, en lien avec une densité sèche plus faible que dans les autres horizons, pourraient constituer les caractéristiques principales pour expliquer les plus faibles valeurs de résistance mécanique mesurées in situ.

#### 5.4. Sommet du Pédocomplexe de Rocourt

Le sommet du Pédocomplexe de Rocourt se compose de l'Horizon blanchi de Momalle, surmontant le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, à Romont. D'un point de vue pédologique, le premier est interprété comme un horizon éluvié, appauvri en matière organique, en argile et en oxydes. Ces substances ont alors migré dans les niveaux sous-jacents, constitués notamment par le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, qui correspond à un horizon illuvié (Vancampenhout *et al.*, 2013b ; Haesaerts *et al.*, 2016). Les mesures géochimiques réalisées sur le loëss de Romont traduisent bien cette disparité. Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$  atteignent les valeurs les plus faibles des horizons investigués, dans l'Horizon blanchi de Momalle (Figure 6-3 (a), Figure 6-3 (b)). Elles augmentent ensuite rapidement dans le Sol de Villers-Saint-Ghislain B. La matière organique suit une tendance similaire. Elle atteint des valeurs minimales de 0,58 à 0,70 % dans l'Horizon blanchi de Momalle, alors que les valeurs rencontrées dans le Sol de Villers-Saint-Ghislain B augmentent jusqu'à 0,94 %. La proportion de particules argileuses mesurée par sédimentométrie appuie également les résultats sur la géochimie. La proportion de particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$  est en effet la plus faible au sein de l'Horizon blanchi de Momalle (< 10 %), alors qu'elle atteint plus du double (> 20 %) quelques décimètres plus bas, dans le Sol de Villers-Saint-Ghislain B (Figure 5-20 (a)). Les tendances observées par Vancampenhout *et al.*, (2008, 2013a) entre l'Horizon blanchi de Momalle et l'horizon B sous-jacent, sur le site de Veldwezelt-Hezerwater, sont en accord avec les données géochimiques et granulométriques obtenues à Romont. Les observations issues des lames minces confirment l'ensemble de ces résultats. Une matrice argilo-organique est présente dans l'espace intergranulaire qui compose le Sol de Villers-Saint-Ghislain B (Figure 6-9 (n)). Cette même matrice est également présente, mais en nettement plus petite quantité, au sein de l'Horizon blanchi de Momalle (Figure 6-9 (k)). Par ailleurs, les lames minces relatives au Sol de Villers-Saint-Ghislain B font apparaître la présence de nodules de Fe-Mn de taille localement plurimillimétrique, ainsi que de nombreuses concentrations de matière argilo-organique en fragments de taille parfois supérieure à 100  $\mu\text{m}$ , et sur le pourtour des biogaleries. Certaines de ces caractéristiques représentent des évidences d'illuviation (Van Vliet-Lanoë, 1998 ; Haesaerts *et al.*, 1999).

Le sommet du Pédocomplexe de Rocourt est également caractérisé par des sols relativement peu déformables, avec des valeurs de l'indice de compression les plus faibles mesurées sur la séquence loëssique de Romont (Figure 5-29). L'Horizon blanchi de Momalle se marque par une faible teneur en eau (15,5 %) et un indice des vides également relativement peu élevé (0,70). L'analyse de la résistance au cône a montré que le CPT est capable de mettre en évidence la présence de l'Horizon blanchi de Momalle. La transition entre ce dernier et le

Complexe Humifère de Remicourt se marque par une augmentation brutale de la résistance à la pointe, pouvant atteindre des valeurs inhabituelles dans un matériau limoneux, supérieures à 20 MPa. Ceci fait de l'Horizon blanchi de Momalle, le marqueur stratigraphique le plus aisément identifiable de l'ensemble de la séquence lœssique. Dans le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, la résistance au cône est variable et atteint des valeurs plus faibles que dans l'Horizon blanchi de Momalle. Les valeurs de résistance mesurées au moyen du pénétromètre de poche suivent une tendance comparable à celle de la résistance au cône du CPT.

Les résultats issus de la porosimétrie par intrusion de mercure sont particulièrement intéressants. Ils révèlent que le sommet du Pédocomplexe de Rocourt est caractérisé par une distribution de la taille des pores différente de l'ensemble des autres échantillons analysés par cette méthode. Leur distribution est en effet plus aplatie, et légèrement bimodale (Figure 6-8 (c)). Le volume poreux total apparent de l'Horizon blanchi de Momalle est le plus faible mesuré, alors que celui caractérisant le Sol de Villers-Saint-Ghislain B est proche de la moyenne mesurée pour l'ensemble des échantillons (Figure 6-6 (a)). L'Horizon blanchi de Momalle est également caractérisé par la plus faible proportion en macropores (diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ ) (Tableau 6-2).

Un sol limoneux soumis à un niveau de compaction croissant se marque par une diminution de la porosité totale, par une diminution de la taille moyenne des pores et par une diminution de volume des pores les plus grands (Lipiec *et al.*, 2012). La densification d'un matériau limoneux effondrable à la suite de sa mise en saturation, aboutit à des conclusions similaires, à savoir une diminution des macropores et des mésopores (Delage *et al.*, 2005). Comme l'indique le Tableau 6-2, ces différentes caractéristiques se retrouvent dans l'Horizon blanchi de Momalle. Ces observations semblent dès lors appuyer la thèse d'une compaction de cet horizon. Cependant, la formation de l'Horizon blanchi de Momalle est encore débattue dans la littérature scientifique. Plusieurs modèles font intervenir la formation saisonnière de lentilles de glace au sein du sommet du Pédocomplexe de Rocourt (Mestdagh, 2005 ; Vancampenhout *et al.*, 2013b). Le matériau situé entre ces lentilles de glace pourrait dès lors avoir été compacté suite à la croissance des lentilles, comme le suggère le modèle proposé par Vancampenhout *et al.* (2013b) pour l'Horizon blanchi de Momalle, ou encore par Van Vliet-Lanoë et Langhor (1981) pour des fragipans.

La valeur médiane de la taille des pores, obtenue pour le Sol de Villers-Saint-Ghislain B, est légèrement plus faible que celle mesurée dans l'Horizon blanchi de Momalle (Tableau 6-2), et ce malgré une plus grande proportion de macropores. L'illuviation de particules argileuses peut être responsable de la diminution de la taille moyenne des pores dans les horizons Bt, comme cela a déjà été observé pour des sols holocènes de la vallée de la Saône en France, en comparant des horizons A2 et B2t (Chretien *et al.*, 1987).

## 6. Conclusions intermédiaires

Sur base de la résistance au cône, les essais de pénétration statique ont mis en évidence la présence de quatre marqueurs stratigraphiques (chapitre 4) : la limite de décarbonatation superficielle, la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek, le Complexe Humifère de Remicourt, et l'Horizon blanchi de Momalle (situé au sommet du Pédocomplexe de Rocourt). C'est donc en toute logique que l'étude à l'échelle microscopique s'est penchée plus particulièrement sur ces différents marqueurs stratigraphiques.

L'analyse à l'échelle microscopique se révèle particulièrement complémentaire aux études réalisées à des échelles plus grandes, telles que l'échelle macroscopique (chapitre 5) et l'échelle locale (chapitre 4). Parmi les essais réalisés à l'échelle microscopique, les observations des lames minces au microscope polarisant, améliorent significativement la compréhension de la variation du comportement mécanique observées à des échelles plus grandes. La porosimétrie par intrusion de mercure montre, quant à elle, des résultats intéressants mais parfois incohérents face à ceux issus d'autres analyses réalisées sur un même échantillon ou issues du même horizon stratigraphique. Ces résultats ont parfois été mis en cause en postulant un manque de représentativité de l'échantillon utilisé pour la porosimétrie, par rapport à l'horizon considéré dans son ensemble. En effet, les mesures par porosimétrie ont été réalisées au départ d'échantillons dont le volume est inférieur à 0,5 cm<sup>3</sup>. Il s'avère que ce volume ne semble pas suffisant pour être représentatif d'un horizon stratigraphique considéré dans son ensemble. Les résultats issus de la porosimétrie par intrusion de mercure doivent donc être considérés avec prudence. Une façon de valider les mesures obtenues par cette méthode aurait été de dupliquer chaque échantillon investigué. La porosimétrie par intrusion de mercure reste toutefois une méthode d'investigation onéreuse.

La limite de décarbonatation superficielle est caractérisée par une augmentation légère et rapide de la résistance au cône du CPT, de 1 à 2 MPa. Cette augmentation de résistance mécanique est reliée à un effet couplé faisant intervenir une diminution de la fraction de particules argileuses, une diminution de la macroporosité et probablement du volume total des vides, et une augmentation de la densité sèche du matériau situé sous la limite de décarbonatation. Il n'a pas pu être démontré si les carbonates présents sous le marqueur stratigraphique, jouent un rôle de ciment entre les grains des phases silicatées. L'emplacement de la couche caractérisée par des valeurs de résistivité électrique légèrement plus élevées que dans le reste de la séquence lœssique de Romont, est corrélé à la présence des lœss carbonatés. Ces derniers présentent en outre des valeurs de teneur en eau légèrement plus faibles que les couches environnantes, ce qui renforce la corrélation stratigraphique proposée.

La transition entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous jacents se marque pour une augmentation de la résistance au cône similaire à celle caractérisant le passage de la limite de décarbonatation. Cette transition bénéficie de moins de données issues des échelles macroscopique et microscopique. La variation du comportement mécanique pourrait être liée à une diminution de la quantité de matière organique et argileuse, et surtout, à une diminution de la porosité.

Le Complexe Humifère de Remicourt est un horizon caractérisé par une teneur en matière organique relativement élevée par rapport aux autres horizons de la séquence lœssique. Il s'identifie également par de faibles valeurs de la résistance au cône du CPT, habituellement inférieures à 3 MPa. Toutefois, le contenu en matière organique, de l'ordre de 1,3 % en masse, est trop faible pour expliquer, à lui seul, les caractéristiques mécaniques moindres observées in situ. Ce sont plutôt les valeurs élevées de porosité, en lien avec une densité sèche plus faible que dans les horizons environnants, qui pourraient constituer les caractéristiques principales pour expliquer les plus faibles valeurs de résistance mécanique.

Le Complexe Humifère de Remicourt est également un horizon parmi les plus déformables des échantillons testés à l'œdomètre.

L'Horizon blanchi de Momalle constitue le marqueur stratigraphique le plus aisé à identifier sur base de la résistance au cône du CPT. Celle-ci augmente brutalement pour atteindre localement des valeurs supérieures à 20 MPa. De telles valeurs de résistance mécanique sont expliquées par une diminution de la porosité, ainsi que du volume total apparent des macropores (diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ ). L'Horizon blanchi de Momalle constitue un horizon parmi les moins déformables des échantillons testés par l'essai œdométrique. Par ailleurs, il est caractérisé par des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  et en matière organique, ainsi que des proportions en particules argileuses particulièrement faibles. Ceci traduit le caractère éluvié de cet horizon. À l'inverse, le sommet du Sol de Villers-Saint-Ghislain B sous-jacent, se voit enrichi en ces différents composants, en accord avec l'interprétation pédologique d'un sol illuvié.



**Chapitre 7 :**  
**Conclusions générales**  
**et perspectives**





## 1. Conclusions générales

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse se base sur une approche originale couplant les aspects géologiques aux caractéristiques mécaniques du limon éolien. L'analyse multiéchelle apporte une vision complète de la couche limoneuse investiguée, depuis une vision à l'échelle continentale, jusqu'à une analyse poussée des caractéristiques à l'échelle microscopique, en passant par les échelles régionale, locale (site ou affleurement), et macroscopique (échantillon). L'essai de pénétration statique (CPT) est au cœur de la démarche expérimentale présentée. La thèse se subdivise en deux volets principaux. L'un concerne une analyse stratigraphique détaillée de la séquence lœssique belge, réalisée au moyen de méthodes expérimentales complémentaires in situ et en laboratoire. L'autre consiste à analyser de manière plus approfondie les caractéristiques mécaniques du limon issu du site de Romont (Ében-Émael, Belgique). L'ensemble des résultats principaux sont synthétisés dans cette section.

### 1.1. Analyse stratigraphique

En Belgique, les dépôts lœssiques se localisent essentiellement en Moyenne Belgique, où ils peuvent atteindre localement plus de 20 m d'épaisseur. La coupe géologique continue sur près de 18 km, réalisée le long du tronçon de la ligne TGV, entre Liège et Waremme, souligne également la très grande variabilité de l'épaisseur de ces dépôts. Malgré cette apparente variabilité, de nombreuses corrélations stratigraphiques ont été établies, entre des affleurements parfois distants de plusieurs milliers de kilomètres, depuis le Nord de la France, jusqu'en Sibérie. Cette étude analyse plus spécifiquement les horizons mis en place durant le Pléistocène supérieur, correspondant à l'Éemien (dernier interglaciaire) et au Weichsélien (dernière période glaciaire). Les horizons relatifs à ces périodes constituent en effet, la majorité de l'épaisseur des dépôts lœssiques belges.

L'étude réalisée à l'échelle locale, c'est-à-dire du site ou de l'affleurement, révèle que l'essai de pénétration statique permet d'établir des tendances communes aux trois sites hesbignons étudiés (Remicourt, Romont et Rocourt). En effet, quatre marqueurs stratigraphiques ont été définis au sein de la séquence lœssique de Hesbaye, sur base de la variation de la résistance au cône en fonction de la profondeur : la limite de décarbonatation superficielle, la transition entre la base de l'Horizon à Langues de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous-jacents, le Complexe Humifère de Remicourt et l'Horizon blanchi de Momalle. La position stratigraphique précise de ces marqueurs stratigraphiques est confirmée par les mesures réalisées sur les affleurements présents, au moyen du pénétromètre de poche. Cependant, l'étude du site de Rocourt montre que la solifluxion pourrait avoir comme conséquence, une modification des caractéristiques mécaniques intrinsèques de certains horizons. Au droit de ces derniers, les tendances observées pour la résistance au cône du CPT diffèrent de celles décrites sur les deux autres sites étudiés.

Les caractéristiques mécaniques, géochimiques et microstructurales principales, relatives aux différents marqueurs stratigraphiques identifiés, sont développées ci-après :

- la limite de décarbonatation superficielle se caractérise par une légère et rapide augmentation de la résistance au cône, de l'ordre de 1 à 2 MPa. Elle pourrait être engendrée par une augmentation de la densité sèche, en lien avec une diminution de la porosité sous l'horizon de décarbonatation. La fraction de particules argileuses est également plus faible sous l'horizon. D'un point de vue géochimique, la limite de décarbonatation se marque par la présence de phases minéralogiques carbonatées

(essentiellement calcite et dolomite). Il n'a toutefois pas pu être démontré au moyen des essais réalisés, si les carbonates jouent un rôle de ciment entre les grains des phases silicatées ;

- la transition entre l'Horizon à Langues de Nagelbeek et les lœss hesbayens sous-jacents se marque par une augmentation de la résistance au cône comparable à celle caractérisant le passage de la limite de décarbonatation. Cette transition bénéficie de moins de données issues des études aux échelles macroscopique et microscopique. La variation de la résistance mécanique observée pourrait être liée à une diminution de la porosité, et dans une moindre mesure, à une diminution de la quantité de matière organique et argileuse ;
- le Complexe Humifère de Remicourt s'identifie aisément par des valeurs de résistance au cône relativement faibles, habituellement inférieures à 3 MPa. Le contenu en matière organique, de l'ordre de 1,3 % en masse, semble trop faible pour expliquer à lui seul les caractéristiques mécaniques moindres mesurées in situ. Les valeurs élevées de porosité apparente, en lien avec une densité sèche plus faible, pourraient quant à elles, constituer les caractéristiques principales à l'origine des faibles valeurs de résistance mécanique. Le Complexe Humifère de Remicourt est également un horizon parmi les plus déformables de la séquence lœssique ;
- l'Horizon blanchi de Momalle constitue le marqueur stratigraphique le plus remarquable, alors qu'il ne représente qu'une dizaine de centimètres de puissance. Il se caractérise par une augmentation brutale de la résistance au cône, atteignant des valeurs particulièrement élevées, localement supérieures à 20 MPa. Les analyses réalisées aux échelles macroscopique et microscopique indiquent une porosité totale apparente particulièrement faible, ainsi qu'une densité sèche plus élevée que la moyenne des échantillons investigués. L'Horizon blanchi de Momalle constitue également un horizon parmi les moins déformables de la séquence lœssique. D'un point de vue pédologique, l'horizon est interprété comme étant éluvié. Ceci se traduit notamment par des teneurs en  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , MgO et en matière organique, ainsi que des proportions en particules argileuses, particulièrement faibles, comme cela a été observé pour le site de Romont.

### 1.2. Analyse comparative des caractéristiques géomécaniques

La démarche générale qui est adoptée dans cette partie, est une analyse comparative, soit entre les données issues du CPT lui-même, soit entre les résultats acquis par le CPT d'une part, et les essais en laboratoire d'autre part. Les principaux résultats de cette analyse sont développés ci-après :

- l'analyse comparative des résultats obtenus par les différents types de pointe utilisés (M1, M2 et E) par le CPT, montre que la résistance au cône est peu influencée par le choix du type de pointe, dans un matériau limoneux. Ces résultats sont en accord avec d'autres études précédentes réalisées sur un matériau comparable. La résistance du frottement latéral local issue de la pointe électrique et de la pointe mécanique M2, semble par contre plus complexe à analyser. Les mesures enregistrées par la pointe M2 ne semblent pas cohérentes avec les valeurs attendues pour un tel matériau. Le déplacement du manchon de frottement de la pointe M2 ne serait plus suffisant au-delà d'une certaine profondeur, pour mobiliser l'entièreté de la résistance au frottement ;
- les diagrammes de classification des sols basés sur les données du CPT confirment la relative hétérogénéité du matériau limoneux étudié. Les points de mesures se répartissent entre un pôle argilo-limoneux d'une part, représenté notamment par le Sol de Villers-Saint-

Ghislain B, et un pôle sablo-limoneux d'autre part, où se rencontre l'Horizon blanchi de Momalle. Ce résultat est en accord avec l'analyse granulométrique, et reflète la complémentarité qui caractérise les deux horizons d'un point de vue pédologique, par le processus d'éluviation/illuviation ;

- la relation empirique reliant le module œdométrique à la résistance au cône du CPT, au moyen d'un coefficient  $\alpha$  dépendant du type de sol, a été vérifiée. La méthode proposée par Sanglerat (calcul du module œdométrique tangent au début de la partie plastique de la courbe œdométrique) est en accord avec les valeurs de  $\alpha$  attendues pour un matériau limoneux. Par contre, la valeur moyenne de  $\alpha$ , obtenues par la méthode préconisée par l'Eurocode 7 pour déterminer le module œdométrique sécant (entre deux niveaux de chargement successifs, souvent considérés dans la partie plastique linéaire de la courbe œdométrique), est supérieure aux valeurs renseignées par l'Eurocode 7, pour un matériau similaire ;
- une approche semi-empirique basée sur la théorie du calcul de la capacité portante des fondations a été développée pour estimer simultanément la cohésion et l'angle de frottement apparents moyens du limon rencontré sur le site de Romont. Cette approche est calibrée sur les résultats des essais triaxiaux UU et de cisaillement direct UU. In fine, les seules données nécessaires sont la tendance moyenne de la résistance au cône du CPT en fonction de la profondeur, ainsi que le poids volumique moyen du limon. Les résultats des différents modèles théoriques testés, aboutissent à des valeurs de  $c_u$  et  $\phi_u$  cohérentes avec celles mesurées expérimentalement.

## 2. Perspectives

Les résultats émanant de cette thèse aboutissent à plusieurs perspectives concrètes. L'une concerne une application particulièrement intéressante et originale, en lien avec la prospection archéologique. D'autres se rapportent à des applications dans le domaine de la géotechnique. Chacune de ces applications est développée ci-après.

### 2.1. Archéologie préventive

Les sites archéologiques bien documentés du Paléolithique moyen sont peu fréquents en Belgique, où seulement onze sites découverts sont en lien avec un contexte lœssique. Les sites archéologiques localisés en contexte lœssique nécessitent la présence d'un affleurement accessible, qui peut être étudié et décrit. Ces affleurements sont malheureusement souvent temporaires et/ou pas assez profonds par rapport aux niveaux correspondant au Paléolithique moyen, car ils sont en lien avec des projets d'aménagement du territoire ou avec l'industrie extractive. Une alternative souvent employée par les archéologues, consiste à investiguer la séquence lœssique au moyen de forages ou d'une pelle mécanique. Cela peut cependant s'avérer assez coûteux lorsque la couche de lœss présente des épaisseurs importantes.

L'interprétation stratigraphique issue de l'analyse de la résistance au cône du CPT montre que les horizons stratigraphiques les plus aisés à identifier correspondent au Complexe Humifère de Remicourt, suivi par l'Horizon blanchi de Momalle et du Sol de Villers-Saint-Ghislain B. Ces trois horizons ont par ailleurs délivrés de nombreux artefacts lithiques provenant de 9 des 11 sites belges issus d'un contexte lœssique. Par conséquent, la mesure de la résistance au cône peut être considérée comme un proxy intéressant dans le cadre de campagne de fouilles archéologiques. Elle permet en effet d'identifier l'occurrence et la

profondeur de ces horizons au sein de la séquence lœssique. Le CPT peut aussi élargir les possibilités d'investigations archéologiques puisqu'il semble en mesure de détecter ces horizons en l'absence d'un quelconque affleurement observable. Il s'agit d'une méthode capable d'investiguer de manière continue l'entièreté de la couche de lœss, même si celle-ci dépasse les 20 m d'épaisseur. La réalisation d'un CPT est également rapide, aisément reproductible, et habituellement moins coûteuse qu'un forage. Cependant, la méthode ne permet aucun prélèvement de sol. C'est la raison pour laquelle la réalisation d'un forage, complémentairement aux CPT permettrait, le cas échéant, de valider visuellement l'interprétation stratigraphique.

Une campagne géotechnique réalisée plus spécifiquement sur un site au moyen de CPT, est également en mesure d'apporter des informations sur la géomorphologie tridimensionnelle des marqueurs stratigraphiques identifiés. La reconstitution géomorphologique de certains horizons peut dès lors s'avérer particulièrement utile dans l'évaluation du potentiel archéologique d'un site.

Les marqueurs stratigraphiques ont, jusqu'ici, été définis à partir de l'étude de trois sites localisés en Hesbaye. Il serait dès lors intéressant de vérifier si ces corrélations stratigraphiques, établies sur base de la résistance au cône du CPT, sont toujours valables dans d'autres régions de Moyenne Belgique, et même du Nord de la France. En effet, la séquence lœssique correspondant aux alentours du Complexe Humifère de Remicourt et du sommet du Pédocomplexe de Rocourt, est assez comparable entre la Moyenne Belgique et le Nord de la France, où ces horizons font partie du Sol de Saint-Sauflieu. Ce dernier constitue en outre l'horizon à l'origine de la plupart des sites archéologiques en lien avec la fin du Paléolithique moyen dans le Nord de la France (Locht *et al.*, 2016).

### 2.2. Géotechnique

D'un point de vue géomécanique, le lœss est souvent considéré comme un matériau homogène. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles peu d'études mentionnent la position stratigraphique, en termes d'horizons lœssiques, des échantillons prélevés au sein d'une séquence lœssique donnée. Or, les résultats illustrés tout au long de cette thèse, ont montré que ce matériau présente en réalité une certaine variabilité de ses caractéristiques physiques et mécaniques, en fonction de l'horizon stratigraphique étudié. C'est notamment les cas des caractéristiques de résistance mécanique et de déformabilité. Dans le cadre d'études expérimentales réalisées au départ de matériaux lœssiques prélevés *in situ*, il est dès lors important d'être conscient de cette hétérogénéité. La campagne d'échantillonnage peut, le cas échéant, être adaptée afin de prélever les horizons présentant les caractéristiques physiques et mécaniques les plus proches de celles recherchées. Il n'est toutefois guère aisé, ou même impossible en l'absence d'affleurement, d'établir un schéma stratigraphique détaillé d'une séquence lœssique. Cela sort d'ailleurs du cadre de la plupart des études géomécaniques. Si toutefois, dans le cadre de telles études, une attention doit être portée sur l'analyse d'horizons en particulier, le site de Romont peut être envisagé comme site d'échantillonnage. L'étude réalisée sur ce site donne en effet un bon aperçu des principales caractéristiques physiques et mécaniques relatives aux différents horizons de la séquence lœssique. Le site de Romont pourrait dès lors servir de référence pour l'échantillonnage de matériau en contexte lœssique, en permettant d'orienter les prélèvements vers les horizons stratigraphiques souhaités. En outre, la paroi de Romont s'est récemment inscrite comme le nouveau stratotype des lœss de Moyenne Belgique.

Les sites localisés en contexte lœssique, et bénéficiant d’une connaissance détaillée de la stratigraphie de la séquence sont peu fréquents. Lorsque les caractéristiques géomécaniques sont considérées en lien avec la stratigraphie de la séquence, cela apporte une couche supplémentaire et complémentaire à la caractérisation des lœss. Grâce au couplage de ces deux approches, le site de Romont constitue un endroit unique où il est désormais envisageable de tester ou de calibrer, dans un milieu naturel limoneux, divers capteurs ou divers essais en lien avec les propriétés géomécaniques, géochimiques ou structurales du matériau, développées dans la thèse.

La caractérisation détaillée du limon éolien, réalisée dans la cadre de cette thèse, apporte de nombreuses propriétés moyennes en lien avec les caractéristiques géomécaniques, physiques et géochimiques du matériau. Elle permet également d’appréhender l’hétérogénéité du matériau. Ces valeurs pourront être utilisées dans d’autres études en lien avec un matériau lœssique. Les tableaux suivants reprennent les valeurs moyennes (avec écarts-types) des principales variables analysées, issues du site de Romont (Tableaux 7-1 à 7-4).

Tableau 7-1 : Caractéristiques physiques moyennes (avec écarts-types) du lœss issu du site de Romont.

Caractéristiques physiques										
	W	$\gamma_h$	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$e_i$	n	$S_r$	$w_L$	$w_P$	$I_p$
	%	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	-	%	%	%	%	%
Moy.	18,6	18,3	15,5	27,2	0,76	43,0	67,8	29,1	21,7	7,4
E.-T.	3,0	0,7	0,6	0,3	0,08	2,6	9,9	1,8	1,7	2,3
n	14	14	14	11	14	14	14	11	11	11

Tableau 7-2 : Caractéristiques hydromécaniques et de déformabilité moyennes (avec écarts-types) du lœss issu du site de Romont.

	Caract. hydroméca.		Caractéristiques de déformabilité				
	$c_v$ 10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s	k 10 <sup>-8</sup> m/s	$C_s$ 10 <sup>-2</sup>	$C_c$ 10 <sup>-2</sup>	A -	C -	$E_{oed, sec}$ MPa
Moy.	29,3	6,9	1,2	13,6	404	35	9,6
E.-T.	14,9	6,3	0,7	6,0	142	16	5,1
n	14	11	13	13	13	13	14

Tableau 7-3 : Caractéristiques de résistance mécanique moyennes (avec écarts-types) du læss issu du site de Romont.

Caractéristiques de résistance mécanique						
	$q_c^a$ MPa	$f_s^a$ MPa	$c_{u, \text{triax}}^b$ kPa	$\phi_{u, \text{triax}}^b$ °	$c_{u, \text{cis}}^b$ kPa	$\phi_{u, \text{cis}}^b$ °
Moy.	3,98	0,111	40,7	22,8	22,2	24,4
E.-T.	1,59	0,045	16,5	6,4	23,2	4,6
n	9	9	10	10	9	9

<sup>a</sup> calculé sur une profondeur de 10 m, au moyen des CPTE

<sup>b</sup> calculé à partir d'essais triaxiaux ou de cisaillement direct UU

Tableau 7-4 : Caractéristiques géochimiques moyennes (avec écarts-types) du læss issu du site de Romont.

Caractéristiques géochimiques												
	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	MO <sub>LOI</sub> %	C <sub>org</sub> %
Moy.	81,5	0,8	9,0	3,5	0,1	0,7	1,8	0,6	2,0	0,1	0,76	0,31
E.-T.	4,4	0,1	1,7	1,0	< 0,1	0,4	2,5	0,2	0,2	< 0,1	0,24	0,22
n	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	5







## Références bibliographiques

- AHMADI, M.M, BYRNE, P.M. & CAMPANELLA, R.G., 2005. Cone tip resistance in sand: modeling, verification, and applications. *Canadian Geotechnical Journal*, **42**, 977-993.
- AHMADI, M.M. & ROBERTSON, P.K., 2005. Thin-layer effects on the CPT  $q_c$  measurement. *Canadian Geotechnical Journal*, **42**, 1302-1317.
- AHMED, S., LOVELL, C.W. & DIAMOND, S., 1974. Pore sizes and strength of compacted clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **100**, 407-425.
- AMOROSI, A., BRUNO, L., CAMPO, B. & MORELLI, A., 2015. The value of pocket penetration tests for the high-resolution palaeosol stratigraphy of late Quaternary deposits. *Geological Journal*, **20**, 670-682.
- ANDERSEN, K.K., SVENSSON, A., JOHNSEN, S.J., RASMUSSEN, S.O., BIGLER, M., RÖTHLISBERGER, R., RUTH, U., SIGGAARD-ANDERSEN, M.J., STEFFENSEN, J.P., DAHL-JENSEN, D., VINTHER, B.M. & CLAUSEN, H.B., 2006. The Greenland ice core chronology 2005, 15-42 ka. Part I: Constructing the time scale. *Quaternary Science Reviews*, **25**, 3246-3257.
- ANTOINE, P., 2002. Les loëss en France et dans le Nord-Ouest européen. *Revue française de géotechnique*, **99**, 3-21.
- ANTOINE, P., AUGUSTE, P., BAHAIN, J.J., COUDRET, P., DEPAEPE, P., FAGNART, J.P., FALGUÈRES, N., FONTUGNE, M., FRECHEN, M., HATTÉ, C., LAMOTTE, A., LAURENT, M., LIMONDIN-LOZOUET, N., LOCHT, J.L., MERCIER, N., MOIGNE, A.M., MUNAUT, A.V., PONEL, P. & ROUSSEAU, D.D., 2003. Paléoenvironnements pléistocènes et peuplements paléolithiques dans le bassin de la Somme (nord de la France). *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, **100**, 5-28.
- ANTOINE, P., CATT, J., LAUTRIDOU, J.P. & SOMMÉ, J., 2003. The loess and coversands of northern France and southern England. *Journal of Quaternary Science*, **18**, 309-318.
- ANTOINE, P., COUTARD, S., GUERIN, G., DESCHODT, L., GOVAL, E., LOCHT, J.L. & PARIS, C., 2016. Upper Pleistocene loess-palaeosol records from Northern France in the European context: environmental background and dating of the Middle Palaeolithic. *Quaternary International*, **411**, 4-24.
- ANTOINE, P., GOVAL, E., JAMET, G., COUTARD, S., MOINE, O., HÉRISSON, D., AUGUSTE, P., GUÉRIN, G., LAGROIX, F., SCHMIDT, E., ROBERT, V., DEBENHAM, N., MESZNER, S., BAHAIN, J.J., 2014. Les séquences loessiques pléistocène supérieur d'Havrincourt (Pas-de-Calais, France) : stratigraphie, paléoenvironnements, géochronologie et occupations paléolithiques. *Quaternaire*, **25**, 321-368.
- ANTOINE, P., MARCHIOL, A., BROCANDEL, M. & GROS, Y., 2005. Découverte de structures périglaciaires (sand-wedges et composite-wedges) sur le site de stockage de déchets radioactifs de l'Aube (France). *Comptes Rendus Géosciences*, **337**, 1462-1473.
- ANTOINE, P., MUNAUT, A.V. & SOMMÉ, J., 1994. Réponse des environnements à l'évolution climatique du Début Glaciaire weichsélien: données de la France du Nord-Ouest. *Quaternaire*, **5**, 151-156.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTOINE, P., ROUSSEAU, D.D., DEGEAI, J.P., MOINE, O., LAGROIX, F., KREUTZER, S., FUCHS, M., HATTÉ, C., GAUTHIER, C., SVOBODA, J. & LISÁ, L., 2013. High-resolution record of the environmental response to climatic variations during the Last Interglacial-Glacial cycle in Central Europe: the loess-palaeosol sequence of Dolní Věstonice (Czech Republic). *Quaternary Science Reviews*, **67**, 17-38.
- ANTOINE, P., ROUSSEAU, D.D., HATTÉ, C., ZÖLLER, L., LANG, A., FONTUGNE, M. & MOINE, O., 2002. Événements éoliens rapides en contexte loessique: l'exemple de la séquence du Pléniglaciaire supérieur weichselien de Nussloch (Vallée du Rhin-Allemagne). *Quaternaire*, **13**, 199-208.
- ANTOINE, P., ROUSSEAU, D.D., LAUTRIDOU, J.P. & HATTÉ, C., 1999. Last Interglacial-Glacial climatic cycle in loess-palaeosol successions of North-Western France. *Boreas*, **28**, 551-563.
- ANTOINE, P., ROUSSEAU, D.D., MOINE, O., KUNESCH, S., HATTÉ, C., LANG, A., TISSOUX, H. & ZÖLLER, L., 2009. Rapid and cyclic aeolian deposition during the Last Glacial in European loess: a high-resolution record from Nussloch, Germany. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2955-2973.
- ANTOINE, P., ROUSSEAU, D.D., ZÖLLER, L., LANG, A., MUNAUT, A.V., HATTÉ, C. & FONTUGNE, M., 2001. High resolution record of the last Interglacial-glacial cycle in the Nussloch loess-palaeosol sequences, Upper Rhine Area Germany. *Quaternary International*, **76-77**, 211-229.
- ASCE 20-96, 1997. Standard guidelines for the design and installation of piles foundations. *ASCE Standard*, United-States.
- ASSALLAY, A.M., ROGERS, C.D.F. & SMALLEY, I.J., 1997. Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits. *Engineering Geology*, **48**, 101-115.
- ASTM D2487-06, 2006. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Classification System). *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United-States, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM D3441-05, 2005. Standard test method for mechanical cone penetration tests of soil (Withdrawn 2014), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United-States, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM D4404-10, 2010. Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United-States, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM D5778-12, 2012. Standard test method for electric friction and piezocone penetration testing of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United-States, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- AUFFRET, J.P., HORN, R., LARSONNEUR, C., CURRY, D. & SMITH, A.J., 1982. *La Manche orientale, carte des paléovallées et des bancs sableux*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 2 cartes et 1 notice explicative de 16 p.
- BACHELIER, M. & PAREZ, L., 1965. Contribution à l'étude de la compressibilité des sols à l'aide du pénétromètre à cône. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montréal, Canada, **2**, 3-10
- BAIZE, D., 2004. Petit lexique de pédologie. Institut national de la recherche agronomique, Paris, France, 271 p.

- BALIGH, M.M., 1975. *Theory of deep static cone penetration resistance*. Report No. R75-56, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 133 p.
- BARENTSEN, P., 1936. Short description of a field testing method with cone-shaped sounding apparatus. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, **1**, 7-10.
- BASTIN, B., 1969. Premiers résultats de l'analyse pollinique des lœss en Belgique. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, **18**, 3-11.
- BASTIN, B., 1971. Recherche sur l'évolution du peuplement végétal en Belgique durant la glaciation de Würm. *Acta Geographica Lovaniensia*, **9**, 136 p.
- BATES, M.R., BATES, C.R. & WHITTAKER, J.E., 2007. Mixed method approaches to the investigation and mapping of buried Quaternary deposits: examples from southern England. *Archaeological Prospection*, **14**, 104-129.
- BATES, M.R. & STAFFORD, E., 2013. *Thames Holocene: A geoarchaeological approach to the investigation of the river floodplain for High Speed 1, 1994–2003*. Wessex Archaeology, Salisbury, 208 p.
- BEGEMANN, H.K.S.P., 1953. Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zürich, **1**, 213-217.
- BEGEMANN, H.K.S.P., 1965. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, **1**, 17-20.
- BEGEMANN, H.K.S.P., JOUSTRA, K., TE KAMP, W.G.B., KRAJICEK, P.V.F.S., HEIJNEN, W.J. & VAN WEELE, A.F., 1982. Cone Penetration Testing. *Civiele en bouwkundige techniek*, **3**, 16-59.
- BOSQUET, D., JARDÓN GINER, P. & JADIN, I., 2004. L'industrie lithique du site paléolithique moyen de Remicourt « En Bia Flo » (province de Liège, Belgique) : technologie, tracéologie et analyse spatiale. *British Archaeological Reports, International Series*, **1239**, 257-274.
- BOSQUET, D., HAESAERTS, P., DAMBLON, F., JARDÓN GINER, P. & RYSSAERT, C., 2011. Le gisement paléolithique de Remicourt-En Bia Flo I. In : TOUSSAINT, M., DI MODICA, K. & PIRSON, S. (Eds). *Le Paléolithique moyen en Belgique*. Mélanges Marguerite Ulrix-Closset. Bulletin de la Société royale belge d'Études géologiques et archéologiques « Les Chercheurs de la Wallonie » (hors-série n°4) et Etudes et Recherches archéologiques de l'Université de Liège (n°128), 375-384.
- BOSQUET, D., HAESAERTS, P., MESTDAGH, H., PREUD'HOMME, D. & JARDÓN GINER, P., 1998. Le site paléolithique moyen de Remicourt - en Bia Flo I. Résultat des fouilles. *Notae Praehistoricae*, **18**, 13-23.
- BOULVAIN, F. & PINGOT, J.L., 2015. *Genèse du sous-sol de la Wallonie*. 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée. Classe des Sciences, Académie royale de Belgique, 208 p.
- BRINCH HANSEN, J., 1951. Simple statical computation of permissible pile loads. *Christiani and Nielsen Post*, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, **13**, 14-15.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRINCH HANSEN, J., 1970. A revised and extended formula for bearing capacity. *Geoteknisk Institut – The Danish Geotechnical Institute*, **28**, 5-11.
- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G., 1980. *Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification*. Mineralogical Society, London, 495 p.
- BRINGMANS, P.M.M.A., 2006. Multiple Middle Palaeolithic occupations in a loess soil sequence at Veldwezelt-hezerwater, Limburg, Belgium, *Faculteit Letteren*. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 418 p.
- BROADBENT, F.E., 1953. The soil organic fraction. *Advances in Agronomy*, **5**, 153-183.
- BRUCHON, J.F., 2014. *Analyse par microtomographie aux rayons X de l'effondrement capillaire dans les matériaux granulaires*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Paris, France, 235 p.
- BRUZZI, D. & BATTAGLIO, M., 1987. Pore pressure measurement during cone penetration tests. *Experimental Institute for Models and Structures Report*, **229**, Bergamo, Italy, 125 p.
- BUISMAN, A.S.K., 1940. *Grondmechanica*. Waltman, Delft, The Netherlands, 190 p.
- BUSTAMANTE, M. & GIANESELLI, L., 1982. Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II*, Amsterdam, May 24-27, A.A. Balkema, **2**, 493-500.
- CSTC, 2016. *Directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique selon la NBN EN 1997-1 ANB. Partie 1 : Dimensionnement géotechnique à l'état limite ultime (ELU) de pieux sous charge axiale à partir d'essais de pénétration statique (CPT)*. Bruxelles, Rapport n°19, 43 p.
- CAI, G.H., DU, Y.J., LIU, S.Y. & SINGH, D.N., 2015. Physical properties, electrical resistivity, and strength characteristics of carbonated silty soil admixed with reactive magnesia. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**, 1699-1713.
- CALABRESE, L., DI COCCO, I. & CENTINEO, M.C., 2010. Hydrographic evolution and palaeogeographic reconstruction of the southeastern Po Plain (Italy) during the last 4,000 years: an example of integration between stratigraphy and archaeology. *Geology of the Adriatic Area. GeoActa special publication*, **3**, 103-108.
- CAMPANELLA, R.G., GILLESPIE, D. & ROBERTSON, P.K., 1982. Pore pressure during cone penetration testing. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II*, Amsterdam, May 24-27, A.A. Balkema, **2**, 507-512.
- CAQUOT, A. & KERISEL, J., 1966. *Traité de mécanique des sols*, Gauthier-Villars, Paris, France, 4<sup>ème</sup> édition, 506 p.
- CARTER, J.P., BOOKER, J.R. & YEUNG, S.R., 1986. Cavity expansion in cohesive-frictional soils. *Géotechnique*, **36**, 349-358.
- CATT, J.A., 2001. The agricultural importance of loess. *Earth-Science Reviews*, **54**, 213-229.
- CHASSEUX, D., BAGUELIN, F., BRI, J.P., CALGARO, J.A., CORNET, M., DURANT-RAUCHER, Y., HAHUSSEAU, C., HAIUN, G., JEZQUEL, J., MARSAC, A., MATHIEU, H., PEIGNAUD, M., PONS, F. & SCHOSSER, F., 1972. *Fondations courantes d'ouvrages d'art*, FOND 72. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris. Fascicule 3.5, Réalisation des essais en place, 59 p.

- CHOI, K. & KIM, J.H., 2006. Identifying late Quaternary coastal deposits in Kyonggi Bay, Korea, by their geotechnical properties. *Geo-Marine Letters*, **26**, 77-89.
- CHRETIEN, J., PEDRO, G. & MEUNIER, D., 1987. Granulométrie, porosité et spectre poral des sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, **23**, 43-54.
- CLEVENGER, W. A., 1958. Experiences with loess as foundation material. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **123**, 151-169.
- CNUDDE, J.P., 1989. Application des méthodes de prospection géophysique à la géologie de l'ingénieur. The resistivity method. *Colloque national, Comité belge de géologie de l'ingénieur*, Liège, 9-10 octobre, **Fascicule 5**, 24 p.
- COLLAS, J. & HAVARD, M., 1983. *Guide de géotechnique : lexique et essais*. Les dossiers de la construction. Editions Eyrolles, Paris, France, 135 p.
- COLLIN, A., 1846. *Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux, accompagnées de considérations sur quelques principes de la mécanique terrestre*. Carilian-Goeury et Dalmont, Paris, France, 176 p.
- COOK, H.E., JOHNSON, P.D., MATTI, J.C. & ZEMMELS, I., 1975. Methods of sample preparation and x-ray diffraction data analysis, x-ray mineralogy laboratory. In: KANEPS, A.G. (Ed.). *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, Washington DC, **28**, 997-1007.
- DAVID, M.B., 1988. Use of loss-on-ignition to assess soil organic carbon in forest soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **19**, 1593-1599.
- DE BEER, E.E., 1945. Étude des fondations sur pilotis et des fondations directes : l'appareil de pénétration en profondeur. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, **45**, 229-243 ; 361-385 ; 479-511.
- DE BEER, E.E., 1963. The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations. *Géotechnique*, **8**, 39-75.
- DE GEYTER, G., 1988. Formatie van Hannut. In: MARÉCHAL, R. & LAGA, P. (Eds). *Voorstel lithostratigrafische indeling van het Paleogeen*. Belgische Geologische Dienst, Brussel, 60-71.
- DE HEINZELIN, J., 1950. Stratigraphie du gisement paléolithique d'Otrange sur base des résultats de la campagne de fouille de 1948. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **26**, 1-32.
- DE HEINZELIN, J., 1959. Stratigraphie de la carrière Hélin sur base des résultats de la campagne de fouille de 1958. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **35**, 1-27.
- DE HEINZELIN, J., 1984. Essai sur archéologie et régions naturelles. In : CAHEN, D. & HAESAERTS, P. (Eds). *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Bruxelles, 101-106.
- DE RUITER, J. & BERINGEN, F.L., 1979. Pile foundations for large North Sea structures. *Marine Geotechnology*, **3**, 267-314.
- DELAGE, P., AUDIGUIER, M., CUI, Y.J. & HOWAT, M.D., 1996. Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**, 150-158.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DELAGE, P. & CUI, Y.J., 2001. Comportement mécanique des sols non saturés. *Techniques de l'Ingénieur*, **C302**, 19 p.
- DELAGE, P., CUI, Y.J. & ANTOINE, P., 2005. Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France. *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*, 25-27 May, Eastern Mediterranean University, Famagusta, Cyprus, 24 p.
- DELAGE, P. & PELLERIN, F.M., 1984. Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec. *Clay Minerals*, **19**, 151-160.
- DELVOIE, S., BOULVAIN, F., CHARLIER, R. & COLLIN, F., 2016a. Detailed characterization of the Late Pleistocene loess sequence stratigraphy of Remicourt (Hesbaye region, Belgium) with cone penetration tests. *Geologica Belgica*, **19**, 281-289.
- DELVOIE, S., CHARLIER, R. & COLLIN, F., 2016b. In situ and laboratory mechanical characterization of a loess sequence from Middle Belgium. *Proceedings of the "34èmes Rencontres de l'AUGC"*, University of Liège, Liège, Belgium, 25-27 May.
- DELVOIE, S., PIRSON, S., CHARLIER, R. & COLLIN, F., 2016c. Étude de la séquence stratigraphique des lœss de la carrière de Romont (Eben-Emael, Belgique) par une campagne géotechnique. *Notae Praehistoricae*, **36**, 5-21.
- DEMEK, J. & KUKLA, J., 1969. *Periglazialzone, Löss und Paläolithikum der Tschechoslowakei*. Tschechoslowakische Akademie der Wissenschaften, Geographisches Institut (Brno), 158 p.
- DEMOULIN, A., 1995. Les surfaces d'érosion méso-cénozoïques en Ardenne-Eifel. *Bulletin de la Société géologique de France*, **166**, 573-585.
- DEMOULIN, A., 1998. Testing the tectonic significance of some parameters of longitudinal river profiles: the case of the Ardenne (Belgium, NW Europe). *Geomorphology*, **24**, 189-208.
- DENISOV, N., 1951. The engineering properties of loess and loess loams. Gosstroizdat, Moscow, 136 p.
- DERBYSHIRE, E., 2001. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China. *Earth-Science Reviews*, **54**, 231-260.
- DERBYSHIRE, E., 2003. Loess, and the dust indicators and records of terrestrial and marine palaeoenvironments (DIRTMAP) database. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1813-1819.
- DERBYSHIRE, E. & MELLORS, T.W., 1988. Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain - a comparison. *Engineering Geology*, **25**, 135-175.
- DI MODICA, K., 2010. *Les productions lithiques du Paléolithique moyen de Belgique : variabilité des systèmes d'acquisition et des technologies en réponse à une mosaïque d'environnements contrastés*. Thèse de doctorat, Faculté de Philosophie et Lettres, Département de Préhistoire, Université de Liège – Muséum National d'Histoire Naturelle, Liège – Paris, 787 p.
- DI MODICA, K., 2011. La documentation du Paléolithique moyen en Belgique aujourd'hui, état de la question. In : TOUSSAINT, M., DI MODICA, K., PIRSON, S. (Eds). *Le Paléolithique moyen en Belgique*. Mélanges Marguerite Ulix-Closset, Liège, 75-104.

- DI MODICA, K., TOUSSAINT, M., ABRAMS, G. & PIRSON, S., 2016. The Middle Palaeolithic from Belgium : Chronostratigraphy, territorial management and culture on a mosaic of contrasting environments. *Quaternary International*, **411**, 77-106.
- DIJKSTRA, T.A., ROGERS, C.D.F., SMALLEY, I.J., DERBYSHIRE, E., JIN, L.Y. & MIN, M.X., 1994. The loess of North-Central China - geotechnical properties and their relation to slope stability. *Engineering Geology*, **36**, 153-171.
- DJONEIDI DJAFARI, H. & FRANK, H., 1983. Contribution à l'étude théorique en grandes déformations du poinçonnement dans les sols. *Rapports des laboratoires, Série Géotechnique – Mécanique des sols – Sciences de la Terre*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, n°GT2, 151 p.
- DONNICI, S., SERANDREI-BARBERO, R., BINI, C., BONARDI, M. & LEZZIERO, A. 2011. The caranto paleosol and its role in the early urbanization of Venice. *Geoarchaeology*, **26**, 514-543.
- DOUGLAS, B.J. & OLSEN, R.S., 1981. Soil classification using electric cone penetrometer. Cone Penetration Testing and Experience. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering, ASCE, National Convention*, St-Louis, 209-227.
- EN 1997-1, 2004. *Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales*. Comité européen de normalisation, Bruxelles, 175 p.
- EN 1997-2, 2007. *Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais*. Comité européen de normalisation, Bruxelles, 196 p.
- EBELHAR, R.J., YOUNG, A.G. & STIEBEN, G.P., 1988. Cone penetrometer and conductor pullout tests in carbonate soils offshore Africa. *Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments*, Perth, Belkema publication, Rotterdam, 155-163.
- ESLAMI, A., 1996. *Bearing capacity of piles from cone penetrometer test data*. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada, 516 p.
- ESLAMI, A. & FELLENIUS, B.H., 1997. Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, 886-904.
- ESLAMI, A. & FELLENIUS, B.H., 2004. CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and a proposed new approach. *Iranian Journal of Science and Technology*, **28**, 69-86.
- FAGNOUL, A., BONNECHÈRE, F., PIGNON, E., HAZARD, J., MONJOIE, A., POLO-CHIAPOLINI, C., CAJOT, O. & ZEIMET, M.J., 1982. *Notice explicative de la carte géotechnique 42.2.5 Liège (Vottem)*. Centre de Cartographie Géotechnique de l'Université de Liège, Liège, Belgique, 84 p.
- FEDA, J., 1964. Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. *Proceedings of Soil Mechanics Seminar*, 531-546.
- FELLENIUS, B.H., 2017. *Basics of foundation design*. Electronic Edition, 464 p, [www.Fellenius.net](http://www.Fellenius.net)
- FOUCAULT, A., RAOULT, J.F., CECCA, F. & PLATEVOET, B., 2014. *Dictionnaire de géologie*. Dunod, Paris, 8<sup>e</sup> édition, 396 p.
- FRECHEN, M., VAN VLIET-LANOË, B. & VAN DEN HAUTE, P., 2001. The Upper Pleistocene loess record at Harmignies/Belgium - high resolution terrestrial archive of climate forcing. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **173**, 175-195.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GALEANDRO, A., DOGLIONI, A. & SIMEONE, V., 2017. Statistical analyses of inherent variability of soil strength and effects on engineering geology design. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **76**, 587-600.
- GIBBARD, P.L., BOREHAM, S., COHEN, K.M. & MOSCARIELLO, A., 2004. *Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years*. Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy), Cambridge, <https://quaternary.stratigraphy.org/charts>
- GIBBARD, P.L. & VAN KOLFSCHOTEN, T., 2004. The Pleistocene and Holocene Epochs. In : GRADSTEIN, F.M., OGG, J.G. & SMITH, A.G. (Eds.). *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge, 441-452.
- GIBBS, H.J. & BARA, J.P., 1962. Predicting surface subsidence from basic soil tests. *ASTM Special Technical Publication*, **322**, 231-246.
- GIBBS, H.J. & HOLLAND, W.J., 1960. Petrographic and engineering properties of loess. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Engineering monographs*, **28**, 37 p.
- GIBSON, R.E., 1950. Correspondence. The bearing capacity of screw piles and screwcrete cylinders. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, **34**, 382-383.
- GULLENTOPS, F., 1954. Contribution à la chronologie du pléistocène et des formes du relief en Belgique. *Mémoires de l'Institut géologique de l'Université Catholique de Louvain*, **18**, 125-252.
- GULLENTOPS, F. & MEIJS, E., 2002. Loess sequences in Northern Haspengouw, Belgian Limburg. In: IKLINGER, A. & SCHIRMER, W. (Eds). *Loess units and soil complexes in the Niederrhein and Maas area*. Terra Nostra. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung 02/1, 80-91.
- HAASE, D., FINK, J., HAASE, G., RUSKE, R., PECSI, M., RICHTER, H., ALTERMANN, M. & JAEGER, K.D., 2007. Loess in Europe: its spatial distribution based on a European loess map, scale 1:2,500,000. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 1301-1312.
- HAESAERTS, P., 1974. Séquence paléoclimatique du Pléistocène supérieur du bassin de la Haine (Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique*, **97**, 105-137.
- HAESAERTS, P., 1978. Contexte stratigraphique de quelques gisements paléolithiques de plein air de Moyenne Belgique. *Bulletin de la Société Royale Belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, **89**, 115-133.
- HAESAERTS, P., 1985. Les lœss du Pléistocène supérieur en Belgique, comparaison avec les séquences d'Europe centrale. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, **2-3**, 105-115.
- HAESAERTS, P., BORZIAK, I., CHEKHA, V.P., CHIRICA, V., DAMBLON, F., DROZDOV, N.I., ORLOVA, L.A., PIRSON, S. & VAN DER PLICHT, J., 2009. Climatic signature and radiocarbon chronology of Middle and Late Pleniglacial loess from Eurasia: comparison with the marine and Greenland records. *Radiocarbon*, **51**, 301-318.
- HAESAERTS, P., BORZIAK, I., CHIRICA, V., DAMBLON, F., KOULAKOVSKA, L. & VAN DER PLICHT, J., 2003. The East Carpathian Loess Record: a reference for the middle and late pleniglacial stratigraphy in Central Europe. *Quaternaire*, **14**, 163-188.



- HAESAERTS, P., CHEKHA, V.P., DAMBLON, F., DROZDOV, N.I., ORLOVA, L.A. & VAN DER PLICHT, J., 2005. The loess-palaeosol succession of Kurtak (Yenisei basin, Siberia): a reference record for the Karga Stage (MIS 3). *Quaternaire*, **16**, 3-24.
- HAESAERTS, P., DAMBLON, F., GERASIMENKO, N., SPAGNA, P. & PIRSON, S., 2016. The Late Pleistocene loess-palaeosol sequence of Middle Belgium. *Quaternary International*, **411**, 25-43.
- HAESAERTS, P., DI MODICA, K. & PIRSON, S., 2011b. Le gisement paléolithique de la Sablière Gritten à Rocourt (province de Liège). In : Toussaint, M., DI MODICA, K. & PIRSON, S. (Eds). *Le Paléolithique moyen en Belgique*. Mélanges Marguerite Ulrix-Closset, Liège, 359-374.
- HAESAERTS, P., JUVIGNÉ, E., KUYL, O., MUCHER, H. & ROEBROEKS, W., 1981. Compte rendu de l'excursion du 13 juin 1981, en Hesbaye et au Limbourg néerlandais, consacrée à la chronostratigraphie des loess du Pléistocène supérieur. *Société géologique de Belgique*, **104**, 223-240.
- HAESAERTS, P. & MESTDAGH, H., 2000. Pedosedimentary evolution of the last interglacial and early glacial sequence in the European loess belt from Belgium to central Russia. *Netherlands Journal of Geosciences*, **79**, 313-324.
- HAESAERTS, P., MESTDAGH, H. & BOSQUET, D., 1997a. La séquence de Remicourt (Hesbaye, Belgique). *Notae Praehistoricae*, **17**, 45-52.
- HAESAERTS, P., MESTDAGH, H. & BOSQUET, D., 1997b. I. Analyse des dépôts quaternaires sur le tracé du TGV oriental. II. Le site de Remicourt-Momalle, au lieu dit En Bia Flo. Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Bruxelles, rapport inédit, 12 p.
- HAESAERTS, P., MESTDAGH, H. & BOSQUET, D., 1999. The sequence of Remicourt (Hesbaye, Belgium): new insights on the pedo- and chronostratigraphy of the Rocourt soil. *Geologica Belgica*, **2**, 5-27.
- HAESAERTS, P., PIRSON, S. & MEIJS, E.P.M., 2011a. New Proposal for the Quaternary Lithostratigraphic Units (Belgium) 21-2-2011. <http://www2.ulg.ac.be/geolsed/GB/SCQ.htm> (consulté le 24/01/2017).
- HAESAERTS, P. & VAN VLIET, B., 1974. Compte rendu de l'excursion du 25 mai 1974 consacrée à la stratigraphie des limons aux environs de Mons. *Annales de la Société géologique de Belgique*, **97**, 547-560.
- HAESAERTS, P. & VAN VLIET-LANOË, B., 1981. Phénomènes périglaciaires et sols fossiles observés à Maisières-Canal, à Harmignies et à Rocourt. *Biuletyn peryglacjalny*, **28**, 291-324.
- HANDY, R.L., 1973. Collapsible loess in Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, **37**, 281-284.
- HAYS, J.D., IMBRIE, J. & SHACKLETON, N.J., 1976. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages. *Science*, **194**, 1121-1132.
- HOLLOWAY, D.M., CLOUGH, G.W. & VESIC, A.S., 1975. The mechanics of pile-soil interaction in cohesionless soils. School of Engineering, Duke University, Durham, *Soil Mechanics Series*, **39**, 280 p.
- HOOGSTEEEN, M.J.J., LANTINGA, E.A., BAKKER, E.J., GROOT, J.C.J. & TITTONELL, P.A., 2015. Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science*, **66**, 320-328.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- HOWARD, P.J.A., 1965. The carbon-organic matter factor in various soil types. *Oikos*, **15**, 229-236.
- HUNT, H.W., 1979. *Design & installation of driven pile foundations*. Associated Pile & Fitting Corp., New-York, 217 p.
- HUYBRECHTS, N., MAERTENS, J., MENGÉ, P. & LEGRAND, C., 2002. Résultats d'un vaste programme de reconnaissance du sol. Essais dans un sous-sol en argile de Boom à Wavre-Sainte-Catherine. Recherches et Etudes, *CSTC magazine*, **hivers 2002**, 16 p.
- IMBRIE, J. & IMBRIE, J.Z., 1980. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*, **207**, 943-953.
- IMBRIE, J., BERGER, A., BOYLE, E.A., CLEMENS, S.C., DUFFY, A., HOWARD, W.R., KUKLA, G., KUTZBACH, J., MARTINSON, D.G., MCINTYRE, A., MIX, A.C., MOLFINO, B., MORLEY, J.J., PETERSON, L.C., PJSIAS, N.G., PRELL, W.L., RAYMO, M.E., SHACKLETON, N.J. & TOGGWEILER, J.R., 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, **8**, 699-735.
- ISRIC & FAO, 2002. *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Centre, 6<sup>th</sup> edition, Technical paper 9.
- ISO 8130-2, 1992. Coating powders – Part 2. Determination of density by gas comparison pyknometer (referee method). ISO, Geneva, Switzerland, 3 p.
- ISO 14235, 1998. Soil quality. Determination of organic carbon by sulfochromic oxidation. ISO, Geneva, Switzerland, 5 p.
- ISO 14688-1, 2002. Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 1: Identification and description. ISO, Geneva, Switzerland, 12 p.
- ISO 14688-2, 2004. Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 2: Principles for a classification. ISO, Geneva, Switzerland, 13 p.
- ISO/TS 17892-4, 2004. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution. ISO, Geneva, Switzerland, 26 p.
- JAIN, T. B., GRAHAM, R. T. & ADAMS, D. L. 1997. Carbon to organic matter ratios for soils in Rocky Mountain coniferous forests. *Soil Science Society of America Journal*, **61**, 1190-1195.
- JANBU, N. & SENNESET, K., 1974. Effective stress interpretation of in situ static cone penetration tests. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, **2**, 181-193.
- JARDINE, J., CHOW, F., OVERY, R. & STANDING, J., 2005. *ICP design method for driven piles in sands and clays*. Thomas Telford Publishing Ltd., London, 105 p.
- JENNINGS, J.E. & KNIGHT, K., 1957. The additional settlement of foundations due to collapse of structure of sandy subsoils on wetting. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **3**, 316-319.
- JOHNSEN, S.J., DAHL-JENSEN, D., GUNDESTRUP, N., STEFFENSEN, J.P., CLAUSEN, H.B., MILLER, H., MASSON-DELMOTTE, V., SVEINBJÖRNSDÓTTIR, A.E. & WHITE, J., 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science*, **16**, 299-307.

- JORAT, M.E., MÖRZ, T., SCHUNN, W. & KREITER, S., 2014. Geotechnical Offshore Seabed Tool (GOST): A new cone penetrometer. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing*, Las Vegas, USA, 207-215
- JUVIGNÉ, E., 1977. Zone de dispersion et âge des poussières volcaniques du Tuf de Rocourt. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **100**, 13-22.
- JUVIGNÉ, E., 1978. Les minéraux denses transparents des loess de Belgique. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **Neue Folge** **22**, 68-88.
- JUVIGNÉ, E., 1992. Les formations cénozoïques de la carrière C.B.R. du Romont (Eben/Bassenge, Belgique). *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **115**, 159-165.
- JUVIGNÉ, E. & GEWELT, M., 1988. Téphra et dépôts de grottes : intérêt stratigraphique réciproque. *Annales de la Société géologique de Belgique*, **111**, 135-140.
- JUVIGNÉ, E., HAESAERTS, P., METSDAGH, H. & BALESU, S., 1996. Révision du stratotype loessique de Kesselt (Limbourg, Belgique). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, Paris, série IIa : Sciences de la Terre et des Planètes, **323**, 801-807.
- JUVIGNÉ, E., POUCLLET, A., HAESAERTS, P., BOSQUET, D. & PIRSON, S., 2013. Le téphra de Rocourt dans le site paléolithique moyen de Remicourt (Province de Liège, Belgique). *Quaternaire*, **24**, 279-291.
- JUVIGNÉ, E. & RENARD, F., 1992. Les terrasses de la Meuse de Liège à Maastricht. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **115**, 167-186.
- JUVIGNÉ, E. & SEMMEL, A., 1981. Un tuf volcanique semblable à l'Eltviller Tuff dans les loess de Hesbaye (Belgique) et du Limbourg néerlandais. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **31**, 83-90.
- JUVIGNÉ, E., TALLIER, E., HAESAERTS, P. & PIRSON, S., 2008. Un nouveau stratotype du Téphra de Rocourt dans la carrière de Romont (Eben/Bassenge, Belgique). *Quaternaire*, **19**, 133-139.
- KANE, H., 1968. *A mechanistic explanation of the physical properties of undisturbed loess*. Iowa city, Iowa State Highway Commission, Research Project HR-126, 113 p.
- KASSIFF, G. & HENKIN, E., 1967. Engineering and physico-chemical properties affecting piping failure of low loess dams in Negev. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, 13-16.
- KERISEL, J., 1958. La mécanique des sols : recherches et investigations récentes. *Conférence au Congrès de l'industrie française des travaux publics*, Revue Travaux, **287**, 874-878.
- KERISEL, J., TCHENG, Y. & L'HERMINIER, R., 1965. Résistance de pointe en milieu pulvérulent de divers serrages. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, **2**, 265-269.
- KEZDI, A., 1975. Pile foundations. In: WINTERKORN, H.F. & FANG, H.Y. (Eds). *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 556-600.
- KIE, T.T., 1988. Fundamental properties of loess from Northwestern China. *Engineering Geology*, **25**, 103-122.
- KNIGHT, K., 1963. The origin and occurrence of collapsing soils. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Regional Conference of Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, 127-130.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- KOHFELD, K.E. & HARRISON, S.P., 2001. DIRTMAP: the geological record of dust. *Earth-Science Reviews*, **54**, 81-114.
- KÖPPEN, W., 1936. Das geographische System der Klimate. In : Köppen, W. & Geiger, R. (Eds). *Handbuch der Klimatologie*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Band I, Teil C, 45 p.
- KOSTER, K., 2016. Cone penetration testing: a sound method for urban archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, **23**, 55-69.
- KRINITZSKY, E.L. & TURNBULL, W. J., 1967. Loess deposits of Mississippi. *Geological Society of America, Special Papers*, **94**, 1-62.
- KULHAWY, F.H. & MAYNE, P.W., 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. EPRI EL-6800, Research Project 1493-6, Final report, August 1990, Cornell University, Ithaca, New York, 308 p.
- LADANYI, B., 1961. Étude théorique et expérimentale de l'expansion dans un sol pulvérulent d'une cavité présentant une symétrie sphérique ou cylindrique. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, **4**, 365-404.
- LADANYI, B. & JOHNSTON, G.H., 1974. Behaviour of circular footings and plate anchors embedded in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, **11**, 531-553.
- LAGA, P., 1988. Formatie van Sint-Huitbrechts-Hern. In : MARÉCHAL, R. & LAGA, P. (Eds). *Voorstel lithostratigraphische indeling van het Paleogeen*. Belgische Geologische Dienst, Brussel, 164-169.
- LAGA, P. & DE GEYTER, G., 1988. Formatie van Heers. In : MARÉCHAL, R. & LAGA, P. (Eds). *Voorstel lithostratigraphische indeling van het Paleogeen*. Belgische Geologische Dienst, Brussel, 52-58.
- LAGA, P., LOUWYE, S. & GEETS, S., 2001. Paleogene and Neogene lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica*, **4**, 135-152.
- LAMBECK, K., ROUBY, H., PURCELL, A., SUN, Y. & SAMBRIDGE, M., 2014. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 15296-15303.
- LAUTRIDOU, J.P., 1985. *Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 908 p.
- LCPC, 1963a. Analyse granulométrique par tamisage. Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. DUNOD, Paris, France, 32 p.
- LCPC, 1963b. Essai de compressibilité à l'œdomètre. Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. DUNOD, Paris, France, 33 p.
- LCPC, 1966. Essai de cisaillement à la boîte. Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. DUNOD, Paris, France, 28 p.
- LCPC, 1968. Essai triaxial. Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. DUNOD, Paris, France, 65 p.
- LCPC, 1987. Limites d'Atterberg : limite de liquidité et limite de plasticité, méthode d'essai. DUNOD, Paris, France, 28 p.
- LECLERCQ, J. & VERBRUGGE, J.C., 1985. Propriétés géomécaniques des sols non saturés. *Compte-rendu du Colloque International sur le Travail du Sol*. Gembloux, Belgique, 1-8.

- LEPLAT, J., 1968. Limon et loess. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **29**, 32 p.
- LI, Z.M., 1995. Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils*. Paris, France, 139-144.
- LIPIEC, J., HAJNOS, M. & ŚWIEBODA, R., 2012. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma*, **179-180**, 20-27.
- LOCHT, J.L., ANTOINE, P., BAHAIN, J.J., DWRILA, G., RAYMOND, P., LIMONDIN-LOZOUET, N., GAUTHIER, A., DEBENHAM, N., FRECHEN, M., ROUSSEAU, D.D., HATTE, C., HAESAERTS, P. & METSDAGH, H., 2003. Le gisement paléolithique moyen et les séquences pléistocènes de Villiers-Adam (Val d'Oise, France): chronostratigraphie, environnement et implantations humaines. *Gallia Préhistoire*, **45**, 1-111.
- LOCHT, J.L., HÉRISSON, D., GOVAL, E., CLIQUET, D., HUET, B., COUTARD, S., ANTOINE, P. & FERAY, P., 2016. Timescales, space and culture during the Middle Palaeolithic in northwestern France. *Quaternary International*, **411**, 129-148.
- LUI, S.Y., DU, Y.J., HAN, L.H. & GU, M.F., 2008. Experimental study on the electrical resistivity of soil-cement admixtures. *Environmental Geology*, **54**, 1227-1233.
- LUNNE, T., 2012. The Fourth James K. Mitchell Lecture: The CPT in offshore soil investigations – a historic perspective. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, **7**, 75-101.
- LUNNE, T., ROBERTSON, P.K. & POWELL, J.J.M., 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press, London, 312 p.
- MAGNAN, J.P., 1997. Description, identification et classification des sols. *Techniques de l'Ingénieur*, **C208**, 16 p.
- MASEKANYA, J.P., 2008. *Stabilité des pentes et saturation partielle. Étude expérimentale et modélisation numérique*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique, 283 p.
- MATALUCCI, R.V., 1969. *The microstructure of loess and its relationship to engineering properties*. PhD thesis, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, USA, 142 p.
- MATALUCCI, R.V., ABDEL-HADY, M. & SHELTON, J.W., 1970. Influence of microstructure of loess on triaxial shear strength. *Engineering Geology*, **4**, 341-351.
- MATHIEU, C. & LOZET, J., 2011. *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*. Editions Tec & Doc, Paris, France, 733 p.
- MAYNE, P.W., 2007. *Cone penetration testing. A synthesis of highway practice*. Project 20-5 NCHRP Synthesis 368. Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C., 118 p.
- MEIJS, E.P.M., s.d. *Archeogeolab. Paleolithic and Quaternary Research in the European Loess Belt*. Version 26/06/2011, www.archeogeolab.nl.
- MEIJS, E.P.M., 2002. Loess stratigraphy in Dutch and Belgian Limburg. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **51**, 114-130.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MEIJS, E.P.M., 2011. The Veldwezelt site (province of Limbourg, Belgium): environmental and stratigraphical interpretations. *Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw)*, **90**, 73-94.
- MEIJS, E.P.M., MUCHER, H., OUWERKERK, G., ROMEIN, A. & STOLTENBERG, H., 1983. Evidence of the presence of the Eltville tuff layer in Dutch and Belgian Limbourg and the consequences for the loess stratigraphy. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **33**, 59-78.
- MENGÉ, P., 2001. Soil investigation results at Sint-Katelijne-Waver (Belgium). *Proceedings of the Symposium on Screw Piles*, Brussels, Belgium, Balkema Publishers, Rotterdam, 19-62.
- MESTDAGH, H., 2005. *Environmental reconstruction of the Last Interglacial and Early Glacial based on soil characteristics of pedocomplexes on loess at selected sites from the Atlantic coast to Central Asia*. PhD thesis, Gent University, Belgium, 396 p.
- MEYERHOF, G.G., 1951. The bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, **2**, 301-332.
- MEYERHOF, G.G., 1963. Some recent research on bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, **1**, 16-26.
- MEYERHOF, G.G., 1976. Bearing capacity and settlement of pile foundations. The Eleventh Terzaghi Lecture, November 5, 1975. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **102**, 195-228.
- MILANKOVIĆ, M., 1941. Canon of Insolation and the Ice-Age Problem (in German). *Special Publications of the Royal Serbian Academy*, **132**, Israel Program for Scientific Translations, 484 p.
- MISSIAEN, T., VERHEGGE, J., HEIRMAN, K. & CROMBÉ, P., 2015. Potential of cone penetration testing for mapping deeply buried palaeolandscapes in the context of archaeological surveys in polder areas. *Journal of Archaeological Science*, **55**, 174-187.
- MITCHELL, J.K. & GARDNER, W.S., 1975. In situ measurement of volume change characteristics. *Proceedings of the American Society of Engineers, Specialty Conference on In Situ Measurements of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, USA, **2**, 279-345.
- MOTTEQUIN, B. & MARION, J.M., 2012. *Carte géologique Tongres-Herderen (34/5-6) : notice explicative*. Version provisoire du 05/09/2012, 29 p.
- MOUREAU, B. & BRACE, G., 2000. *Dictionnaire des sciences de la terre, Anglais-Français – Français-Anglais*. Publications de l'Institut français du pétrole. Editions Technip, Paris, France, 1096 p.
- MUHS, D.R., CATTLE, S.R., CROUVI, O., ROUSSEAU, D.D., SUN, J.M. & ZÁRATE, M.A., 2014. Loess records. In : KNIPPERTZ, P. & STUUT, J.B.W. (Eds). *Mineral Dust*. Springer Netherlands, Dordrecht, 411-441.
- MUÑOZ-CASTELBLANCO, J.A., PEREIRA, M., DELAGE, P. & CUI, Y., 2012. The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France. *Géotechnique*, **62**, 95-106.
- NF P 94-051, 1993. *Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle, limite de plasticité au rouleau*. AFNOR, Paris, France, 15 p.
- NF P 94-056, 1996. *Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage*. AFNOR, Paris, France, 15 p.

- NF P 94-057, 1992. *Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation*. AFNOR, Paris, France, 17 p.
- NF P 94-071-1, 1994. *Sols : reconnaissance et essais. Essais de cisaillement rectiligne à la boîte. Cisaillement direct. Partie 1*. AFNOR, Paris, France, 16 p.
- NF P 94-074, 1994. *Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. Appareillage – Préparation des éprouvettes – Essai (UU) non consolidé non drainé – Essai (CU + u) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle – Essai (CD) consolidé drainé*. AFNOR, Paris, France, 36 p.
- NF X 30-442, 2008. *Déchets : détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau. Essais de perméabilité à l'œdomètre à charge hydraulique constante/variable*. AFNOR, Paris, France, 27 p.
- NF X 31-109, 1993. *Qualité des sols : méthodes chimiques : détermination du carbone organique par oxydation sulfochromique*. AFNOR, Paris, France, 7 p.
- NOTTINGHAM, L.C., 1975. Use of quasi-static friction cone penetrometer data to predict capacity of displacement piles. Ph.D. thesis, Dept of Civil Engineering, University of Florida, United-States, 553 p.
- OLSEN, R.S. & MITCHELL, J.K., 1995. CPT stress normalization and prediction of soil classification. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, Linköping, Sweden, **2**, 257-262.
- OTTE, M., BOËDA, E. & HAESAERTS, P., 1990. Rocourt : industrie laminaire archaïque. *Helinium*, **29**, 3-13.
- PAEPE, R., 1967. Séquences litho-stratigraphique du Pléistocène supérieur – Datations au C14. *Bulletin de la Société belge de Géologie, Paléontologie et Hydrologie*, **76**, 171-182.
- PAEPE, R. & VANHOORNE, R., 1967. The stratigraphy and paleobotany of the Late Pleistocene in Belgium. *Mémoires pour servir à l'explication des cartes géologiques et minières de la Belgique*, Service Géologique de Belgique, Bruxelles, **8**, 96 p.
- PARK, Y.A., LIM, D.I., KHIM, B.K., CHOI, J.Y. & DOH, S.J., 1998. Stratigraphy and subaerial exposure of late Quaternary tidal deposits in Haenam Bay, Korea (South-eastern Yellow Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **47**, 523-533.
- PÉCSI, M., 1990. Loess is not just the accumulation of dust. *Quaternary International*, **7-8**, 1-21.
- PÉCSI, M., 1995. The role of principles and methods in loess-paleosol investigations. *GeoJournal*, **36**, 117-131.
- PÉCSI, M. & RICHTER, G., 1996. *Löss: Herkunft - Gliederung - Landschaften*. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Supplementband 98. Gebrüder Bornträger, Berlin & Stuttgart, 391 p.
- PIRSON, S., 2007. *Contribution à l'étude des dépôts d'entrée de grotte en Belgique au Pléistocène supérieur. Stratigraphie, sédimentologie et paléoenvironnement*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université de Liège, 435 p. et 5 annexes.
- PIRSON, S., BAELE, J.-M., BALESU, S., HAESAERTS, P., JUVIGNÉ, E., MEIJS, E. & SPAGNA, P., 2017 (sous presse). Green amphibole distribution as a stratigraphic tool in loess sequences from Belgium: A review. *Quaternary International*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.026>

- PIRSON, S. & DI MODICA, K., 2011. Position chronostratigraphique des productions lithiques du Paléolithique ancien en Belgique : un état de la question. In: TOUSSAINT, M., DI MODICA, K. & PIRSON, S. (Eds). *Le Paléolithique moyen en Belgique*. Mélanges Marguerite Ulix-Closset, Liège, 105-148.
- PIRSON, S., HAESAERTS, P., COURT-PICON, M., DAMBLON, F., TOUSSAINT, M., DEBENHAM, N. & DRAILY, C., 2006. Belgian cave entrance and rock-shelter sequences as palaeoenvironmental data recorders: the example of Walou cave. *Geologica Belgica*, **9**, 275-286.
- PIRSON, S., HAESAERTS, P. & DI MODICA, K., 2009. Cadre chronostratigraphique des principaux gisements du Paléolithique moyen du bassin de la Haine: un état de la question. In: DI MODICA, K. & JUNGELS, C. (Eds.). *Paléolithique moyen en Wallonie*. La collection Louis Éloy. Collections du patrimoine culturel de la Communauté française, 2. Service du Patrimoine Culturel de la Communauté Française de Belgique, Bruxelles, 58-77.
- PIRSON, S., SPAGNA, P., BOSQUET, D., DELVOIE, S., DI MODICA, K., HAESAERTS, P., JUVIGNÉ, E. & VAN DER SLOOT, P., 2016. La séquence lœssique de la sablière Gritten à Rocourt : nouvelles données sur un site majeur. *Chronique de l'archéologie wallonne*, **24**, 144-148.
- PORTER, X., AN, Z., 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, **375**, 305-308.
- POUCLET, A. & JUVIGNÉ, E., 2009. The Eltville tephra, a late Pleistocene widespread tephra layer in Germany, Belgium and The Netherlands; symptomatic compositions of the minerals. *Geologica Belgica*, **12**, 93-103.
- POUCLET, A., JUVIGNÉ, E. & PIRSON, S., 2008. The Rocourt Tephra, a widespread 90-74 ka stratigraphic marker in Belgium. *Quaternary Research*, **70**, 105-120.
- PRANDTL, L., 1921. Über die Eindringungsfestigkeit plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, **1**, 15-20.
- PRIKLONSKIJ, V.A., 1952. *Gruntovedenie Vtoriaia Chast*. Soil Science II Gasgedizdat, Moscow, 371 p.
- PYE, K., 1995. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews*, **14**, 653-667.
- RANDOLPH, M.F., DOLWIN, J. & BECK, R., 1994. Design of driven piles in sand. *Géotechnique*, **44**, 427-448.
- RANKINE, W.J.M., 1857. On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **147**, 9-27.
- RASMUSSEN, S.O., BIGLER, M., BLOCKLEY, S.P.E., BLUNIER, T., BUCHARDT, S.L., CLAUSEN, H.B., CVIJANOVIC, I., DAHL-JENSEN, D., JOHNSEN, S.J., FISCHER, H., GKINIS, V., GUILLEVIC, M., HOEK, W.Z., LOWE, J.J., PEDRO, J.B., POPP, T., SEIERSTAD, I.K., STEFFENSEN, J.P., SVENSSON, A.M., VALLELONGA, P., VINTHER, B.M., WALKER, M.J.C., WHEATLEY, J.J. & WINSTRUP, M., 2014. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, **106**, 14-28.
- REISSNER, H., 1924. Zum erddruckproblem. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress of Applied Mechanics*, Delft, 295-311.



- RICHTER, J., 2016. Leave at the height of the party: A critical review of the Middle Paleolithic in Western Central Europe from its beginnings to its rapid decline. *Quaternary International*, **411**, 107-128.
- ROBASZYNSKI, F., 2006. Maastrichtian. *Geologica Belgica*, **9**, 63-72.
- ROBERTSON, P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, **27**, 151-158.
- ROBERTSON, P.K. & CAMPANELLA, R.G., 1983. Interpretation of cone penetration tests. Part II: clay. *Canadian Geotechnical Journal*, **20**, 734-745.
- ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., DAVIES, M.G. & SY, A., 1988. Axial capacity of driven piles in detail soils using CPT. *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 919-928.
- ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., GILLESPIE, D. & GREIG, J., 1986. Use of piezometer cone data. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Testing in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, 1263-1280.
- ROBERTSON, P.K. & FEAR, C.E., 1995. Liquefaction of sands and its evaluation. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, **3**, 1253-1289.
- ROL, A.H., 1982. Comparative study on cone resistances measured with three types of CPT tips. In: VERRUIJT, A., BERINGEN, F.L. & DE LEEUW, E.H. (Eds). *Penetration Testing. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, 24-27 May, Balkema Publishers, Rotterdam, **2**, 813-819.
- ROUSSEAU, D.D., 1991. Climatic transfer-function from quaternary molluscs in European loess deposits. *Quaternary Research*, **36**, 19-29.
- ROUSSEAU, D.D., GEROSIMENKO, N., MATVIISHINA, Z. & KUKLA, G., 2001. Late Pleistocene environments of Central Ukraine. *Quaternary Research*, **56**, 349-356.
- SÁNCHEZ GOÑI, M.F., TURON, J.L., EYNAUD, F., SHACKLETON, N.J. & CAYRE, O., 2000. Direct land/sea correlation of the Eemian, and its comparison with the Holocene: a high resolution palynological record off the Iberian margin. *Geologie en Mijnbouw*, **79**, 345-354.
- SANGLERAT, G., 1972. *The penetrometer and soil exploration. Interpretation of penetration diagrams – theory and practice*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 464 p.
- SANGLERAT, G., NHIM, T.V., SEJOURNE, M. & ANDINA, R., 1974. Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, **2.2**, 337-344.
- SCHAERTZL, R. & ANDERSON, S., 2005. *Soils: genesis and geomorphology*. Cambridge University Press, New York, 817 p.
- SCHIRMER, W., 1999. Garzweiler 4 – eine Stecknadel im Heuhaufen der letzten Warmzeit und Eiszeit. *Archäologie im Rheinland*, **1998**, 149-152.
- SCHIRMER, W., 2000. Eine Klimakurve des Oberpleistozäns aus dem rheinischen Löss. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **50**, 25-49.
- SCHIRMER, W., 2016. Late Pleistocene loess of the Lower Rhine. *Quaternary International*, **411**, 44-61.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- SCHMERTMANN, J.H., 1978. *Guidelines for cone test, performance, and design*. Federal Highway Administration, Washington, Report FHWA-TS-78209, 145 p.
- SCHÖNHALS, E., ROHDENBURG, H. & SEMMEL, A., 1964. Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Würmlöss-Gliederung in Hessen. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **15**, 199-206.
- SCHULTE, E.E. & HOSKINS, B., 2011. Recommended soil organic matter tests. In: The Northeast Coordinating Committee for Soil Testing (Ed.). *Recommended soil testing procedures for the Northeastern United States*. Northeastern Regional Publication, **493**, 3<sup>rd</sup> edition, 63-74.
- SEMMEL, A., 1967. Neue Fundstellen von vulkanischem Material in hessischen Lössen. *Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu Wiesbaden*, **95**, 104-108.
- SEMMEL, A., 1968. Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. *Frankfurter geographische Hefte*, **45**, 133 p.
- SENNESET, K., JANBU, N. & SVANØ, G., 1982. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Conference on Penetration Testing (ESOPT II)*, Amsterdam, the Netherlands, **2**, 863-870.
- SENNESET, K., SANDVEN, R., LUNNE, T., BY, T. & AMUNDSEN, T., 1988. Piezocone tests in silty soils. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Penetration Testing (ISOPT-1)*, Orlando, Florida, USA, 955-966.
- SENNESET, K., SANDVEN, R. & JANBU, N., 1989. The evaluation of soil parameters from piezocone tests. *Transportation Research Record*, **1235**, 24-37.
- SHACKLETON, N.J., 1987. Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews*, **6**, 183-190.
- SHACKLETON, N.J., 2000. The 100,000-year Ice-Age Cycle identified and found to long temperature, carbon dioxide and orbital eccentricity. *Science*, **289**, 1897-1902.
- SIER, M.J., ROEBROEKS, W., BAKELS, C.C., DEKKERS, M.J., BRÜHL, E., DE LOECKER, D., GAUDZINSKI-WINDHEUSER, S., HESSE, N., JAGICH, A., KINDLER, L., KUIJPER, W.J., LAURAT, T., MÜCHER, H.J., PENKMAN, K.E.H., RICHTER, D. & VAN HINSBERGEN, D.J.J., 2011. Direct terrestrial marine correlation demonstrates surprisingly late onset of the last interglacial in central Europe. *Quaternary Research*, **75**, 213-218.
- SMALLEY, I.J., JEFFERSON, I.F., DIJKSTRA, T.A. & DERBYSHIRE, E., 2001. Some major events in the development of the scientific study of loess. *Earth-Science Reviews*, **54**, 5-18.
- SMALLEY, I.J., MARKOVIĆ, S.B. & SVIRČEV, Z., 2011. Loess is [almost totally formed by] the accumulation of dust. *Quaternary International*, **240**, 4-11.
- SPRAFKE, T. & OBREHT, I., 2016. Loess: Rock, sediment or soil – What is missing for its definition? *Quaternary International*, **399**, 198-207.
- SVENDSEN, J.I., ALEXANDERSON, H., ASTAKHOV, V.I., DEMIDOV, I., DOWDESWELL, J.A., FUNDER, S., GATAULLIN, V., HENRIKSEN, M., HJORT, C., HOUMARK-NIELSEN, M., HUBBERTEN, H.W., INGOLFSSON, O., JACOBSSON, M., KJAER, K., LARSEN, E., LOKRANTZ, H., LUNKKA, J.P., LYSÄ, A., MANGERUD, J., MATIOUSHKOV, A., MURRAY, A., MÖLLER, P., NIESSEN, F., NIKOLSKAYA, O., POLYAK, L., SAARNISTO, M., SIEGERT, C., SIEGERT, M.J., SPIELHAGEN, R.F. & STEIN, R., 2004. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, **23**, 1229-1272.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

- TERZAGHI, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York, 510 p.
- TOMLINSON, M.J., 2001. *Foundation design and construction*, Pearson Education Limited, England, 7<sup>th</sup> edition, 584 p.
- TUMAY, M. T., & FAKHROO, M., 1981. Pile capacity in soft clays using electric QCPT data. *Proceedings of a conference Cone Penetration Testing and Experience*, American Society of Civil Engineers, October 26-30, St. Louis, Missouri, 434-455.
- VAN BAELEN, A., MEIJS, E.P.M., VAN PEER, P., DE WARRIMONT, J.P. & DE BIE, M., 2008. The early middle palaeolithic site of Kesselt-Op de schans (Belgian limburg). Excavation campaign 2008. *Notae Praehistoricae*, **28**, 5-9.
- VAN BEMMELEN, J.M., 1891. Über die Bestimmungen des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den Colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans, u.s.w. im Ackerboden. *Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen*, **37**, 279-290.
- VAN DEN BROECK, E., 1887. Note préliminaire sur l'origine probable du limon hesbayen ou limon non stratifié homogène. *Bulletin de la Société belge de Géologie*, **1**, 151-159.
- VAN DEN HAUTE, P., FRECHEN, M., BUYLAERT, J.P., VANDENBERGHE, D. & DE CORTE, F., 2003. The Last Interglacial palaeosol in the Belgian loess belt: TL age record. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 985-990.
- VAN DER SLOOT, P., HAESAERTS & P., PIRSON, S., 2011. Les sites du Mont-Saint-Martin (Liège). In: TOUSSAINT, M., DI MODICA, K. & PIRSON, S. (Eds.). *Le Paléolithique moyen en Belgique*. Mélanges Marguerite Ulrix-Closset, Liège, 385-393.
- VAN IMPE, W.F., 1986. Evaluation of deformation and bearing capacity parameters of foundations from static CPT-results. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and In-Situ Testing*, 25-27 November, Singapore, 1-20.
- VAN MIERLO, W.C. & KOPPEJAN, A.W., 1952. Lengte en draagvermogen van heipalen. *Bouwmachines*, **3**, 19 januari.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1986. Le Pédocomplexe du dernier Interglaciaire (de 125.000 à 75.000 B.P.). Variations de faciès et signification paléoclimatique du Sud de la Pologne à l'Ouest de la Bretagne. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, **23**, 139-150.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1992. Le niveau à langues de Kesselt, horizon repère de la stratigraphique du Weichsélien supérieur européen : signification paléoenvironnementale et paléoclimatique. *Mémoires de la Société géologique de France*, **160**, 35-44.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1998. Frost and soils: implications for paleosols, paleoclimates and stratigraphy. *Catena*, **34**, 157-183.
- VAN VLIET-LANOË, B. & LANGHOR, R., 1981. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and northern France. *Catena*, **8**, 137-154.
- VANCAMPENHOUT, K., WOUTERS, K., CAUS, A., BUURMAN, P., SWENNEN, R. & DECKERS, J., 2008. Fingerprinting of soil organic matter as a proxy for assessing climate and vegetation changes in last interglacial palaeosols (Veldwezelt, Belgium). *Quaternary Research*, **69**, 145-162.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- VANCAMPENHOUT, K., LANGOHR, R., SLAETS, J., BUURMAN, P., SWENNEN, R. & DECKERS, J., 2013a. Paleo-pedological record of the Rocourt Pedosequence at Veldwezelt-Hezerwater (Belgian Pleistocene loess belt): Part 1 – Evolution of the parent material. *Catena*, **107**, 118-129.
- VANCAMPENHOUT, K., LANGOHR, R., SLAETS, J., BUURMAN, P., SWENNEN, R. & DECKERS, J., 2013b. Paleo-pedological record of the Rocourt Pedosequence at Veldwezelt-Hezerwater (Belgian Pleistocene loess belt): Part 2 – Soil formation. *Catena*, **110**, 8-23.
- VANDENBERGHE, J., ZHISHENG, A., NUGTEREN, G., HUAYU, L. & VAN HUISSTEDEN, K., 1997. A new absolute timescale for the Quaternary climate in the Chinese loess region based on grain size analysis. *Geology*, **25**, 35-38.
- VELICHKO, A.A., 1990. Loess-paleosol formation on the Russian plain. *Quaternary International*, **7-8**, 103-114.
- VERHEGGE, J., VANHECKE, M., VAN DEN WIJNGAERT, M. & CROMBÉ, P., 2016. Geotechniek & archeologische prospectie: een overzicht van mechanische boor- en elektrische sondeertechnieken voor archeologie. *Notae Praehistoricae*, **36**, 203-209.
- VERMEIDEN, J., 1948. Improved sounding apparatus as developed in Holland since 1936. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, **1**, 280-287.
- VESIĆ, A.S., 1963. Bearing capacity of deep foundations in sand. National Academy of Sciences, National Research Council, *Highway Research Record*, **39**, 112-153.
- VESIĆ, A.S., 1975. Principles of pile foundation design, Lecture 1. School of Engineering, Duke University, Durham, *Soil Mechanics Series*, **38**, 52 p.
- VON LEONHARD K.C., 1824. *Charakteristik der Felsarten*. Dritte Abtheilung: Trümmergesteine, lose gesteine, kohlen. Vierte Abtheilung: Lose Gesteine. Joseph Engelmann, Heidelberg, 722-724.
- VON RICHTHOFEN, F., 1882. On the mode of origin of the loess. *Geological Magazine*, **9**, 293-305
- VOS, P.C., BUNNIK, F.P.M., COHEN, K.M. & CREMER, H., 2015. A staged geogenetic approach to underwater archaeological prospection in the Port of Rotterdam (Yangtzehaven, Maasvlakte, the Netherlands): a geological and palaeoenvironmental case study for local mapping of Mesolithic lowland landscapes. *Quaternary International*, **367**, 4-31.
- VREUGDENHIL, R., DAVIS, R. & BERRILL, J., 1994. Interpretation of cone penetration results in multilayered soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **18**, 585-599.
- WASHBURN, E.W., 1921. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proceedings of the National Academy of Science*, **7**, 115-116.
- WEN, B.P. & YAN, Y.J., 2014. Influence of structure on shear characteristics of unsaturated loess in Lanzhou, China. *Engineering Geology*, **168**, 46-58.
- WESTMAN, C. J., HYTÖNEN, J. & WALL, A. 2006. Loss-on-ignition in the determination of pools of organic carbon in soils of forests and afforested arable fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **37**, 1059-1075.
- WHENHAM, V., HUYBRECHTS, N., DE VOS, M., MAERTENS, J., SIMON, G. & VAN ALBOOM, G., 2004. Results of a comparative study on cone resistance measurements. *Proceedings of*

- the 2<sup>nd</sup> International Conference on Geotechnical and Geophysical site characterization*, Porto, Portugal, 19-22 Septembre, 399-406.
- WILLEMS, L., RODET, J., EK, C., PIRSON, S. & JUVIGNÉ, E., 2010. Karsts des calcarénites de la carrière du Romont (Eben – Belgique). *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie, hors-série 3*, 115-130.
- XP P 94-010, 1996. *Sols : reconnaissance et essais. Glossaire géotechnique*. AFNOR, Paris, France, 24 p.
- XP P 94-090-1, 1997. *Sols : reconnaissance et essais. Essai œdométrique : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers. Partie 1*. AFNOR, Paris, France, 23 p.
- YOUNG, T.L., IDRISSE, I.M., ANDRUS, R.D., ARANGO, I., CASTRO, G., CHRISTIAN, J.T., DOBRY, R., LIAM FINN, W.D., HARDER JR., L.F., HYNES, M.E., ISHIHARA, K., KOESTER, J.P., LIAO, S.S.C., MARCUSON III, W.F., MARTIN, G.R., MITCHELL, J.K., MORIWAKI, Y., POWER, M.S., ROBERTSON, P.K., SEED, R.B. & STOKOE II, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 817-833.
- YU, H.S., 1993. Discussion on: singular plastic fields in steady penetration of a rigid cone. *Journal of Applied Mechanics*, **60**, 1061-1062.
- YU, H.S., 2000. *Cavity expansion methods in geomechanics*. Springer Science and Business Media, Dordrecht, 385 p.
- YU, H.S. & HOULSBY, G.T., 1991. Finite cavity expansion in dilatant soil: loading analysis. *Géotechnique*, **41**, 173-183.
- YU, H.S. & MITCHELL, J.K., 1998. Analysis of cone resistance: review of methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 140-149.
- ZAGWIJN, W.H., 1974. Vegetation, climate and radiocarbon datings in the Late Pleistocene of the Netherlands; Part II: Middle Weichselian. *Mededelingen Rijks Geologisch Dienst*, **25**, 101-111.
- ZAGWIJN, W.H. & PAEPE, R., 1968. Die Stratigraphie der weichselzeitlichen Ablagerungen der Niederlande und Belgiens. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **19**, 129-146.
- ZENS, J., ZEEDEN, C., RÖMER, W., FUCHS, M., KLASSEN, N. & LEHMKUHL, F., 2017. The Eltville Tephra (Western Europe) age revised: Integrating stratigraphic and dating information from different Last Glacial loess localities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **466**, 240-251.
- ZHANG, X., ARIMOTO, R. & AN, Z., 1997. Dust emissions from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 28041-28047.
- ZHOU, J., XIE, Y., ZUO, Z.S., LUO, M.Y. & TANG, X.J., 1982. Prediction of limit load of driven pile by CPT. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II*, May 24-27, Amsterdam, A.A. Balkema, **2**, 957-961.



### ANNEXE 1: DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES PRINCIPALES UNITÉS OBSERVÉES SUR LE SITE DE ROMONT (ÉBEN-ÉMAEL)

L'ensemble des unités mentionnées dans le tableau suivant ne sont pas observables partout sur la paroi de Romont. Par ailleurs, des variations latérales de faciès sont possibles. Le tableau suivant synthétise les observations qui ont été réalisées dans le cadre de cette étude.

Unité	Interprétation	Description
1	A1 (sol actuel)	Sol actuel brun sombre, nombreuses racines, plus dense encore dans les 15 cm supérieurs, d'aspect très sec.
2	Bt holocène	Sol brun ocre, avec nuances de jaune orangé et de beige, très résistant dans sa partie supérieure, puis plus meuble vers le bas. La partie inférieure de l'horizon est plus homogène, brun orangé clair. Sa base est marquée par l'apparition des carbonates.
3	Limon brabantien	Limon brun beige homogène, sans stratification apparente.
4	Limon brabantien	Limon brun beige et orangé à gris beige, sans stratification apparente.
5	HLN	Limon brun gris, nombreuses concrétions noires d'oxyde de Mn. Le sommet n'est pas évident à positionner clairement car il s'agit plutôt d'une transition depuis un limon gris beige orangé vers un limon brun beige orangé avec de plus en plus d'oxydes de Mn. La base est formée de langues interpénétrées avec l'horizon sous-jacent. La délimitation de la base est plus facile à établir.
6	Limon hesbayen	Limon gris beige tacheté d'orange ocre situé sous l'HLN et même inclus dans les langues (sur un profil en 2D).
7a	Harveng ?	Limon brun gris tacheté de petits oxydes de Mn et quelques passées brun orange et brun beige. Présence de mollusques.
7b	Harveng ?	Limon plus brun beige à brun orangé que l'unité 7a. Mollusques plus fréquents que dans l'unité 7a.
7c	Harveng ?	Limon très bigarré, brun foncé, brun ocre, brun beige, brun orange. Toujours présence de mollusques.
8	Complexe stratifié	Limon très bigarré, comme l'unité 7c, mais avec absence de mollusques. La limite avec l'unité 7c n'est pas facile à positionner.
9	Complexe stratifié	Limon gris beige inclus dans une matrice limoneuse brun orangé et brun beige. Présence de lentilles de petits graviers roulés millimétriques à centimétriques. Présence d'oxydes en agglomérats.
10	-	Limon gris beige légèrement orangé, plus homogène que dans l'unité 6.
11	-	Limon stratifié avec des niveaux bruns et des niveaux brun beige lenticulaires. La stratification suit la forme de petits monticules arrondis au sommet de quelques centimètres de hauteur (structure de gel ?).
12	-	Limon brun homogène avec présence de biogaleries comblées de limon brun beige issus des unités 10 et 11.
13	Kincamp ?	Limon gris bleuté avec nombreuses taches d'oxydes de Fe de couleur rouille.

<b>Unité</b>	<b>Interprétation</b>	<b>Description</b>
14	-	Limon brun gris avec taches d'oxydes de Mn de plus en plus fréquentes vers le bas.
15	Malplaquet	Limon brun ocre moucheté de beige et de brun jaune avec oxydes de Mn en grande quantité et de taille relativement importante (parfois plurimillimétrique). Texture plus grenue que dans les unités sus-jacentes proches.
16	Complexe stratifié	Limon brun rouge stratifié avec du limon brun beige à beige. Les oxydes de Mn deviennent rapidement peu abondants vers le bas. L'unité inclus de nombreuses figures sédimentaires liées au dépôt.
17a	CHR	Limon brun très sombre à noir assez homogène, taches ocres, peu de taches gris beige.
17b	CHR	Limon brun très sombre à noir, avec plus de taches gris beige que dans l'unité 17a.
17c	CHR	Limon brun très sombre à noir, hétérogène dans l'ensemble, avec de nombreuses taches gris beige (biogalleries).
18	HBM	Limon gris beige à structure lamellaire très développée, panaché de brun noir dans la moitié supérieure et de brun ocre dans la moitié inférieure.
19	VSG-B	Limon brun ocre à brun gris beige, structure plus grenue.
20	VSG-A	Limon très similaire à l'unité 19, avec moins de parties gris beige. Structure granulaire plus marquée que dans l'unité 19. La limite entre les unités 19 et 20 n'est facile à positionner. Elle est placée à l'apparition d'un fin niveau de limon légèrement plus brun clair sous-jacent à un limon plus brun foncé.
21	Harmignies	Limon brun jaune orangé, structure granulaire. Beaucoup d'oxydes. Présence de taches de limon gris beige de quelques centimètres (glosses ?).

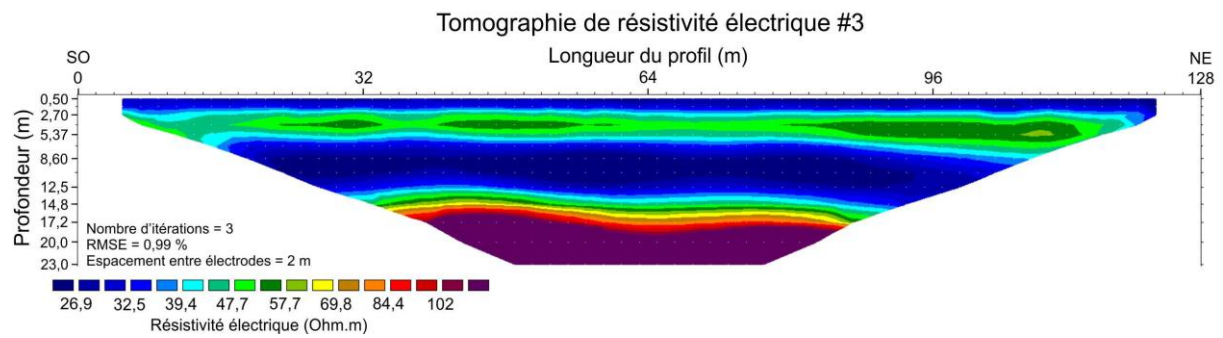
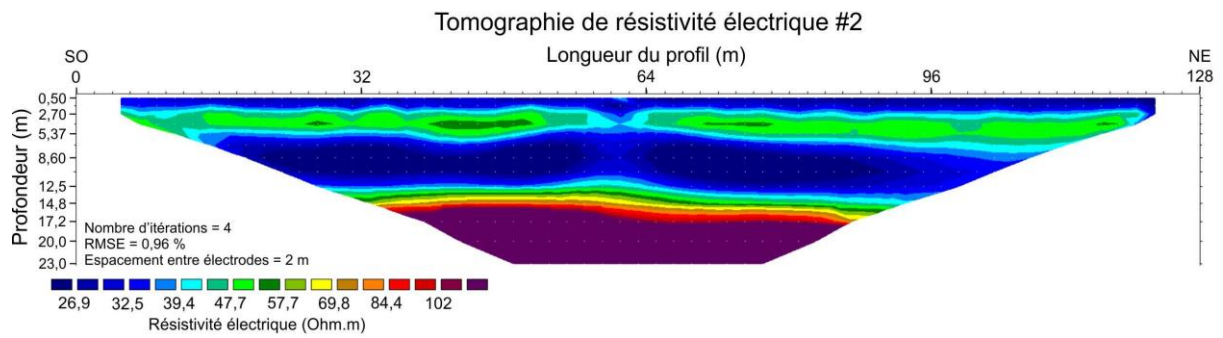
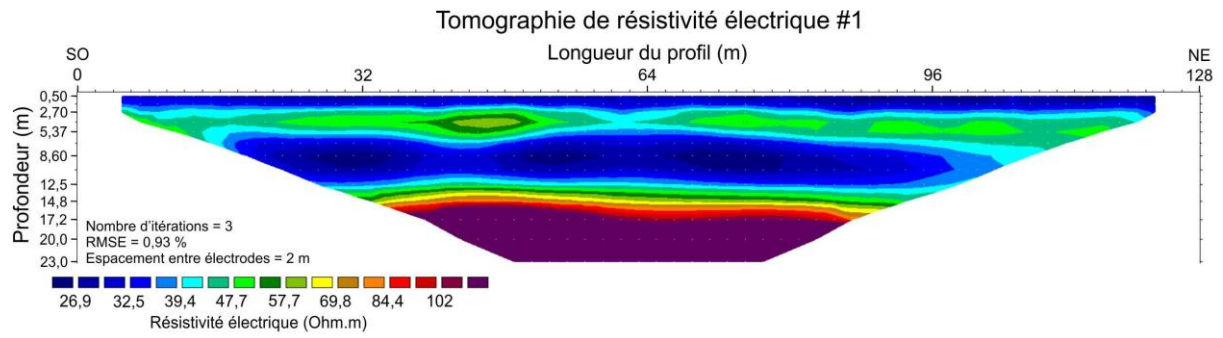


## ANNEXE 2 : LOCALISATION DES ESSAIS IN SITU RÉALISÉS SUR LES SITES DE ROMONT, ROCOURT ET REMICOURT

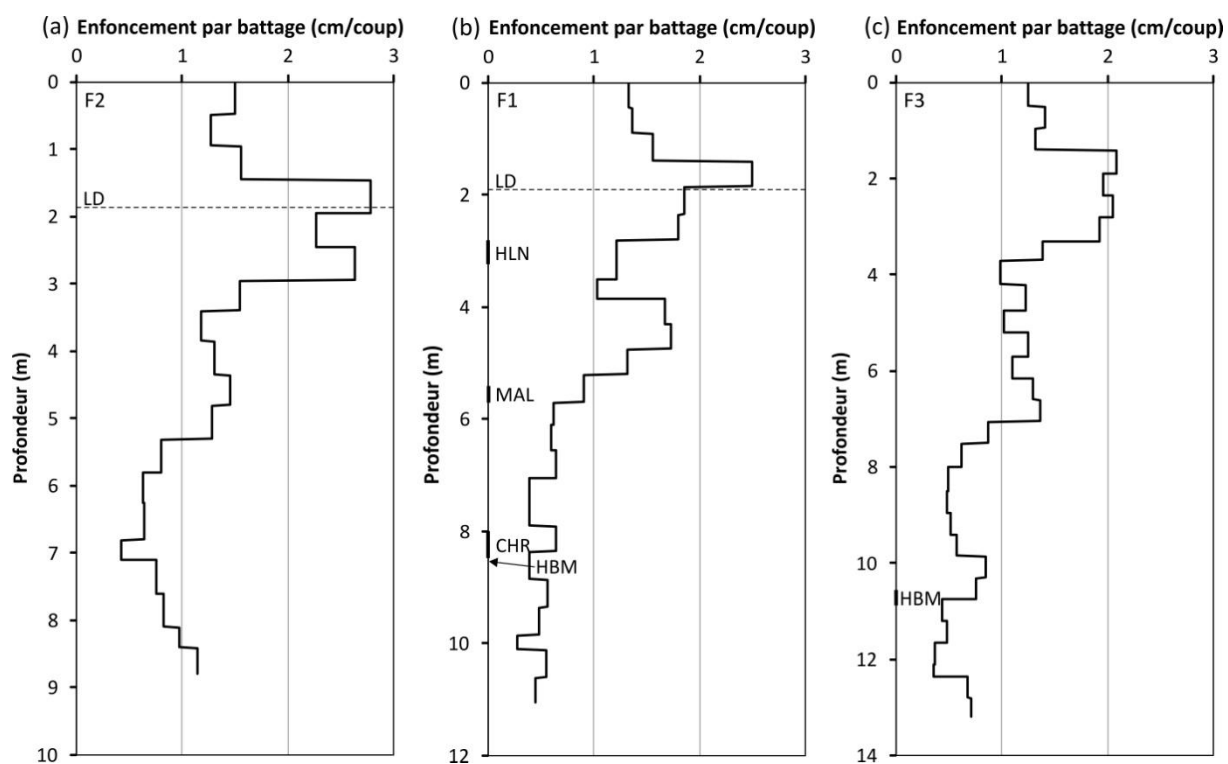
Les coordonnées géographiques sont mentionnées en Lambert belge 72.

Romont				Rocourt				Remicourt			
Essai	X (m)	Y (m)	Z (m)	Essai	X (m)	Y (m)	Z (m)	Essai	X (m)	Y (m)	Z (m)
CPTM1-1	239854,61	165281,86	112,95	CPTE-01	234404,03	151530,23	189,18	CPT01	220859,49	154543,69	129,12
CPTM1-2	239887,63	165305,96	112,56	CPTE-02	234396,20	151525,11	189,19	CPT02	220857,08	154544,36	129,11
CPTM1-3	239919,41	165333,19	112,56	CPTE-03	234397,01	151525,73	189,21	CPT03	220854,67	154545,02	129,11
CPTM2-1	239909,96	165338,96	112,53	CPTE-04	234388,28	151519,14	189,19	CPT04	220852,26	154545,69	129,1
CPTM2-2	239893,56	165313,93	112,7	CPTE-05	234380,65	151513,22	189,25	CPT05	220849,85	154546,35	129,1
CPTM2-3	239880,08	165299,36	112,74	CPTE-06	234385,16	151508,14	188,99	CPT06	220847,44	154547,02	129,09
CPTM2-4	239864,55	165273,98	113,07	CPTE-07	234392,19	151514,06	189,04	CPT07	220845,03	154547,68	129,09
CPTE-01	239856,88	165265,88	113,03	CPTE-08	234399,90	151519,61	189,00	CPT08	220842,62	154548,35	129,08
CPTE-02	239870,18	165280,72	113,11	CPTE-09	234407,91	151524,67	189,00	CPT09	220858,82	154541,27	129,15
CPTE-03	239877,26	165288,20	113,00	CPTE-10	234403,85	151513,95	188,68	CPT10	220856,41	154541,94	129,13
CPTE-04	239884,04	165295,28	112,86	CPTE-11	234396,84	151508,68	188,76	CPT11	220854	154542,6	129,12
CPTE-05	239890,91	165302,56	112,67					CPT12	220851,59	154543,27	129,11
CPTE-06	239897,50	165310,04	112,62					CPT13	220849,18	154543,93	129,1
CPTE-07	239904,38	165317,57	112,67					CPT14	220846,77	154544,6	129,09
CPTE-08	239911,67	165325,00	112,67					CPT15	220844,36	154545,26	129,08
CPTE-09	239925,34	165339,35	112,36					CPT16	220841,95	154545,95	129,07
ERT1S	239851,46	165258,37	112,99					CPT17	220858,15	154538,85	129,17
ERT1N	239937,43	165350,59	112,1					CPT18	220855,74	154539,52	129,09
ERT2S	239847,71	165261,44	112,87					CPT19	220853,33	154540,18	129,09
ERT2N	239933,96	165354,32	112,16					CPT20	220850,92	154540,85	129,08
ERT3S	239841,05	165266,93	112,79					CPT21	220848,51	154541,51	129,08
ERT3N	239928,45	165358,32	112,08					CPT22	220846,1	154542,18	129,07
F1	239888,92	165305,06	112,56					CPT23	220843,69	154542,84	129,07
F2	239868,18	165283,44	113,01					CPT24	220841,28	154543,54	129,06
F3	239909,61	165327,31	112,63								
F4	239871,13	165280,64	113,07								

ANNEXE 3 : RÉSULTATS DES TOMOGRAPHIES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE RÉALISÉES SUR LE SITE DE ROMONT (ÉBEN-ÉMAEL)



ANNEXE 4 : VITESSE D'ENFONCEMENT DU CAROTTIER LORS DE L'ÉCHANTILLONNAGE NON REMANIÉ SUR LE SITE DE ROMONT.



(a) Forage F2. (b) Forage F1. (c) Forage F3. Abréviations : CHR = Complexe Humifère de Rémicourt ; HBM = Horizon blanchi de Momalle ; HLN = Horizon à Langues de Nagelbeek ; LD = limite de décarbonatation ; MAL = Sol de Malplaquet.

## ANNEXE 5 : RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS ŒDOMÉTRIQUES

Ech.	Horizon	Prof. (m)	w (%)	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_1$ (-)	n (%)	$S_r$ (%)	$C_u$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s)	k (10 <sup>-8</sup> m/s)	$C_v$ (10 <sup>-2</sup> )	$C_c$ (10 <sup>-2</sup> )	A (-)	C (-)	$E_{ed, sec}$ (MPa)	$\sigma'_p$ (kPa)	OCR
F1-4	Bt holocène	1,63	20,77	18,32	15,17	27,14	0,79	44,0	73,0	26,7	5,6	0,71	16,0	578	26	5,1	139,6	4,6
F1-5	Limmon brabantien sous LD	2,10	16,36	18,52	15,92	26,58	0,67	40,2	66,1	24,0	8,6	2,96	8,9	130	42	9,5	141,3	3,6
F1-7	HLN	2,98	16,46	18,61	15,98	27,16	0,70	41,3	65,0	4,4	11,1	0,66	9,2	594	42	8,1	125,9	2,3
F1-12	Limmon sus-jacent à MAL	4,98	21,09	17,61	14,54	27,28	0,88	46,7	66,9	55,4	4,5	1,31	26,8	329	16	3,1	143,0	1,6
F1-18	Complexe stratifié inférieur	7,70	16,87	18,75	16,04	26,91	0,68	40,4	68,3	47,4	1,1	1,50	15,3	258	25	6,0	65,0	0,5
F1-19	CHR – partie haut	8,01	22,71	18,24	14,86	27,41	0,84	45,7	75,2	44,4	2,7	0,97	17,4	435	24	6,8	190,0	1,3
F1-19	CHR – partie bas	8,24	21,98	18,56	15,22	27,41	0,80	44,5	76,7	35,8	2,6	0,77	15,8	539	26	7,9	191,0	1,3
F1-20	Transition CHR et haut HBM	8,48	15,31	18,50	16,04	27,36	0,71	41,5	60,4	33,3	10,9	0,92	6,7	429	59	15,5	142,0	0,9
F1-20	Transition HBM et bas VSG-B	8,73	15,63	18,57	16,06	27,02	0,68	40,5	63,2	37,7	1,8	0,75	5,8	517	66	17,4	156,0	1,0
F1-21	VSG-B haut	8,98	19,75	19,73	16,48	26,91	0,63	38,8	85,6	8,6	4,4	0,98	6,7	383	56	21,5	234,4	1,4
F1-21	VSG-B bas	9,23	20,73	18,87	15,63	27,53	0,76	43,2	76,5	19,2	22,8	0,89	14,0	456	29	10,2	234,4	1,4
F1-25	Sous PR	10,80	11,9	20,63	18,44	26,52	0,44	30,4	73,5	17,6	6,2	0,53	6,0	623	55	34,2	380,2	1,9
F2-3	Bt holocène	1,20	21,4	18,00	14,83		0,82	45,2	70,1	37,2		2,05	19,1	205	22	6,8	53,2	2,4
F2-4	Bt holocène	1,70	17,9	17,07	14,48		0,87	46,4	55,4	19,3		N/A	N/A	N/A	N/A	8,4	N/A	N/A
F2-5	Limmon brabantien sous LD	2,20	13,2	17,29	15,27		0,77	43,6	46,3	16,6		1,01	14,5	403	28	8,1	N/A	N/A

# ANNEXE 6 : RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE L'ANALYSE À L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE

Abréviations utilisées dans le tableau :

DRX (diffractométrie des rayons X) : qtz = quartz ; calc = calcite ; chlo = chlorite ; arg = argiles ; FK = feldspath potassique ; plag = plagioclase ; dolo = dolomite ; amph = amphibole. Autres : SFX = spectrométrie de fluorescence des rayons X ; LOI = perte au feu ; C<sub>org</sub> = carbone organique ; mat. org. = matière organique.

Éch.	Horizon	Prof.	DRX											SFX										Carbo- nates	Mat. org.	C <sub>org</sub>
			qtz	calc	chlo	arg	mica	FK	plag	dolo	amph	SiO <sub>2</sub>	TI <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Σ	LOI			
F1-4	Br holocène	1.63	58.8	0.2	0.6	14.1	7.8	12.8	7.4	0.0	0.3	79.8	0.8	10.2	4.0	0.1	0.7	0.9	0.8	2.5	0.1	100	2.9	1.3	0.53	-
F1-5	Limon sous LD	2.10	51.6	8.1	0.7	14.8	6.9	6.1	7.4	4.0	0.3	76.2	0.7	8.7	3.4	0.1	1.2	6.7	0.8	2.1	0.1	100	7.0	10.4	0.53	0.14
F1-7	HLN	2.98	81.1	9.4	0.2	0.8	1.5	1.6	2.8	2.5	0.2	74.8	0.8	8.6	3.5	0.1	1.5	8.0	0.7	2.1	0.1	100	8.0	16.4	0.54	-
F1-9	Limon sous HLN	3.68	82.9	5.8	0.3	0.8	2.4	1.6	3.8	2.2	0.2	76.6	0.8	9.2	3.7	0.1	1.2	5.7	0.8	2.0	0.1	100	6.6	9.1	0.31	-
F1-10	Harveng ?	4.08	88.9	0.2	0.4	1.2	2.1	1.9	4.5	0.4	0.4	78.8	0.8	10.9	4.4	0.1	0.9	1.1	0.8	2.0	0.1	100	3.7	2.8	0.79	0.31
F1-11	Harveng ?	4.53	89.9	0.1	0.1	1.4	1.6	1.7	4.3	0.5	0.4	79.3	0.8	10.7	4.3	0.1	0.9	0.9	0.8	2.0	0.1	100	3.5	-	0.65	-
F1-12	Limon sus-jacent MAL	4.98	88.2	0.1	0.2	1.5	1.5	3.4	4.6	0.4	0.2	80.4	0.8	10.1	4.2	0.1	0.7	0.9	0.7	2.0	0.1	100	3.3	-	0.93	-
F1-14	Complexe inférieur	5.90	92.7	0.1	0.1	1.1	1.4	1.8	2.2	0.3	0.3	81.0	0.8	9.8	4.0	0.1	0.7	0.8	0.6	2.1	0.1	100	3.3	-	0.96	-
F1-16	Complexe inférieur	6.80	89.4	0.1	0.0	1.6	1.7	3.4	3.1	0.4	0.2	77.7	0.9	12.0	5.3	0.1	0.7	0.7	0.3	2.2	0.1	100	4.3	-	1.14	-
F1-18	Complexe inférieur	7.70	94.0	0.3	0.1	0.6	0.3	2.7	1.6	0.3	0.0	87.3	0.9	6.5	2.6	0.1	0.3	0.5	0.3	1.5	0.1	100	2.4	-	0.75	-
F1-19	CHR	8.13	92.6	0.2	0.1	0.6	0.3	2.1	3.7	0.3	0.1	87.1	0.9	6.9	2.2	0.1	0.2	0.6	0.4	1.7	0.1	100	3.2	-	1.23	0.69
F1-20	Transition haut HBM	8.48	94.3	0.1	0.1	0.4	0.3	2.4	2.2	0.3	0.1	88.9	0.8	6.0	1.6	0.0	0.1	0.4	0.4	1.6	0.0	100	2.2	-	0.70	-
F1-20	Transition bas VSG-B	8.73	93.4	0.1	0.1	0.7	0.4	2.4	2.3	0.5	0.1	87.5	0.9	6.8	2.0	0.1	0.2	0.4	0.4	1.7	0.0	100	2.3	-	0.58	0.22
F1-21	VSG-B haut	8.98	94.2	0.1	0.1	0.2	0.8	2.2	1.9	0.4	0.1	83.5	0.9	9.0	3.3	0.1	0.4	0.6	0.4	1.9	0.1	100	3.3	-	0.78	-
F1-21	VSG-B bas	9.23	91.8	0.2	0.1	1.0	0.8	2.3	3.0	0.8	0.1	81.7	0.9	9.9	3.9	0.1	0.5	0.6	0.4	2.0	0.1	100	3.7	-	0.94	0.18
F1-24	Base du PR	10.33	93.5	0.2	0.0	0.9	1.6	1.1	2.5	0.3	0.0	82.7	0.8	9.3	3.8	0.1	0.6	0.5	0.3	1.9	0.1	100	3.3	-	0.78	-
F1-25	Sous PR	10.80	95.3	0.1	0.2	0.5	0.3	2.4	1.0	0.2	0.2	91.0	0.6	5.2	1.6	0.0	0.1	0.2	0.0	1.2	0.0	100	1.9	-	0.40	-



# Lexique

Constitué à partir des références suivantes : Collas & Havard, 1982 ; Moureau & Brace, 2000 ; Baize, 2004 ; Mathieu & Lozet, 2011 ; Foucault *et al.*, 2014.

## **A (horizon ~)**

*Pédologie*

V. **horizon**

## **aciculaire**, adj.

*Géologie*

En forme d'aiguille.

## **artéfact**, n. m.

*Archéologie*

Objet, notamment outil préhistorique, fabriqué par l'homme.

## **B (horizon ~)**

*Pédologie*

V. **horizon**

## **Bh (horizon ~)**

*Pédologie*

**Horizon** pédologique **B** d'accumulation d'humus, de couleur brun noir.

## **bioturbation**, n. f.

*Pédologie*

Ensemble de dérangements dans un sédiment ou dans un sol dus à des déplacements d'organismes vivants.

## **Bt (horizon ~)**

*Pédologie*

**Horizon** pédologique où s'observe les propriétés de base du **B** sans qu'apparaissent clairement des caractères secondaires de transition vers les horizons sus-jacents ou sous-jacents. Il est caractérisé par un enrichissement en colloïdes argileux répartis notamment en revêtements orientés sur les faces des

agrégats structuraux. C'est donc un horizon **illuvial**.

Syn. : **B2t**

## **Bth (horizon ~)**

*Pédologie*

**Horizon** pédologique combinant les caractéristiques de l'horizon **Bt** et celles de l'horizon **Bh**.

## **calcarénite**, n. f.

*Géologie*

Roche sédimentaire essentiellement calcaire, formée en majorité d'éléments de 62,5  $\mu\text{m}$  à 2 mm.

## **calotte glaciaire**, n. f.

*Géologie*

V. **inlandsis**

## **cercle de Mohr**, n. m.

*Géotechnique*

Cercle représentant l'état des contraintes sur la surface de rupture d'un échantillon de sol soumis à un essai de cisaillement par compression triaxiale. L'ensemble des cercles de rupture correspondant à l'échantillon, tracés dans un repère orthonormé (contrainte de compression en abscisse, contrainte de cisaillement en ordonnée), constitue le diagramme de rupture de Mohr. La courbe enveloppe des cercles est la courbe intrinsèque souvent assimilée à une droite, appelée également **droite de Mohr-Coulomb**.

## **chernozem**, n. m.

*Pédologie*

Sol riche en matière organique profondément incorporée, à complexe

## LEXIQUE

saturé, à structure grumeleuse. La couleur est noire à brun très foncé.

### **coin de glace**, n. m.

*Pédologie*

Amas de glace généralement en forme de coin dont l'apex pointe vers le bas. S'accumule dans des fentes de contraction thermique et peut atteindre un développement vertical de plusieurs mètres. Ils se forment généralement dans des régions à **pergélisol** continu.

Syn. : **fente de cryodessiccation**

### **colonne ballastée**, n. f.

*Géotechnique*

Fût de graviers et de cailloux, mis en place et compacté dans un sol.

### **consolidation**, n. f.

*Géotechnique*

Réduction progressive de volume d'un sol résultant d'une augmentation de la contrainte de compression. On distingue successivement :

1. La compression initiale : tassement immédiat lors de l'application de la charge. Il résulte de la compression et de l'expulsion de l'air contenu dans les vides du sol.
2. La consolidation primaire : réduction de volume provoquée par une charge de longue durée. Elle est due essentiellement à l'expulsion progressive de l'eau contenue dans les pores du sol.
3. La consolidation secondaire : résulte du réajustement de la structure interne du sol après que la plus grande part de la charge lui ait été transmise.

### **contrainte**, n. f.

*Géotechnique*

Grandeur physique égale à une intensité de force par unité de surface sur laquelle elle s'applique.

### **cryoturbation**, n. f.

*Pédologie*

Déformation organisée de deux ou plusieurs matériaux de **gélivité** différente sous l'effet des alternances de gel et de dégel.

### **cryoturbé**, adj.

*Pédologie*

Qualifie un ensemble d'**horizons** pédologiques, dont certains ou tous ont été déformés par **cryoturbation**.

### **déflation**, n. f.

*Géologie*

Entraînement par le vent de matériaux fins et secs.

### **déflocculant**, n. m.

*Géotechnique*

Substance qui empêche les particules fines du sol en suspension dans l'eau de s'agglomérer entre elles.

### **discordance**, n. f. (~ stratigraphique)

*Géologie*

Manque de parallélisme entre deux formations successives. Une couche repose en discordance quand sa base paraît recouper la couche précédente. Une phase d'érosion ou de plissement sépare le dépôt des deux couches.

### **droite de Mohr-Coulomb**, n. f.

*Géotechnique*

Elle est déterminée par la courbe enveloppe des **cercles de Mohr** à la rupture. Elle correspond à la courbe intrinsèque souvent assimilée à une droite.

### **E (horizon ~)**

*Pédologie*

V. **horizon**

### **écliptique**, n. m.

*Géologie*

Plan de l'orbite terrestre autour du Soleil.

### **effective**, adj. (contrainte ~)

*Géotechnique*

Dans un sol saturé, contrainte due au seul poids des grains ; correspond à la contrainte totale moins la pression interstitielle.



**élasticité**, n. f.*Géotechnique*

1. Théorie basée sur l'hypothèse d'une relation linéaire et réversible entre la contrainte et la déformation correspondante.
2. Propriété d'un matériau qui retrouve sa forme ou sa condition initiale après que l'action ait cessé.

**éluviation**, n. f.*Pédologie*V. **lessivage****éluvié**, adj.*Pédologie*

Qualifie un **horizon** appauvri en argiles, en fer et en certaines autres substances par des processus pédogénétiques.

**faciès**, n. m.*Géologie*

Ensemble des caractères lithologiques et paléontologiques qui définissent un dépôt et révèlent en même temps les conditions dans lesquelles il s'est effectué.

**fente de cryodessiccation**, n. f.*Pédologie*V. **coin de glace****formation**, n. f.*Géologie*

Ensemble de strates formant une unité lithostratigraphique cartographiable à laquelle on associe un nom, généralement de lieu.

**fragipan**, n. m.*Pédologie*

Couche de sol, peu perméable car composée de limon très compact. Il semble témoigner de l'existence d'un pergélisol. Une définition plus complète est proposée par Van Vliet-Lanoë et Langhor (1981).

**gélifluxion**, n. f.*Pédologie*

Concerne le processus de **solifluxion** en climat froid, dans les zones périglaciaires,

l'eau imbibant le sol provient du dégel et non de la pluie.

**gélivité**, n. f.*Pédologie*

Capacité que possède un sédiment de développer une ségrégation de glace en lentilles et donc de gonfler en présence d'un gel lent et progressif.

**géotechnique**, n. f.*Géotechnique*

Ensemble des applications des connaissances concernant les propriétés des sols et des roches, et des ensembles géologiques, notamment en vue de la construction d'ouvrages.

**glauconie**, n. f.*Géologie*

Association de minéraux argileux à forte teneur en  $Fe^{3+}$ , appartenant à une série dont un pôle est de type smectite et l'autre de type mica glauconitique, du groupe de l'illite.

**glauconieux (se)**, adj.*Géologie*

Qui contient de la **glauconie**.

**gley**, n. m. (~ de toundra)*Pédologie*

Sol le plus fréquent en Haut Arctique reposant sur le **pergélisol**. Ainsi appelé par la présence d'un **horizon** à **pseudogley** très marqué, quasi continu en contact avec le pergélisol.

**glosse**, n. f.*Pédologie*V. **langue****glossique**, adj.*Pédologie*

Qualifie un ensemble d'**horizons** dans lequel la transition **E/Bt** ou **E/Bt** ou **A/Bt** prend la forme de **langues**.

**greyzem**, n. m.*Pédologie*

Sol ayant un **horizon A** caractéristique et n'ayant pas d'**horizon B**.

**horizon**, n. m.

*Géologie*

Niveau mince que l'on peut distinguer au sein d'une série sédimentaire ou au sein d'un sol.

*Pédologie*

Couche grossièrement parallèle à la surface du sol dont l'existence est reconnue par l'observateur. L'ensemble des horizons d'un sol manifeste l'anisotropie verticale du sol. Les horizons sont différents les uns des autres par leurs constituants, leur organisation et leur comportement. Différents horizons ont été définis par une lettre majuscule :

**A** : horizon mixte matière organique en mélange avec matière minérale ;

**E** : horizon de lessivage intense ;

**B** : horizon enrichi par illuviation ou d'altération intense ;

**C** : horizon minéral de profondeur très altéré ;

**R** : roche mère non modifiée.

**illuviation**, n. f.

*Pédologie*

Addition de matière dans un volume défini ou dans une structure originelle identifiée. Phénomène inverse d'**éluviation**.

**illuvié**, adj.

*Pédologie*

Qualifie un **horizon** enrichi suite à un apport de matériaux provenant des horizons sus-jacents. Les matériaux accumulés peuvent être de l'argile, du fer, de l'aluminium, de l'humus, des sesquioxydes, des carbonates, des sels solubles ou un mélange de deux ou plusieurs de ces matériaux.

**inlandsis**, n.m.

*Géologie*

Glacier recouvrant une surface continentale importante (quelques milliers de kilomètres carrés).

Syn. : **calotte glaciaire**

**krotovine**, n. f.

*Pédologie*

Galerie d'animal dans le sol.

**lamination**, n. f.

*Géologie*

Disposition des constituants d'une roche ou d'un sol en fines **lamines**.

**lamine**, n. f.

*Géologie*

Couche la plus fine reconnaissable dans un sédiment ou dans une roche sédimentaire, différente des autres par la couleur, la composition ou la taille des particules. En général, couche inférieure à 1 cm d'épaisseur.

**langue**, n. f.

*Pédologie*

Pénétration d'un **horizon** pédologique dans un autre le long des surfaces des unités structurantes. Ces pénétrations doivent être plus profondes que larges.

**lessivage**, n. m.

*Pédologie*

Entraînement mécanique d'argiles en suspension et, en moindre quantité, d'argile grossière et de limon fin le long des fentes et autres vides hors d'un volume défini ou d'une structure pour un temps conservée. Cet entraînement montre une diminution de la teneur en argile dans l'**horizon E** et un enrichissement dans l'**horizon B** où la teneur en argile fine est plus importante. Phénomène inverse d'**illuviation**.

**lessivé**, adj. (**horizon** ~)

*Pédologie*

**Horizon** appauvri suite au lessivage de ses constituants. L'**horizon E** est l'exemple type d'un horizon lessivé.

**loëss**, n. m.

*Géologie*

Une définition est développée au chapitre 3.

**luvisol**, n. m.*Pédologie*

Sol ayant un **horizon** argilique dont le taux de saturation en cations est d'au moins 50 % dans la partie inférieure de l'**horizon B**. Un luvisol manifeste une nette différenciation morphologique résultant d'une **illuviation** d'argile.

**marne**, n. f.*Géologie*

Roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'argile (pour 35 à 65 %), formant la transition entre les calcaires argileux et les argiles calcaires. Les marnes sont généralement moins compactes que les calcaires et moins plastiques que les argiles.

**paléosol**, n.m.*Géologie*

Sol qui s'est constitué anciennement dans des conditions différentes de celles de notre époque. Il peut avoir été recouvert par des sédiments ou des formations volcaniques, ou bien encore être visible en surface.

**passant**, n. m.*Géotechnique*

Pourcentage en poids du sol sec passant au travers d'un tamis de dimension donnée.

Syn. : **tamisat**.

**pédogenèse**, n. f.*Pédologie*

Processus de formation, de mise en place et d'organisation du sol, sous l'effet des agents du climat, de la faune et de la flore. Les mécanismes de la pédogenèse sont physiques (désagrégation des roches, érosion), chimiques (dispersion, précipitation, agglomération, lessivage, induration), biologiques (ameublissement, transport, accumulation). L'ensemble de ces mécanismes a pour résultat la formation des sols à partir du matériau initial et de la présence de matière organique.

**pendage**, n. m.*Géologie*

Angle entre une surface et un plan horizontal. Sa mesure est celle du plongement de la ligne de plus grande pente de cette surface. Le sens (ou direction) du pendage est la direction de cette ligne de plus grande pente, orientée vers le bas.

**pergélisol**, n. m.*Pédologie*

Couche du sol ou du sous-sol gelées en permanence entre la couche superficielle qui gèle en hivers mais dégèle en été (couche active) et la zone profonde (base du pergélisol) non gelée.

**plasticité**, n. f.*Géotechnique*

Aptitude de certains sols très fins à être déformés au-delà de leur limite élastique, sans fissuration ni changement de volume appréciable.

**pseudogley**, n. m.*Pédologie*

Qui ressemble à un **gley** mais où la réduction du fer est moins générale. Dans les sols hydromorphes, partie importante du profil soumise à la présence d'eau saturant la totalité des pores pendant une période plus ou moins longue de l'année.

**pulvérulent**, adj.*Pédologie, géotechnique*

Qualifie une structure farineuse en grains isolés, avec une cohésion très faible ou inexistante.

**raide**, adj.*Géotechnique*

Qualifie un matériau dont la caractéristique est d'être résistant à la déformation élastique.

**refus**, n. m.*Géotechnique*

Pourcentage en poids de sol sec retenu sur un tamis d'une taille donnée.

**régression**, n. f. (~ **marine**)*Géologie*

Retrait de la mer en deçà de ses limites antérieures avec émergence de zones plus ou moins vastes, dû soit à une baisse du niveau de la mer, soit à un soulèvement général du continent, soit à un apport important de sédiments. Plusieurs de ces phénomènes peuvent également se combiner entre eux. S'oppose à la **transgression marine**.

**sandur**, n. m. (pl. sandar)

*Géologie*

Nappe alluviale formée par des sables et des graviers étalés en avant d'un inlandsis.

**sol**, n. m.

*Géologie, pédologie, géotechnique, agronomie.*

Une définition est développée au chapitre 1.

**solifluxion** ou **solifluction**, n. f.

*Géologie*

Tout mouvement du sol en relation directe avec le franchissement des limites de liquidité ou de plasticité ou en relation indirecte avec le franchissement de ces limites par leur action sur la cohésion. Quand l'eau liquide provient du dégel, on parle de **gélifluxion**.

**steppe**, n. f.

*Pédologie*

Étendue végétale herbacée naturelle composée de plantes xérophiles.

**stratification**, n. f.

*Géologie*

Fait d'être composé de strates. Une stratification est d'autant mieux visible que les contrastes lithologiques entre les couches sont importants.

**stratotype**, n. m.

*Géologie*

Affleurement désigné comme référence d'une étage géologique.

**subautomorphe**, adj.

*Géologie*

Qualifie un minéral qui, bien que gêné par ses voisins lors de sa croissance, a pris, en

les repoussant, des formes proches de celles d'un cristal automorphe.

**succion**, n. f.

*Géotechnique*

Énergie potentielle s'appliquant dans les sols partiellement saturés, comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés.

**tamisat**, n. m.

*Géotechnique*

V. **passant**.

**téphra**, n. m.

*Géologie*

Dépôt formé d'un ensemble de matières éjectées lors d'éruptions volcaniques explosives et accumulées autour d'un centre éruptif.

**toundra**, n. f.

*Pédologie*

Formation végétale herbacée. Composée à plus de 99 % de plantes vivaces (graminées, petites plantes à fleurs, mousses, lichens) et de variétés d'arbres (saule polaire, saule réticulé, bouleau nain).

**transgression**, n. f. (~ **marine**)

*Géologie*

Avancée de la mer au-delà de ses limites antérieures avec submersion de zones plus ou moins vastes des parties basses des continents. Elle est due soit à une montée du niveau de la mer, soit à un enfoncement d'ensemble du continent. Ces deux phénomènes pouvant également se combiner entre eux. S'oppose à la **régression marine**.

**viscosité**, n. f.

*Géotechnique*

Propriété d'un fluide en mouvement, dont l'écoulement se trouve freiné par le frottement relatif des molécules.

