



Université de Liège

**Département de Géoressources, Géotechnologies
et Matériaux de Constructions (GeomaC)**

Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement

HGE-ULg

**Projet de recherche PIRENE
Rapport Final – Décembre 2004**

Composition de l'équipe HGE-ULg

Prof. Dr. ir A. Dassargues (directeur du projet)

Dr. ir S. Brouyère, ir H. Corbeau, ir. M. Dachy, ir. N. Gardin, ir Ph. Orban

TABLE DES MATIÈRES

1	<i>Objectifs de recherche de l'équipe</i>	5
2	<i>Thème A : Modélisation des nappes d'eau souterraine</i>	6
2.1	Contexte général et méthodologie de modélisation développée	6
2.2	Récolte et mise au format des données	10
2.2.1	Type de données à récolter	10
2.2.2	Mise au format des données	10
2.2.3	Synthèse des données récoltées	11
2.2.4	Possibilités de modélisation sur base des données actuellement encodées 14	
2.2.5	Lacunes relevées dans la caractérisation des eaux souterraines dans le bassin de la Meuse.....	14
2.3	Développements numériques de l'approche de modélisation des eaux souterraines 15	
2.3.1	Modèle conceptuel – discrétisation en sous domaines.....	15
2.3.2	Calcul des écoulements et du transport des solutés dans le code SUFT3D 17	
2.3.3	Interfaçage du code SUFT3D.....	24
2.4	Discrétisation spatiale du bassin de la Meuse en Région wallonne.....	31
2.4.1	Digitalisation de la géologie en Région wallonne et regroupement en unités hydrogéologiques.....	31
2.4.2	Découpage du bassin de la Meuse.....	33
2.4.3	Discrétisation et modélisation du bassin de la Meuse.....	36
2.5	Liaison avec les autres équipes..... Erreur ! Signet non défini.	
2.5.1	Considérations générales.....	Erreur ! Signet non défini.
2.5.2	Interactions avec l'équipe "modèle sol"	Erreur ! Signet non défini.
2.5.3	Interactions avec l'équipe du modèle intégré ..	Erreur ! Signet non défini.
2.5.4	Interactions avec les autres équipes	Erreur ! Signet non défini.
3	<i>Thème B Mise au point d'indicateurs quantité et qualité relatifs aux eaux souterraines</i>	82

3.1	Introduction	82
3.2	Synthèse bibliographique relative aux techniques d'analyse de tendances	83
3.3	Données disponibles pour des tests	85
4	<i>Thème C : Mise au point d'indicateurs hydrogéologiques relatifs aux ZHIB .</i>	85
	Annexe 1 Les principales formations du bassin de la Meuse et leur "degré" de caractérisation	86
	Annexe 2.1. Sous modèle Gaume: sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	91
	Annexe 3.1. Sous modèle "Ardenne Lesse": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	92
	Annexe 3.2. Sous modèle "Ardenne Ourthe": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	93
	Annexe 3.3. Sous modèle "Ardenne Semois": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	94
	Annexe 3.4. Sous modèle "Ardenne Amblève": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	95
	Annexe 3.5. Sous modèle "Ardenne Vesdre": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	96
	Annexe 3.6. Sous modèle "Ardenne Meuse amont droit": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	97
	Annexe 3.7. Sous modèle "Ardenne Meuse amont gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	98
	Annexe 4.1. Sous modèle Massif Vesdre": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	99
	Annexe 5.1. Sous modèle "Synclinorium Dinant droit": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau	100
	Annexe 5.2. Sous modèle "Bord nord Synclinorium Dinant gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau.....	101

Annexe 5.3. Sous modèle "Bord sud Synclinorium Dinant gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau..... 102

Annexe 6.1. Sous modèle "Synclinorium Namur": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau 103

1 Objectifs de recherche de l'équipe

Du point de vue des eaux souterraines, le projet PIRENE vise à réaliser une synthèse des données existantes, de compléter si possible les données manquantes ou, le cas échéant, de les approximer par similitude avec des structures équivalentes. Il s'agissait également de travailler au développement d'indicateurs utiles à la caractérisation de l'état qualitatif des eaux souterraines et de l'impact des eaux souterraines sur les zones humides.

Ce projet nécessite également de changer d'échelle de modélisation de manière à couvrir les milliers de km² de la Région Wallonne tout en intégrant les eaux souterraines dans le modèle global du cycle de l'eau. Un des buts poursuivis est notamment de mieux estimer l'infiltration efficace vers les eaux souterraines et de tenir compte des interactions rivières – nappes. En période d'étiage, les débits des rivières dépendent quasi exclusivement de l'alimentation par les réserves d'eau souterraine.

Le Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège a été chargé de la modélisation des nappes d'eau souterraine dans le bassin de la Meuse en Région wallonne. Dans un premier temps, il a fallu affiner la délimitation des principaux bassins hydrogéologiques et de mettre en évidence les différences existant avec les bassins hydrologiques et de réaliser un inventaire et une uniformisation des données disponibles (caractéristiques physiques et hydrogéologiques des différentes formations géologiques, conditions limites et sollicitations, ...). Sur base de cette synthèse, un modèle numérique des écoulements et du transport de solutés a été développé pour chacun des bassins considérés, en tenant compte de la qualité et de la quantité des informations disponibles.

Il s'agissait avant tout de modéliser l'évolution générale des eaux souterraines en termes de quantité et de qualité et des flux massiques d'éventuels contaminants dissous (nitrates, pesticides, ...) transitant par le milieu souterrain, entre la zone racinaire et les principaux exutoires (eaux de surface, points de prélèvement, ...). Ce type d'analyse correspond principalement à l'étude de l'impact à moyen et à long terme des pollutions diffuses sur la qualité des eaux.

Le présent rapport synthétise les travaux qui ont pu être réalisés au cours du projet, tenant compte des données effectivement disponibles.

2 Thème A : Modélisation des nappes d'eau souterraine

2.1 Contexte général et méthodologie de modélisation développée

Pour fournir des résultats corrects et suffisamment précis, les approches de modélisation traditionnellement utilisées en hydrogéologie requièrent des discrétisations spatiales suffisamment fines pour pouvoir reproduire la variabilité des propriétés du milieu souterrain et pour respecter certains critères de précision et de stabilité des calculs numériques. Dans le cadre de ce projet, il existe deux alternatives : (1) représenter l'ensemble de la Région Wallonne par un seul modèle, au prix de l'utilisation d'une discrétisation très grossière (mailles de l'ordre du km² au minimum), (2) développer un modèle par bassin hydrogéologique, au prix d'un nombre relativement important de modèles, difficiles à faire fonctionner simultanément au sein du module intégré. De manière pragmatique, l'approche retenue doit se situer entre ces deux extrêmes. Il s'agit de développer un nombre limité de modèles utilisant des discrétisations spatiales peu raffinées mais adaptées à la géométrie et à l'hétérogénéité des réservoirs et de disposer d'un code de calcul optimisé en terme de gestion mémoire et temps d'exécution. Ce choix demande l'examen de quelques points complémentaires tels que la détermination et le sens physique des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs à l'échelle de travail considérée, le sens physique des résultats, la méthodologie de calibration et de validation, ...

La Région Wallonne est caractérisée par une grande variété des contextes géologiques et hydrogéologiques, allant des aquifères composés de matériaux granulaires (sables bruxelliens, graviers de Meuse, ...) aux bassins karstiques (calcaires éodévoniens, ...) en passant par des aquifères de fissures (calcaires, grès, craies, ...). Elle peut être subdivisée en plusieurs bassins hydrogéologiques pour lesquels la quantité et la qualité des informations disponibles sont extrêmement variables (conditions géologiques et hydrogéologiques, densité des points de mesure et d'observation, études réalisées, ...) et généralement mal distribuées dans l'espace et dans le temps. De plus, elles sont souvent incomplètes en vue d'une utilisation à des fins de modélisation. Par exemple, on a pu constaté l'absence de positionnement ou de nivellement pour un nombre élevé d'ouvrages (puits, piézomètres, ...) ce qui limite fortement leur utilisation pour la réalisation de cartes piézométriques et pour la calibration de modèles. De nombreuses données sont disponibles pour certains bassins comme celui du Geer où l'aquifère des craies du Crétacé est exploité depuis de nombreuses années par les compagnies d'eau (CILE, SWDE, VMW) et où l'agriculture est intensive. Cela a conduit à la réalisation de nombreuses études scientifiques et techniques de caractérisation de

cette nappe et d'évaluation de l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines. Par contre, pour de nombreux autres bassins, un important travail de caractérisation reste à mener, tant en termes de quantité que de qualité des eaux souterraines. C'est le cas, par exemple, de la plupart des bassins calcaires du Synclinorium de Dinant (Molignée, Sanson, Bocq, Hoyoux, Néblon...), pour lesquels il est difficile à ce stade d'établir des bilans hydrogéologiques suffisamment précis, notamment en cas de pertes d'eau vers d'autres bassins. Enfin, les sources de données sont très dispersées, au sein des administrations, intercommunales, compagnies d'eau, entreprises, particuliers, Il se pose donc un problème crucial en matière d'acquisition et de gestion des données relatives aux aquifères de Wallonie.

L'échelle de travail totalement inhabituelle du projet, alliée à la grande disparité dans la qualité et la quantité de données disponibles, font qu'il est malaisé de définir une méthodologie uniforme en vue d'aborder la modélisation des bassins hydrogéologiques en Région wallonne. Dans le cas où peu de données sont disponibles, on ne peut envisager qu'une modélisation très simplifiée utilisant des ordres de grandeur pour des paramètres d'écoulement et de transport définis en nombre limité, dans l'attente d'une caractérisation plus poussée. A l'opposé, pour les bassins où un grand nombre de données sont disponibles (par exemple une densité élevée de mesures piézométriques), il est nécessaire de recourir à l'agrégation des données, au sein de zones prédéfinies dans le bassin modélisé.

Dans un cas comme dans l'autre, il est illusoire d'espérer obtenir des réponses, même en terme de tendances, à des problèmes très locaux (pollutions ponctuelles etc). Il est par ailleurs préférable de travailler avec un outil numérique « unique » (même code de calcul) en assurant au sein de celui-ci la possibilité de passer d'une approche simplifiée (de type « boîte noire ») à une approche plus détaillée le jour où l'acquisition de nouvelles données le permettra, sans remettre en cause les résultats déjà acquis. L'approche conceptuelle, mathématique et numérique doit donc s'adapter à la quantité d'informations disponibles, au degré de caractérisation atteint au sein de chaque sous-bassin et aux caractéristiques hydrogéologiques locales. Partant de ces constats, une méthodologie générale de travail a été élaborée. Celle-ci est schématisée à la Figure 1 et expliquée ci-dessous.

Pour la gestion et le traitement des données, la solution adoptée est le recours à l'utilisation conjointe d'une banque de données hydrogéologiques (BDH) et d'un système d'information géographique (SIG). La BDH permet l'encodage progressif et de manière organisée des données disponibles, leur analyse et traitement, ainsi que l'utilisation de

requêtes pour extraire les informations nécessaires à la réalisation du modèle mathématique. La BDH permet donc d'organiser de manière optimale les données de types tabulaire et numérique (évolutions piézométriques, historiques de débits captés, logs géologiques, ...). Le SIG permet de gérer, visualiser et traiter les données spatialement distribuées (limites de bassins, formations géologiques, réseau hydrographique, ...). Par les liens possibles entre la BDH et le SIG, ce dernier sert également à représenter et organiser les informations spatiales localisées dans la banque de données (positionnement des ouvrages, ...).

Les deux outils (SIG et BDH) servent ensuite à préparer une série de couches d'informations exportées vers le logiciel Groundwater Modeling System® (GMS) utilisé comme pré- et post- processeur du code SUFT3D développé par notre équipe, qui correspondra au modèle PIRENE-ESO. Les couches thématiques d'informations (« shapefiles ») créées à l'aide du SIG (limites géologiques, distribution spatiale des ouvrages, ...) sont importées à l'aide du module d'interactivité SIG de GMS (« Map Module »). Parallèlement, des informations associées aux ouvrages (évolutions de niveaux d'eau, débits prélevés, ...) sont directement importées dans GMS à partir de la BDH. A partir de la BDH, les éléments descriptifs de la géologie (logs de forage, sondages géotechniques ou autres, ...) peuvent également être importés dans un module de GMS (« Borehole Module ») permettant la visualisation et l'utilisation de ce type de données pour la construction du modèle. L'importation de toutes les informations et données nécessaires au sein de GMS permet l'élaboration et la gestion du modèle conceptuel en vue de développer ultérieurement le modèle numérique écoulement – transport PIRENE-ESO, à l'aide du code SUFT3D. Au stade du modèle conceptuel, aucune discrétisation n'est établie et aucun choix n'est fait en termes de types d'équations ou de méthodes de résolution adoptés pour les calculs.

Les principales étapes de l'élaboration du modèle conceptuel sont les suivantes :

1. la définition de la géométrie du problème : extension spatiale et verticale, définition des entités géologiques devant être explicitement considérées ;
2. la définition des types de conditions limites prévalant aux frontières (internes et externes) du domaine et des conditions initiales prévalent au sein du domaine.
3. la détermination des sollicitations (pompages, recharge, ...) appliquées au domaine.
4. la détermination des mesures et observations qui permettront ultérieurement la calibration du modèle.

Une fois la discrétisation établie et les fichiers d'entrée du code de calcul construits, la

simulation des écoulements et du transport des contaminants peut être réalisée. Les fichiers de sortie des simulations réalisées avec le code SUFT3D sont adaptés aux formats de GMS, les résultats peuvent être examinés au sein de ce logiciel. Ceci permet d'évaluer d'un essai à l'autre la qualité de la calibration obtenue par comparaison avec les observations et mesures disponibles importées au sein du « Map Module » et de présenter les résultats finaux, voire d'exporter ces résultats en vue de les traiter à l'aide du SIG.

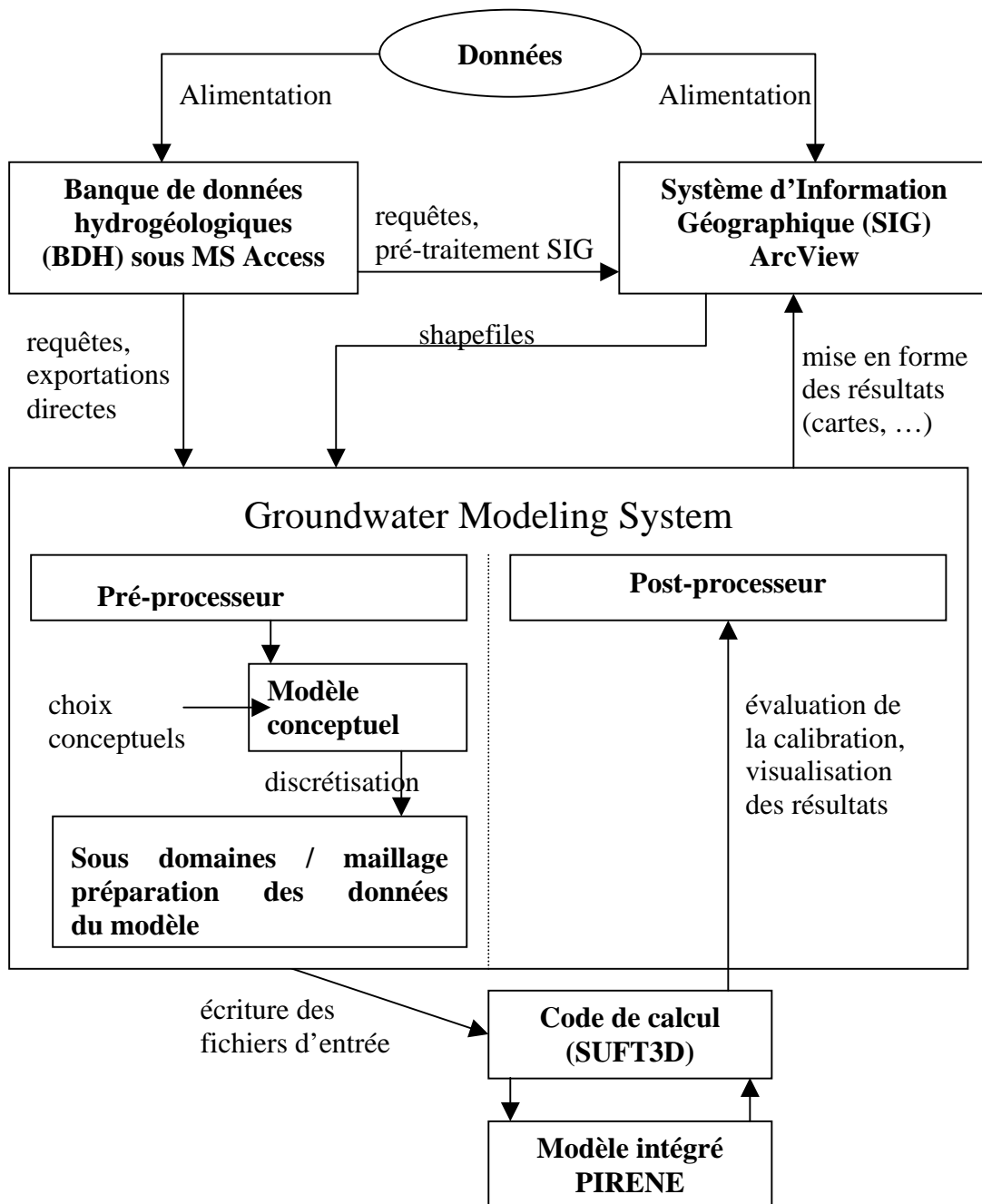


Figure 1. Méthodologie générale développée en vue de la modélisation des eaux souterraines dans le bassin de la Meuse en Région wallonne.

2.2 Récolte et mise au format des données

La réalisation des modèles hydrogéologiques nécessite l'acquisition d'un grand nombre de données. Comme présenté au paragraphe 2.1, suivant leur caractère tabulaire ou spatialement distribué, elles sont respectivement introduites dans la banque de données ou le SIG. Comme convenu au commencement du projet PIRENE, les demandes de données devaient transiter par l'équipe de coordination du projet PIRENE. Suite aux difficultés rencontrées en suivant cette procédure, des contacts bilatéraux ont été établis entre l'équipe HGE-ULg et certains détenteurs de données, ce qui a permis le transfert des premiers lots de données.

La principale difficulté rencontrée lors de la récolte des données réside dans le fait qu'à ce jour, aucun travail de centralisation et d'uniformisation des données n'a été achevé. Les données sont détenues sous les formats les plus divers par de multiples organismes, parmi lesquels figurent notamment le Service des Eaux Souterraines de la DGRNE et d'autres administrations de la Région wallonne, les producteurs d'eau, les propriétaires privés d'ouvrages de captage, les services universitaires, le Service Géologique etc.

Après un rappel relatif aux types de données nécessaires au développement du modèle eau souterraine et une description du travail de mise en format des données et d'adaptation d'une banque de données aux besoins du projet PIRENE, une synthèse des données récoltées au cours du projet sera présentée.

2.2.1 Type de données à récolter

La réalisation de modèles écoulement - transport en milieu souterrain nécessite la collecte de quatre catégories de données:

- Données relatives à l'extension des structures géologiques
- Données relatives aux paramètres hydrogéologiques
- Données relatives aux sollicitations exercées sur le système aquifère
- Mesures de hauteurs piézométriques, de flux, de concentrations

Pour plus d'information concernant la description du type de données à récolter, le lecteur est invité à se référer au rapport d'activité de l'équipe HGE-ULg pour la période novembre 2001 à octobre 2002.

2.2.2 Mise au format des données

Les données recueillies se trouvent sous divers formats, allant du document papier au fichier électronique. Un travail important d'uniformisation de ces données doit donc être

réalisé.

Comme expliqué dans la méthodologie (cf. § 2.1), il a été décidé d'utiliser une banque de données pour gérer les données tabulaires et numériques. Actuellement, le Service des Eaux Souterraines de la DGRNE procède à la mise à jour de la structure d'une banque de données hydrogéologiques utilisée pour plusieurs projets parmi lesquels la réalisation des cartes hydrogéologiques de la Région wallonne. L'équipe PIRENE HGE-ULg a été conviée par le Service des Eaux Souterraines de la DGRNE à participer au développement de la structure de cette banque de données, en collaboration avec les autres équipes élaborant les cartes hydrogéologiques. Afin de rendre cette structure compatible avec les objectifs de développement du modèle PIRENE, deux principales modifications ont été apportées à la structure de la banque de données :

- Ajout de nouveaux types d'ouvrages;
- Ajout de tables décrivant les essais de pompage et de traçage

Pour plus d'information concernant ces modifications, le lecteur est invité à se référer au rapport d'activité de l'équipe HGE-ULg pour la période novembre 2001 à octobre 2002.

2.2.3 Synthèse des données récoltées

En pratique, les données collectées et encodées au cours du projet PIRENE ont été les suivantes :

- Données provenant des cartes géotechniques de la région liégeoise,

Les cartes géotechniques réalisées dans les années 70 et 80 par l'Université de Liège présentent l'inventaire et la synthèse des données de forages, d'essais géotechniques et de prospections géophysiques réalisés sur le territoire de la région liégeoise. Malgré le nombre important de données (quelques 3500 fiches encodées), ces informations ne concernent qu'une portion très restreinte du territoire de la Région wallonne.

Les fiches (papier) associées à ces cartes reprennent la localisation de tous ces essais et forages ainsi qu'une description de la structure et de l'extension verticale des couches géologiques rencontrées. A l'exception de quelques estimations des niveaux piézométriques, ces fiches associées aux cartes géotechniques contiennent peu d'informations hydrogéologiques.

- Données provenant de la base de données "10-sous" du Service des Eaux Souterraines de la Région wallonne,

Le Service des eaux souterraines a fourni à l'équipe HGE-ULg les données disponibles au sein de la base de données "10-sous". Celle-ci est utilisée par l'Administration (DGRNE, Direction des Eaux Souterraines et Direction de la taxe) pour recenser les prises d'eau déclarées ainsi qu'un nombre limité de leurs caractéristiques (principalement celles intervenant dans les dossiers d'autorisation de prises d'eau). Elle a essentiellement pour but le prélèvement de la taxe liée aux ouvrages de prises d'eau et l'octroi des autorisations de prises d'eau.

Outre les renseignements se rapportant aux titulaires et aux exploitants des ouvrages, elle contient, occasionnellement, des informations plus détaillées telle qu'une description de l'ouvrage (localisation, nature, équipement, géologie,...), un historique des volumes prélevés et des mesures de niveaux piézométriques. L'information contenue dans "10-sous" a donc permis d'identifier la majorité des ouvrages de prises d'eau. Par contre, certaines données se sont révélées imprécises, notamment en ce qui concerne la localisation des puits (lorsque les coordonnées géographiques ne sont pas connues, l'ouvrage est simplement "positionné" au centre de la commune). Un important travail de repositionnement et de nivellement des ouvrages tels que des puits et piézomètres reste donc à faire en Région wallonne.

Il est à noter que la banque de données "10-sous" ne contient aucune information relative aux paramètres hydrogéologiques.

- Données provenant des cartes hydrogéologiques,

La DGRNE et le Service des Eaux Souterraines de la Région wallonne ont confié à quatre équipes universitaires (FUL, FUNDP, FPMs, ULg) la réalisation des cartes hydrogéologiques de Wallonie. Une partie importante de ce travail consiste à récolter les données disponibles afin de décrire au mieux le contexte hydrogéologique des zones cartographiées. A cette occasion, les puits et piézomètres existants sont localisés plus précisément et décrits. Les historiques des débits prélevés et des mesures piézométriques disponibles sont collectés et mis à jour.

Sur le territoire couvert par chaque carte, l'ensemble des données existantes peuvent être considérées comme collectées. Cela ne signifie évidemment pas que ces données sont suffisantes pour caractériser correctement un aquifère ou pour réaliser un modèle. A ce stade, quarante-six cartes au 1/25.000 ont été réalisées, couvrant une partie réduite de la Région wallonne.

- Données provenant du projet MOHISE,

De 1996 à 2000, les LGIH de l'Université de Liège ont participé au projet de recherche MOHISE (MOdèle Hydrologique Intégré pour la Simulation du cycle de l'Eau) financé par les SSTC. Au cours de ce projet, les données hydrogéologiques relatives aux bassins du Geer et de l'Orneau avaient été collectées. Un travail d'actualisation et d'encodage de ces données a été effectué.

- Données provenant des principaux producteurs d'eau en Région wallonne,

Au cours de la période 2002-2003, les principaux producteurs d'eau en Région wallonne ont été contactés. Devant la quantité de données disponibles et la difficulté de les mettre dans un format adéquat en un temps raisonnable, des choix ont dû être effectués. Il a été décidé de mettre la priorité sur l'actualisation du jeu de données disponibles pour le bassin du Geer, de compléter et d'actualiser le jeu de données disponibles relatif au bassin du Hoyoux-Néblon et de compléter le jeu de données relatives aux sables du Bruxellien.

Durant l'année 2004, un effort important a été réalisé dans le but de généraliser le travail réalisé pour ces trois zones à l'ensemble du bassin de la Meuse. De plus, étant donné le nombre important de captages qui exploitent les aquifères dans ce bassin, il a fallu adopter une méthodologie qui permette de prendre en compte la plus grande partie des prélèvements effectués dans le bassin de la Meuse, tout en minimisant la quantité de données à recueillir. La démarche adoptée a été la suivante :

- extraire de la banque de données "10-sous" les ouvrages qui appartiennent au bassin de la Meuse;
- classer ces ouvrages en fonction des unités hydrogéologiques qu'ils exploitent;
- pour chacune des unités hydrogéologiques du bassin de la Meuse, le bilan des prélèvements (déclarés) a été réalisé pour les années 1998, 1999 et 2000 (ces années offrent les données les plus abondantes);
- pour chacune de ces années, les ouvrages ont été classés par ordre croissant et les prélèvements cumulés ont été calculés. Seuls les ouvrages dont les volumes captés cumulés représentaient 95 % de la production totale ont été retenus.

Au cours des années 1998, 1999 et 2000, les prélèvements moyens annuels (déclarés à la Région wallonne) réalisés dans le bassin représentaient un volume de $2,39 \times 10^8$ m³. Les prélèvements pris en compte pour la modélisation représentaient pour ces mêmes années un volume moyen annuel de $2,32 \times 10^8$ m³, soit 96,8 % du volume déclaré. Ces prélèvements sont

réalisés par 492 ouvrages de tous types (sources, puits forés, exhaures de carrière,...).

De façon à préciser l'information sur les prélèvements réalisés par chacun de ces captages, les exploitants ont été contactés de façon à obtenir une description des ouvrages (principalement des intercommunales et des administrations communales, parfois des industriels). Etant donné le peu de temps disponible pour effectuer ces opérations, il n'a pas été possible de recontacter les exploitants qui n'ont pas répondu à la demande initiale. L'ensemble des données ainsi obtenues ont été stockées dans la base de données PIRENE et utilisées dans les différents modèles. La phase de caractérisation des ouvrages sélectionnés mériterait d'être poursuivie ultérieurement.

Toutes ces données ont été encodées dans la banque de donnée hydrogéologique de la Région Wallonne qui a été restituée à la DGRNE.

2.2.4 Possibilités de modélisation sur base des données actuellement encodées

Au cours de la dernière année du programme PIRENE, l'équipe de coordination a choisi de privilégier le développement du modèle intégré plutôt que la poursuite de la collecte des données. Le travail de collecte des données (notamment auprès des compagnies de production d'eau) a donc été suspendu. Dans l'état actuel des connaissances et sur base des données encodées, les possibilités de modélisation des eaux souterraines restent relativement limitées, même en ayant recours à des approches simplifiées. Un modèle a été développé et validé pour le bassin du Geer. Un modèle est en cours de développement et doit encore être validé pour les formations du Secondaire du Sud de la province de Luxembourg. Les résultats de la modélisation simplifiée du bassin du Hoyoux-Néblon, dont il est fait mention dans le rapport d'activité 2003-2004, ont été intégrés dans les simulations réalisées au cours de l'année 2004. Un modèle pourrait sans doute être développé et validé pour une partie du bassin de l'Orneau. La modélisation de tous les autres bassins nécessite une caractérisation préalable des ressources en eau souterraines dans ces bassins et, au minimum une poursuite de la collecte des données. Au stade actuel de connaissance et de collecte des données, seule une approche extrêmement simplifiée peut actuellement être envisagée, ces modèles ne pouvant être ni calibrés et ni validés.

2.2.5 Lacunes relevées dans la caractérisation des eaux souterraines dans le bassin de la Meuse

L'inventaire des données disponibles réalisé au cours de la première année du projet avait mis en évidence des lacunes dans les connaissances hydrogéologiques relatives à différents aquifères importants du bassin de la Meuse. Les aquifères du Synclinorium de

Dinant représentent l'exemple le plus marquant de cette carence: 21 % des prélèvements d'eau souterraine en Région wallonne y sont localisés, et pourtant aucune caractérisation hydrogéologique d'ensemble n'a, à ce jour, été réalisée pour cet ensemble d'aquifères. A l'initiative de HGE-ULg, un projet de caractérisation hydrogéologique du Synclinorium de Dinant a été déposé par trois équipes universitaires (HGE-ULg, FPMs, FUNDP) auprès de la DGRNE en vue de financer les travaux de terrain et d'analyse en laboratoire sur une durée de 3 ans.

L'annexe 1 propose de manière synthétique une évaluation du degré de caractérisation des différentes formations du bassin de la Meuse.

Pour plus d'information concernant les données disponibles pour les principaux aquifères du bassin de la Meuse, le lecteur est invité à se référer au rapport d'activité de l'équipe HGE-ULg pour la période novembre 2000 à octobre 2001

2.3 Développements numériques de l'approche de modélisation des eaux souterraines

Sur base de recherches bibliographiques réalisées durant la première année (cf. premier rapport annuel PIRENE), le code éléments finis SUFT3D, choisi comme outil de calcul pour la réalisation du modèle PIRENE-ESO, a été développé en vue de s'adapter aux objectifs généraux du projet en matière de modélisation des eaux souterraines. Les développements réalisés dans le code ont porté sur la programmation d'approches « simplifiées » de calcul des écoulements et du transport des solutés et sur le développement des conditions limites en vue des connections à réaliser ultérieurement avec les autres modèles. Par ailleurs, les performances de calcul du code SUFT3D ont été fortement améliorées par sa réécriture quasi complète en Fortran 90, en tirant parti des avantages de ce langage de programmation (allocation dynamique, modularité...).

2.3.1 Modèle conceptuel – discrétisation en sous domaines

Le modèle PIRENE-ESO doit couvrir l'ensemble de la Région Wallonne. Plusieurs éléments justifient l'adoption d'un découpage de base en sous modèles puis en sous domaines. Il est en effet possible de distinguer plusieurs bassins pour lesquels les limites hydrogéologiques peuvent être établies de manière relativement intangible. De plus, on rencontre en Région Wallonne un nombre important de contextes hydrogéologiques très différents. Il est donc difficile d'envisager l'utilisation d'une approche conceptuelle, mathématique et numérique unique pour tous ces contextes. Par exemple, si les équations traditionnelles d'écoulement et transport en milieu poreux peuvent s'appliquer en milieu

granulaire, voire en milieu fissuré, il est peu défendable de vouloir appliquer ces mêmes équations dans des aquifères karstiques. De plus, au sein de ces aquifères, la complexité de la morphologie et la distribution spatiale des drains karstiques est souvent telle que l'on ne dispose pas de données suffisantes en vue d'une représentation explicite du réseau d'écoulement. Raisonnablement, on ne peut qu'y appliquer que l'une ou l'autre approche simplifiée. Dans d'autres types de milieux, le manque de caractérisation et de données peut également justifier le recours à des approches simplifiées. Enfin, en vue de faciliter la gestion par masses d'eau souterraine telle que requis par la Directive Cadre, il est utile de tenir compte du découpage adopté pour ces masses d'eau en Région Wallonne lors de l'étape de discrétisation.

Le point de départ du développement du modèle PIRENE-ESO est donc de diviser le domaine à modéliser en sous modèles et sous domaines représentant des entités hydrogéologiques distinctes, soit par leur caractère « isolé » des autres sous domaines (i.e., limites = crêtes hydrogéologiques), soit par leurs caractéristiques aquifères (karst, formations meubles, ...), soit encore en fonction de leur niveau actuel de caractérisation. Au sein de chaque sous domaine, la discrétisation sera adaptée au type d'approche mathématique et numérique envisagée. Cela peut aller de l'absence de discrétisation si l'on considère le sous domaine comme constitué d'une seule entité (par exemple, dans le cas de l'utilisation d'une fonction de transfert à une discrétisation détaillée si un modèle spatialement distribué est envisagé). Pour faciliter l'évaluation des échanges entre sous domaines (flux d'eau et de solutés), une correspondance parfaite est assurée entre les discrétisations aux frontières avec les sous domaines voisins. Au sein de chaque sous domaine, on définit le type d'approche mathématique utilisée pour le calcul des écoulements et du transport des contaminants, allant de la fonction de transfert simple à un modèle écoulement-transport traditionnel (v. suite).

Chaque sous domaine est susceptible d'échanger de l'eau et des solutés avec les sous domaines voisins auxquels il est hydrauliquement connecté et avec les autres compartiments du cycle de l'eau (recharge en provenance du modèle sol, échanges avec les rivières, alimentation des sources, ...). Ces échanges sont conceptualisés et intégrés mathématiquement par des conditions limites internes (conditions de Dirichlet ou conditions de Fourier, voir suite) dénommées "interfaces" entre sous domaines. Le découpage en sous domaines est également très utile quand il s'agit de tenir compte de l'impact sur les écoulements de la présence de formations géologiques d'épaisseur et de conductivité hydraulique faibles (aquitards...). C'est par exemple le cas du « Hardground » séparant les

deux niveaux aquifères crayeux en Hesbaye ou des marnes de Strassen au sein des formations du Sud-Luxembourg. Plutôt que de représenter explicitement ces couches d'épaisseur limitée, on les représente implicitement par une interface entre deux sous-domaines (lesquels représentent les deux formations aquifères séparées par ce niveau aquitard ou aquiclude). Cela permet de ne pas multiplier le nombre d'inconnues et d'éviter la présence d'éléments fortement distordus au sein du maillage.

2.3.2 Calcul des écoulements et du transport des solutés dans le code SUFT3D

2.3.2.1 Concepts généraux

Dans sa version originale, le code SUFT3D résout les équations d'écoulement et d'advection-dispersion en milieu poreux variablement saturé en eau. Ces équations générales sont applicables dans de nombreux contextes. Toutefois, elles requièrent un nombre relativement important de paramètres, dont la détermination expérimentale demande un degré avancé de caractérisation de l'aquifère. De plus, comme mentionné précédemment, ces équations ne sont pas toujours applicables. Dans ces cas, des approches simplifiées sont vraisemblablement mieux adaptées. Enfin, à grande échelle, le calcul du transport à l'aide de l'équation d'advection-dispersion pose fréquemment des problèmes numériques difficilement surmontables. Soit on utilise un maillage très raffiné ce qui risque de conduire à des temps de calcul prohibitifs, soit on cherche une approche simplifiée, de précision moindre mais acceptable vis-à-vis des objectifs poursuivis dans ce projet.

Suite aux recherches bibliographiques entreprises durant la première année (cf. rapport annuel d'octobre 2001), les approches existantes pour modéliser les écoulements et le transport à grande échelle avaient été recensées et classifiées en deux grandes catégories : les modèles de type fonction de transfert, pour lesquels aucune distribution spatiale des paramètres n'est envisagée et les modèles à paramètres distribués, reposant sur une discrétisation spatiale du domaine. Au sein de cette classification, on peut encore distinguer plusieurs sous-catégories en fonction de la conceptualisation mathématique du modèle d'écoulement ou de transport. Celles-ci peuvent aller de la simple fonction de transfert non paramétrique, voire non physique, au modèle physiquement basé, reposant sur des principes élémentaires, telle que la conservation de la masse d'eau et de soluté.

Une sélection a été opérée parmi ces modèles en vue de développer les possibilités de résolution avec le code SUFT3D. Le Tableau 1 synthétise les différents modèles retenus pour le calcul des écoulements et du transport de contaminants au sein de chaque sous-domaine, ainsi que la compatibilité entre ces approches. Les concepts mathématiques et numériques qui

en découlent sont décrits par la suite.

		TRANSPORT		
		<i>Réservoir linéaire simple</i>	<i>Modèle de mixage distribué</i>	<i>Advection-dispersion</i>
ÉCOULEMENT	<i>Réservoir linéaire simple</i>	OK	impossible	impossible
	<i>Réservoir linéaire distribué</i>	OK	OK	impossible
	<i>Écoulement en milieu poreux</i>	OK	OK	OK

Tableau 1. Modèles mathématiques retenus en vue de la construction du modèle PIRENE-ESO

Comme mentionné dans le rapport 2001, les modèles de réservoir linéaire supposent que les caractéristiques à la sortie du système aquifère sont liées linéairement au comportement moyen du réservoir, lequel est supposé être constitué d'une seule entité (le volume de mélange ou de mixage). Dans la continuité entre le modèle réservoir linéaire simple et le modèle d'écoulement en milieu poreux hétérogène, le modèle réservoir linéaire distribué a également été retenu. Cette continuité garantit que, si des données ultérieures viennent compléter et améliorer la connaissance relative aux bassins provisoirement représentés de manière simplifiée, on puisse sans aucun problème passer à un mode de résolution plus précis. Il faut encore remarquer que l'utilisation d'un modèle « simplifié » pour le calcul des écoulements entraînera de facto l'utilisation d'un modèle de transport de complexité inférieure ou égale à celle du modèle écoulement. Par exemple, si on emploie le modèle de réservoir linéaire simple pour représenter un bassin karstique, il ne sera pas possible d'y calculer le transport en utilisant l'équation d'advection-dispersion puisque la distribution spatiale des flux d'eau demeure inconnue au sein de ce sous domaine. A contrario, si les données disponibles pour un bassin permettent un calcul relativement détaillé des écoulements mais pas du transport, on pourra imaginer d'appliquer l'équation d'écoulement en milieu poreux et de coupler à cela un modèle de réservoir linéaire pour le transport en ne retenant de l'écoulement que le bilan des flux calculés à travers les frontières et le volume global d'eau présent au sein du sous domaine.

2.3.2.2 Utilisation du maillage éléments finis

Chaque sous domaine est discrétisé en cellules caractérisées par un volume de

mélange et des flux d'échange avec les autres cellules composant ce sous domaine, des cellules d'autres sous domaines ou les autres compartiments du cycle de l'eau. Dans le cas de l'utilisation d'un modèle écoulement ou transport spatialement distribué, la discrétisation du sous domaine en éléments finis est explicitement considérée dans les calculs.

Pour les modèles de type réservoir distribué, les approches traditionnelles reposent sur des discrétisations spatiales (cellules) relativement simples, telles que des mailles parallélépipédiques (de type maillages différences finies) qui, si elles permettent de simplifier les travaux de discrétisation et le calcul des flux échangés, présentent néanmoins l'inconvénient de ne pas pouvoir facilement s'adapter à des géométries complexes telles qu'on les rencontre souvent en hydrogéologie.

Ici, l'approche est adaptée à une discrétisation spatiale complexe (maillages non structurés), de type éléments finis, en tirant parti de la formulation des éléments finis avec volume de contrôle (méthode CVFE). Outre la souplesse du maillage, cette méthode permet de définir de manière très simple et élégante les volumes de mélange associés à chaque point de calcul et les flux d'échanges entre les différents volumes de mélange considérés (donc entre les différents points de calcul), tout en reposant strictement sur le principe de conservation de la masse au sein du schéma numérique dérivé des équations.

Par contre, pour utiliser un modèle de réservoir linéaire simple, il faut ramener le sous domaine à un seul réservoir. Pour cela, tous les éléments situés dans le sous domaine doivent être groupés, une seule inconnue étant appliquée à l'ensemble. La discrétisation éléments finis créée au sein du sous domaine est alors uniquement utilisée pour définir les frontières du réservoir, ses interactions avec les sous domaines voisins et pour calculer le volume global du réservoir linéaire comme la somme des volumes effectifs associé à chaque maille du sous domaine. Ultérieurement, la discrétisation du sous domaine pourra le cas échéant être utilisée lorsque de nouvelles données permettront de mieux y caractériser les écoulements ou le transport, donc d'y appliquer un modèle mathématique plus élaboré.

Le code de calcul repose sur l'évaluation d'un terme de stockage au sein d'un ou plusieurs volumes prédéfinis et de termes de flux échangés entre ces volumes. Si le besoin s'en fait sentir, la programmation de n'importe quel type de fonction de transfert devrait pouvoir être envisagée sans trop de difficultés. Cette fonction de transfert se substituerait au calcul du flux entre les deux points considérés comme l'entrée et la sortie du système. Toutefois, le sous domaine serait alors assimilé à une boîte noire pure et simple et on perdrait

l'information sur l'état des écoulements et du transport à l'intérieur du système.

Par la suite, les concepts et la résolution mathématique et numérique des différentes approches considérées dans le code SUFT3D sont décrits.

2.3.2.3 Modélisation des écoulements dans le code SUFT3D

2.3.2.3.1 Modèle d'écoulement réservoir linéaire simple

Le modèle d'écoulement réservoir linéaire est conceptuellement très simple. Le bilan de masse en eau est écrit sur un réservoir aquifère unique. Mathématiquement, ce modèle exprime que le débit en eau sortant du réservoir varie linéairement en fonction du niveau d'eau dans le réservoir,

$$Q_{res} = V_{res} \frac{\partial \theta}{\partial t} = S A_{res} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\alpha_{res} \bar{H} \quad (1)$$

où,

- V_{res} est le volume total du réservoir (L^3) ;
- θ est la proportion volumique d'eau dans le réservoir (-) ;
- S est le coefficient d'emménagement du réservoir (-) ;
- A_{res} est la surface du réservoir linéaire (L^2) ;
- \bar{H} est la hauteur d'eau moyenne dans le réservoir linéaire, donc la variable du problème (L)
- α_{res} est le coefficient de récession du réservoir linéaire (L^2T^{-1})

Sous cette forme, ce modèle est souvent utilisé par les hydrologues pour évaluer la récession des eaux souterraines en période de décrue prolongée, en vue de représenter la contribution des nappes (débit de base) dans les modèles hydrologiques. Vu les hypothèses simplificatrices très fortes qui le sous-tendent et les erreurs qui peuvent en découler dans l'évaluation du débit de base, ce modèle doit être utilisé avec prudence.

Il est possible d'améliorer simplement ce modèle pour y incorporer un niveau de base de drainage du réservoir (H_b) et un terme source/puits volumique éventuel Q (L^3T^{-1}),

$$S A_{res} \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\alpha_{res} (\bar{H} - H_b) + Q \quad (2)$$

2.3.2.3.2 Modèle d'écoulement réservoir linéaire distribué

On peut également connecter plusieurs réservoirs linéaires en série, auquel cas, le terme H_b est remplacé dans l'Equation (2) par le niveau d'eau dans le réservoir connecté à celui pour lequel on calcule le bilan. On peut donc généraliser l'Equation (2) sous la forme,

$$\frac{\partial V_{w,I}}{\partial t} = V_{res,I} \frac{\partial \theta_I}{\partial t} = S A_{res,I} \frac{\partial H_I}{\partial t} = \sum_{J \in \eta_I} \alpha_{IJ} (H_J - H_I) + Q_I \quad (3)$$

où V_I (L^3) est le volume du réservoir I , $V_{w,I}$ est le volume d'eau contenu dans le réservoir I , θ_I est la proportion volumique d'eau dans le réservoir I , H_I (L) est la hauteur d'eau dans le réservoir I , les termes H_J (L) étant les hauteurs d'eau dans les cellules J hydrauliquement connectées à la cellule I , les termes α_{IJ} (L^2T^{-1}) étant les coefficients de transfert d'eau entre la cellule I et les cellules situées dans son voisinage η_I . Lors de l'utilisation de ce modèle distribué, l'Equation (2) pourra servir pour l'implémentation de la condition limite à l'exutoire du bassin.

2.3.2.3.3 Modèle d'écoulement en milieu poreux

L'équation d'écoulement 3D résolue en milieu poreux peut s'écrire,

$$F \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\underline{K} \cdot \nabla (h + z)) + q \quad (4)$$

Dans cette équation, F représente un coefficient d'emmagasinement spécifique généralisé (L^{-1}), \underline{K} est le tenseur de conductivité hydraulique du milieu souterrain, h est le potentiel de pression (L), z est le potentiel de gravité (L) et q (T^{-1}) est un terme source/puits volumique éventuel.

Dans le code SUFT3D, cette équation est résolue par l'application de la méthode « classique » des éléments finis ou par la méthode des éléments finis avec volume de contrôle ou méthode CVFE (Brouyère, 2001). Les détails relatifs à la discrétisation des différents termes sont fournis dans le rapport 2002.

2.3.2.4 Modélisation du transport dans le code SUFT3D

2.3.2.4.1 Modèle de transport réservoir linéaire simple ou de mixage simple

Toute substance dissoute migrant dans le sous-sol est soumise à l'effet des processus de dispersion hydrodynamique et à la dilution, entraînant un mixage progressif avec l'eau

présente au sein du milieu souterrain. L'hypothèse de mixage parfait consiste à supposer qu'au sein d'un volume prédéfini de milieu souterrain, le mélange entre l'eau initialement présente et l'eau qui y pénètre en véhiculant éventuellement un soluté est instantané et parfait. La concentration en soluté au sein du volume est donc supposée uniforme à tout moment, uniquement régie par le bilan en eau sur ce volume. Le même modèle permet sans difficulté de considérer que le mélange est partiel, en réduisant le volume de mixage considéré.

Mathématiquement, ce modèle s'exprime par un bilan de masse de soluté sur le volume de mélange, comme suit,

$$\frac{\partial(V_{eff, res} \bar{C})}{\partial t} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} \quad (5)$$

avec $V_{eff, res}$ le volume effectif (L^3) de mixage du réservoir, \bar{C} (ML^{-3}) la concentration moyenne dans le réservoir (inconnue du problème), Q_{in} et Q_{out} les débits (L^3T^{-1}) entrant et sortant du réservoir, auxquels sont associées des concentrations C_{in} et C_{out} (ML^{-3}).

La linéarité du réservoir s'exprime par le fait que la concentration dans le débit de sortie est égale à la concentration moyenne dans le réservoir,

$$C_{out, l} = \bar{C} \quad (6)$$

Le modèle de transport réservoir linéaire peut donc s'écrire,

$$\frac{\partial(V_{eff, res} \bar{C})}{\partial t} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} \bar{C} \quad (7)$$

On peut généraliser ce modèle au cas où les débits entrant et sortant sont multiples,

$$\frac{\partial(V_{eff, res} \bar{C})}{\partial t} = \sum_k Q_{in, k} C_{in, k} - \sum_l Q_{out, l} \bar{C} \quad (8)$$

Sous l'hypothèse de mixage parfait, le volume effectif de mélange $V_{eff, res}$ est égal au volume d'eau ($V_{eff, res} = V_{res} = SA_{res} \bar{H}$) alors que sous l'hypothèse de mixage partiel, il est limité à une partie du volume d'eau dans ce réservoir ($V_{eff, res} = \mu V_{res}$). Le coefficient μ est appelé coefficient de mixage ou d'efficacité de mélange.

2.3.2.4.2 Modèle de mixage distribué

Pour appliquer le modèle de mixage simple, il faut définir le volume de la cellule de

mélange et quantifier les flux d'échange (entrant et sortant) entre cette cellule et son environnement. En l'occurrence, cet environnement peut être composé d'autres cellules de mélange, auquel cas on peut parler de modèle de mixage distribué ou compartimenté (compartment mixing cell, en anglais).

Le modèle de mixage distribué repose sur l'écriture d'une équation de transport réservoir linéaire écrite sur chaque volume de mixage $V_{eff,I}$ défini dans le sous domaine. De manière générale, cette équation peut s'écrire,

$$\frac{\partial(V_{eff,I} C_I)}{\partial t} = \sum_{J \in \eta_I} Q_{IJ} C_{IJ} + Q_I C' \quad (9)$$

où $V_{eff,I}$ est le volume de mixage (L^3) associé à la cellule I , les termes Q_{IJ} (L^3T^{-1}) sont les débits échangés entre le volume I et les volumes J mitoyens à I , les termes C_{IJ} (ML^{-3}) sont les concentrations associées aux débits échangés Q_{IJ} , C' (ML^{-3}) est la concentration associée au terme source/puits volumique Q_I (L^3T^{-1}).

L'originalité de l'approche repose sur la manière d'évaluer les éléments clés de cette équation : le volume de mélange $V_{eff,I}$ de la cellule, les débits échangés entre cellules Q_{IJ} et les concentration C_{IJ} dans les débits échangés entre cellules. En réalité, l'évaluation de ces termes est fonction de la formulation utilisée pour le modèle d'écoulement résolu préalablement.

2.3.2.4.3 Equation d'advection-dispersion en milieu poreux

L'équation d'advection-dispersion est celle qui était traditionnellement résolue par le code SUFT3D. Les schémas numériques actuellement implémentés (méthode de Galerkin et schéma SUPG) ne permettent pas d'envisager l'utilisation de cette équation à l'échelle du modèle PIRENE-ESO sans être confronté à des difficultés numériques. De plus, on a mentionné la difficulté d'obtenir des paramètres de transport (principalement des coefficients de dispersion) représentatifs à cette échelle. Il faut noter qu'une série de processus hydrodispersifs particuliers, tels que les effets d'eau immobile, la dégradation linéaire ou des lois de sorption à l'équilibre, utilisables avec l'équation d'advection-dispersion, restent utilisables avec le modèle de mixage distribué, la programmation de ce modèle ayant été réalisée de manière compatible avec leur prise en compte (v. rapport 2002).

2.3.2.5 *Conceptualisation et implémentation des conditions limites*

La définition des conditions limites permet la modélisation des transferts d'eau et de solutés aux frontières des sous domaines. Ces conditions limites sont appliquées à l'interface entre différents sous domaines (frontières « internes » du modèle ESO) ou entre les sous domaines et les autres compartiments du cycle de l'eau (frontières « externes » du modèle ESO).

En pratique, les conditions limites appliquées au modèle eaux souterraines viseront appliquer la percolation et le lessivage de solutés calculée par le modèle sol vers les nappes, les échanges bidirectionnels d'eau et de soluté entre les nappes d'eau souterraine et les eaux de surfaces (rivières et sources).

De manière générale, les conditions limites pouvant être considérées sont de trois types :

- les conditions de Dirichlet ou 1^{er} type : la variable d'état (hauteur d'eau ou concentration) est imposée sur une portion de la frontière ;
- les conditions de Neumann ou de 2^{ème} type : la dérivée spatiale de la variable d'état (flux d'eau ou flux massique) est imposée sur une portion de la frontière ;
- les conditions de Cauchy ou conditions mixtes ou conditions de 3^{ème} type : une relation entre la variable d'état et sa dérivée (en l'occurrence généralement une relation linéaire) est imposée sur une portion de la frontière.

Les choix conceptuels retenus pour la modélisation des conditions limites écoulement et transport avec le SUFT3D, au sein du modèle PIRENE-ESO ont été décrits en détails dans le rapport 2002.

2.3.3 **Interfaçage du code SUFT3D**

L'interfaçage du code SUFT3D se limitait à quelques opérations de pre-processing (création du maillage, définition de certaines conditions limites) et de post-processing (visualisation des résultats de simulations) à l'aide du logiciel Groundwater Modeling System développé par la Brigham Young University et la société EMS-i. De ce fait, la réalisation d'une simulation d'écoulement et transport en milieu souterrain avec le code SUFT3D demandait à l'utilisateur d'écrire directement une série de fichiers d'entrée à l'aide d'éditeurs de texte. Mis à part l'aspect convivialité, pour les besoins du projet PIRENE, il était essentiel de disposer d'outils spécifiques d'interfaçage en vue de gérer une série de tâches telles que le

découpage du modèle en sous domaines ou l'interfaçage avec les autres modules de calculs (conditions limites rivière...). D'importants efforts ont donc été consacrés au développement des outils et logiciels d'interfaçage du code SUFT3D. Ces développements sont décrits ci-dessous. Dans un premier temps, un aperçu général de l'interface SUFT3D est présenté. Ensuite, les développements plus spécifiques relatifs au découpage du maillage en sous domaines et à la définition spatiale des conditions limites rivière sont présentés.

2.3.3.1 Création du fichier d'entrée SUFT3D

L'interface du code SUFT3D a été développé sous environnement MatLab, avec pour objectif de préparer le fichier d'entrée principal du code de calcul (fichier *.in). Les fichiers maillage (*.3dm) et conditions limites (*.3bc), préparés à l'aide du logiciel Groundwater Modeling System (GMS) sont lus par l'interface et servent de base à la définition d'une série d'informations et de données nécessaires à la réalisation de la simulation SUFT3D (type de simulation, paramètres numériques, propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives, sollicitations, ...). L'interface comporte une série de modules décrits ci-dessous.

2.3.3.1.1 Module d'introduction des données

Ce module est organisé en une structure de menus et sous-menus qui permettent à l'utilisateur d'introduire les données nécessaires de manière complètement interactive (clavier ou souris) ou, pour certains types de données, de les importer d'une banque de données externe. Il est également possible d'ouvrir un fichier d'entrée SUFT3D pré-existant en vue d'y apporter des modifications pour la réalisation d'une nouvelle simulation. Le contenu de chaque fenêtre s'adapte de manière dynamique aux choix de l'utilisateur. Les données sont introduites de manière séquentielle : type de simulation, données géométriques, paramètres de la simulation, conditions limites et sollicitations...

2.3.3.1.2 Module de transfert des données vers le maillage

Une fois les données à caractère spatial (localisation et caractéristique des puits, rivières, ...) introduites par l'utilisateur (conceptualisation du problème), les informations doivent être transférées vers le maillage (discrétisation). Par exemple, un puits de pompage est représenté par des termes sources appliqués à un nœud, un groupe de nœuds ou à des éléments selon la manière de tenir compte « numériquement » de cet élément.

2.3.3.1.3 Module de visualisation des données

Une série d'outils de visualisation et de vérification des données sont disponibles, permettant à tout moment de vérifier que l'introduction des données et leur transfert vers le

maillage sont correctement exécutés. Des outils de manipulation du maillage sont également disponibles (zoom, rotation ...). A ce stade, deux outils ont particulièrement été développés : un outil de visualisation du maillage et un outil de visualisation associé aux puits.

2.3.3.1.4 Module d'exportation des fichiers d'entrée

Une fois l'ensemble des données relatives à la simulation introduites, le fichier d'entrée du code SUFT3D (*.in) est écrit au format texte.

2.3.3.2 Découpage du maillage en sous-domaines

Comme mentionné dans le rapport d'octobre 2002, même si le modèle PIRENE-ESO doit couvrir l'ensemble de la Région wallonne, plusieurs éléments justifient d'adopter un découpage en sous modèles et en sous domaines : limites hydrogéologiques imperméables et intangibles, approches conceptuelles et mathématiques adaptées aux conditions géologiques et hydrogéologiques au sein de chaque sous domaine, degré de caractérisation ...

Pour procéder à ce découpage, il faut disposer d'un maillage « global » de départ (généré avec GMS) et de critères de distinction des différents sous domaines à créer. Une fois le découpage réalisé, il s'agit de numéroter les éléments et nœuds au sein de chaque sous domaine, de dupliquer les nœuds et de définir les correspondances aux frontières entre sous domaines voisins et de préciser de quelle manière ces sous domaines vont interagir. Un programme d'interfaçage (DIVGMS) a donc été développé en vue de gérer ces différentes tâches.

Le programme DIVGMS part d'un fichier maillage 3D créé avec GMS (fichier *.3dm) pour créer les sous domaines. Le maillage peut être composé d'éléments à 4, 6 ou 8 nœuds HGE-ULg. La subdivision du maillage en sous domaines peut être opérée de deux manières : sur base de polygones et arcs décrivant, dans un plan horizontal, les limites entre les différents sous domaines ou en distinguant les éléments appartenant à différents sous domaines sur base du numéro de matériau qui leur est initialement associé lors de la création du maillage avec GMS. La première technique permet de réaliser un découpage suivant des limites verticales entre différents sous domaines, la deuxième permettant de réaliser un découpage arbitraire, sur base de considérations géologiques ou autres.

Une fois les critères de découpage définis, une commande (Perform cutting) réalise le découpage souhaité. Un module de visualisation a été développé en vue de manipuler les différents domaines issus du découpage, par des opérations de zoom, de rotation et déplacement, de masquage d'un ou l'autre sous domaine.

Au sein de chaque sous domaine, les nœuds et les éléments sont renumérotés successivement et régulièrement (i.e. sans trou dans la numérotation), cette numérotation étant continue d'un sous domaine à l'autre (Figure 2). Une table de correspondance est établie entre l'ancien numéro de chaque nœud et chaque élément et la nouvelle numérotation adoptée.

Au sein du module DIVGMS, les nœuds et les faces externes du maillage sur lesquels sont définis des conditions frontières du troisième type (condition de Fourier) peuvent être également sélectionnées. Ce type de condition ne peut pas, en effet, être défini dans GMS comme les autres types de condition frontière, cette fonctionnalité n'étant pas développée dans ce logiciel.

A la fin de ces opérations, plusieurs fichiers sont disponibles:

- le fichier maillage original (*.3dm) ;
- un fichier maillage global (global.3dm) reprenant l'ensemble des sous domaines (certains noeuds étant dupliqués aux interfaces entre sous domaines) ; ce maillage est utilisé pour les calculs dans le code SUFT3D et pour des tâches de post-processing et de visualisation globale des résultats dans GMS ;
- par sous domaine, un fichier maillage (XX.3dm où XX est le nom du sous-domaine) pouvant être utilisé lorsqu'on s'intéresse à un sous domaine en particulier (calculs plus détaillés ou visualisation des résultats), conservant la nouvelle numérotation des nœuds et éléments ;
- un fichier de correspondance (*.csp) dans lequel les informations relatives aux relations entre les anciennes et les nouvelles numérotations sont conservées ;
- un fichier mapping (*.sdm) établissant la correspondance aux interfaces entre sous domaine mitoyens, si des interactions sont considérées (flux d'eau et de solutés échangés), via un nouveau type d'élément de « dimension 0 », établissant la correspondance entre les numérotations des nœuds dupliqué à sur la frontière entre deux sous domaines voisins ; ce fichier est utilisé par le SUFT3D en vue d'établir les connexions globales entre les différents sous domaines pour le calcul des interactions qui les concernent ;
- un fichier conditions de Fourier (*.fbc) dans lequel l'ensemble des nœuds et des faces sur lesquels des conditions de Fourier sont appliquées, ainsi que la

description de la condition (profils de référence, coefficients d'échange...).

Dans le code SUFT3D, des adaptations ont été apportées en vue de gérer les sous-domaines (boucle de calcul sur les sous-domaines pour la résolution des calculs, nouveaux types, nouvelles fonctionnalités pour le calcul des flux d'eau et de contaminants échangés entre sous-domaines...).

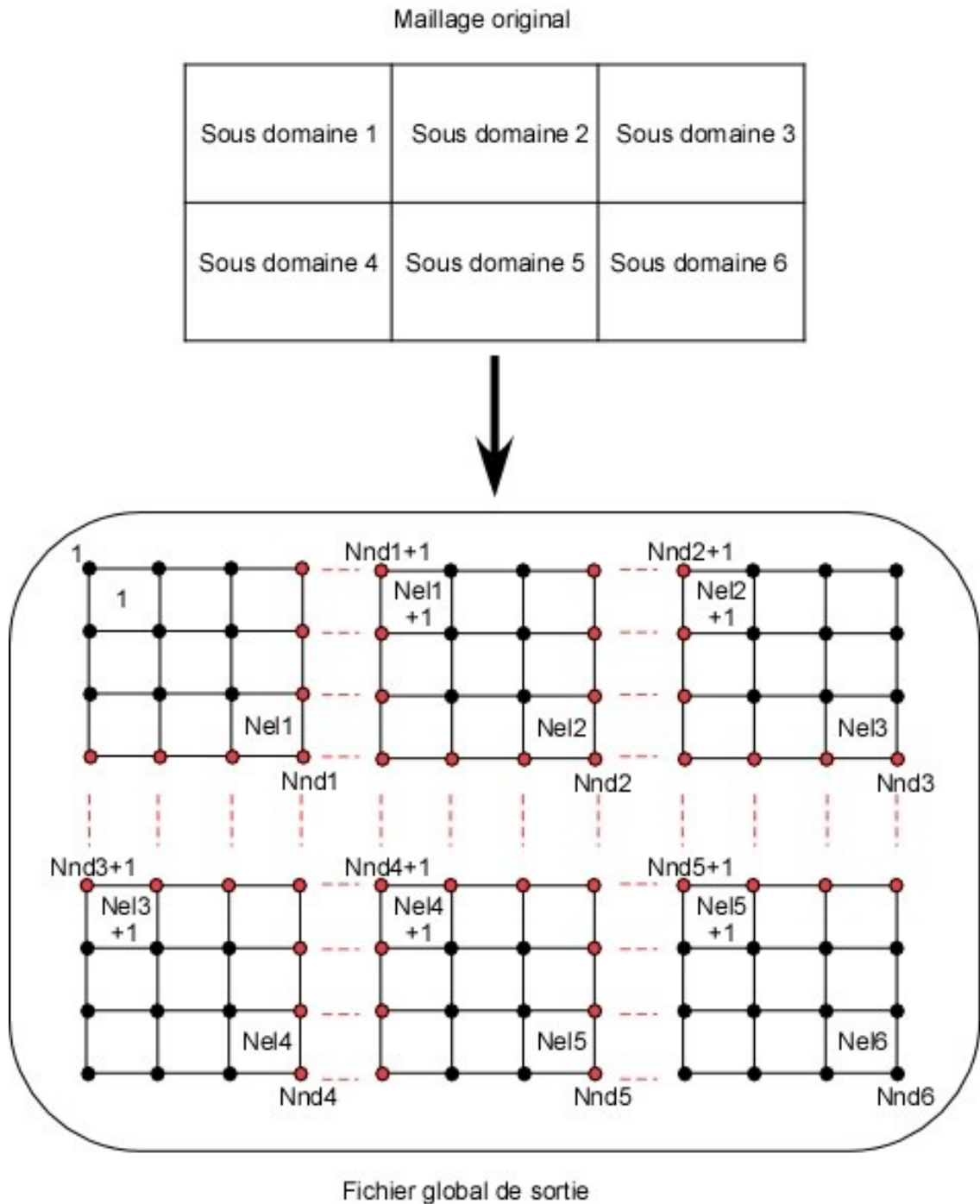


Figure 2. Renumérotation du maillage global au sein de chaque sous domaine

2.3.3.3 Définition des conditions limites rivière

Comme mentionné dans le rapport d'octobre 2002, vu la taille du domaine à modéliser (i.e. le bassin de la Meuse), il est impensable de tenir explicitement compte du réseau de rivières dans la discrétisation adoptée pour le modèle PIRENE-ESO. Le choix est plutôt de définir des conditions de Cauchy (3^{ème} type : flux dépendant de la différence de hauteur d'eau entre la rivière et la nappe) en tenant compte explicitement des caractéristiques de la rivière au droit de chaque élément fini du maillage PIRENE-ESO (longueur et largeur de la portion de rivière coulant sur l'élément, épaisseur et conductivité des dépôts constituant le fond de la rivière) pour le calcul d'un coefficient de transfert rivière-nappe. Un module d'interfaçage (RIVERMESH) a donc été créé pour automatiser l'interfaçage des interactions rivière-nappe.

2.3.3.4 Conceptualisation des échanges rivière – nappe

Le réseau de rivières est assimilé à un chevelu unidimensionnel d'arc et de nœuds superposé au maillage ESO composés d'éléments finis 3D. Au droit de chaque élément du maillage ESO, la longueur (L) et la largeur (l) de rivière passant sur cette élément, l'épaisseur (e) et la conductivité hydraulique (K_r) des dépôts qui en constituent le fond, à l'interface rivière-nappe est déterminée. A partir de ces informations, un coefficient de conductance (α_r) tel que le débit échangé entre la rivière et la nappe dans l'élément soit calculé comme suit (Loi de Darcy) peut être évalué:

$$Q_{riv}^{nappe} = \frac{K_r \times L \times l}{e} (H_{riv} - H) = \alpha_r (H_{riv} - H) \quad (10)$$

Dans cette équation, H_{riv} est l'altitude moyenne du niveau de l'eau dans la rivière (interpolée au milieu du segment de rivière à partir des valeurs aux nœuds rivières amont et aval) et H est le niveau piézométrique dans la nappe (inconnue du modèle PIRENE-ESO).

2.3.3.4.1 Structure du script RIVERMESH

Le script permettant d'établir les conditions limites rivières pour le modèle PIRENE-ESO est composé de 3 modules :

- lecture du maillage 3D (fichier *.3dm) produit par GMS ou par le module DIVGMS et des données relatives aux rivières fournies sous format texte par le CEME ou construit à l'aide d'un éditeur de texte ;
- calcul du terme de conductance (α_r) de la rivière au droit de chaque élément du maillage 3D concerné par ce type de condition limite ; pour cela, l'intersection de la rivière avec chaque côté de la face supérieure des éléments 3D traversés par la rivière

est déterminé en vue d'évaluer la longueur (L) du segment de rivière dans l'élément (Figure 3) ;

- sauvetage des informations relatives à la condition rivière – nappe dans le fichier reprenant les types de conditions limites du modèle PIRENE-ESO (fichier *.3bc) pour chaque face du maillage 3D ou une condition limite rivière est appliquée, sous le format suivant : Carte d'identification du type de condition limite (RB1 ici), Numéro de l'élément du maillage 3D, numéro de la face dans cet élément, valeur de la conductance hydraulique de l'interface rivière nappe, numéro du profil décrivant l'évolution du niveau d'eau dans la rivière.

Les profils (temps, valeur...) décrivant l'évolution du niveau d'eau dans la rivière sont soit fournis dans le fichier d'entrée (*.in) du SUFT3D (simulation non couplée du code), soit fournis par le module de couplage des modèles PIRENE pour la future version couplée.

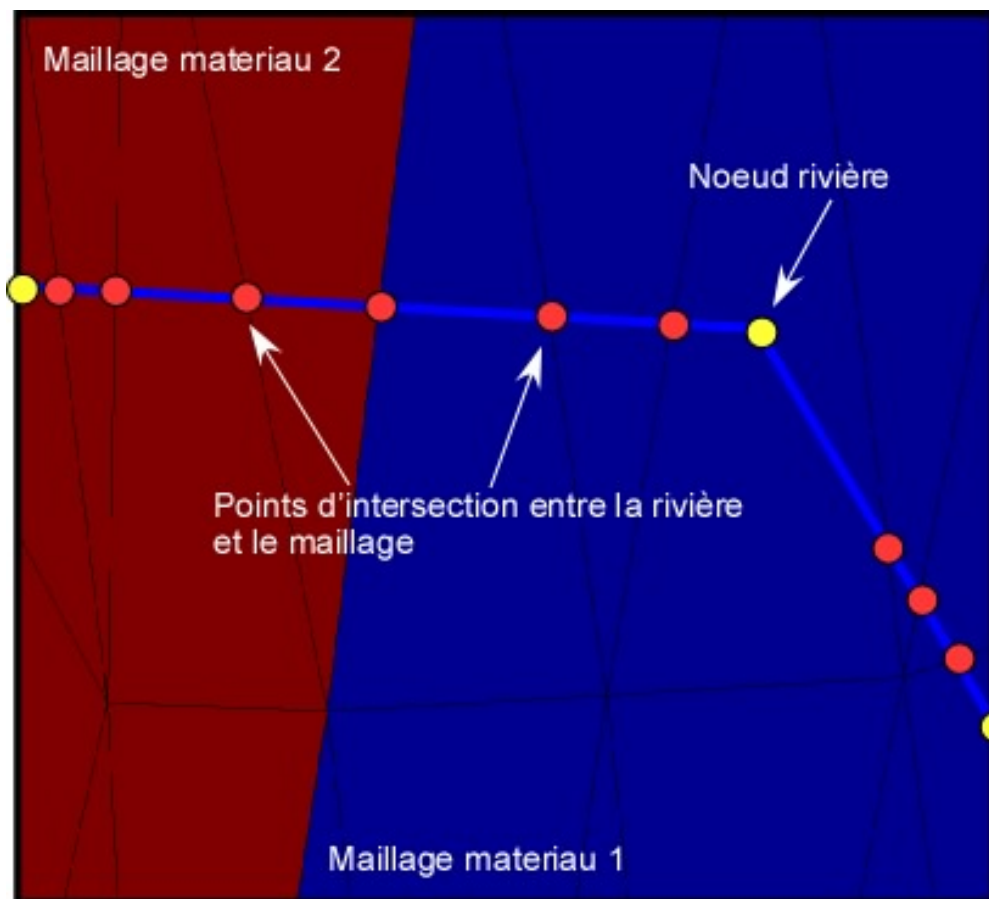


Figure 3. Intersection entre un maillage produit par GMS et une rivière. Les points rouges représentent les points d'intersection entre la rivière et les éléments du maillage tandis que les points jaunes représentent les nœuds de l'arc rivière.

2.4 Discrétisation spatiale du bassin de la Meuse en Région wallonne

La réalisation du modèle PIRENE-ESO nécessite de discrétiser spatialement le domaine étudié. Il a été décidé de considérer comme niveau de base de la discrétisation spatiale, les différentes masses d'eau souterraines telles qu'elles ont été définies pour le bassin de la Meuse en Région Wallonne et les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques majeures.

Après une description des données cartographiques géologiques disponibles, le résultat des travaux de digitalisation est présenté. Par la suite, les différentes hypothèses de travail concernant le découpage du bassin de la Meuse sont présentées. Enfin, la discrétisation adoptée et les premiers résultats de modélisation seront présentés.

2.4.1 Digitalisation de la géologie en Région wallonne et regroupement en unités hydrogéologiques

Un inventaire des données cartographiques de la géologie en Région Wallonne a montré que les cartes disponibles diffèrent par leur échelle, leur âge, le format de diffusion ou le territoire couvert. On distingue:

- les "anciennes" cartes géologiques de Belgique au 1/40.000;

Ces cartes sont disponibles pour l'ensemble de la Région Wallonne mais au début de la troisième année du projet PIRENE, n'étaient toujours pas disponibles sous format numérique.

- les "nouvelles" cartes géologiques de la Région Wallonne au 1/25.000;

Actuellement une trentaine de cartes ont été réalisées et sont disponibles sous format vectorisé. Ces cartes ne couvrent malheureusement qu'une part faible du territoire wallon.

- la carte au 1/160.000 ;

Le Service des Eaux souterraines de la Région Wallonne dispose d'une version numérisée de la carte géologique de la région Wallonne au 1/160.000. Malgré quelques problèmes de distorsion lors de la numérisation, cette carte présente l'avantage de couvrir l'ensemble de la Région Wallonne à l'exception de quelques zones de l'Est du pays qui, lors de la réalisation de la carte géologique au début du 20^{ème} siècle, ne faisaient pas partie du territoire belge.

Il a donc été choisi d'utiliser la carte géologique au 1/160.000 comme donnée géologique de base. Afin de couvrir les parties du bassin de la Meuse non reprises sur cette carte, des cartes géologiques allemandes ont été consultées pour les régions de l'Est de la Région Wallonne et des cartes françaises pour la région de Givet et Rocroi.

Les formations géologiques distinguables sur la carte ont été digitalisées à l'aide du logiciel ArcView. Les formations ont ensuite été regroupées suivant leur caractère hydrogéologique en unités hydrogéologiques. Par exemple, les différentes formations calcaires du Tournaisien et du Viséen ont été regroupées vu qu'elles constituent un même aquifère. Le Tableau 2 reprend les différentes formations, les regroupements effectués, le caractère aquifère, aquiclude ou aquitard de chaque groupement ainsi que le nom de l'unité qui sera utilisé par la suite.

Ere	Système	Etage	Notation	Lithologie	Caractère hydrogéologique (Nom de l'unité utilisé dans le rapport)
Tertiaire	Paléogène	Bruxellien	B	Sables	Aquifère (bruxellien)
Secondaire	Crétacé	Maestrichtien	M	Tuffeau	Aquifère (crétacé)
		Sénonien	Cp4	Craie grossière	
			Cp3	Craie	
			Cp2	Smectite ou sable argileux	Aquitard ou aquiclude
			Cp1	sables, grès et argiles	Aquitard
	Jurassique	Bajocien	Bjc	Calcaire	Aquifère
			Bjb	Calcaire	Aquifère
			Bja	Limonite	Aquitard
		Toarcien	Toc	Marnes	
			Tob	Marnes	Aquitard
			Toa	Schistes bitumineux	
		Virtonien	Vrd	Macignos	
			Vrc	Macignos, schistes et psammites	Aquiclude
			Vrb	schiste	
			Vra	Sables et grès	Aquifère
		Sinémurien	Snbs	Calcaires sableux	Aquifère
			Snbm	Marnes	Aquiclude
			Snam	Marnes	Aquiclude
			Snas	Calcaires sableux	Aquifère
		Hettangien	Htbs	Sables	Aquifère
	Htbn		Marnes	Aquiclude	
	Hta		Marnes		
	Rhétien	Rh	Cailloux, sables, argiles	Aquitard	
Triasique	Keupérien	K	Marnes	Aquiclude	
Carbonifère	Houiller	H2	Grès, psammites, schistes et houilles	Aquifère locaux dans grès, psammite, aquitard dans schistes (Houiller)	
		H1	Poudingue, grès, schistes arkose		
	Viséen	V2	Calcaires	Aquifères des calcaires et dolomies (Calcaires carbonifère)	
		V1	Calcaires		
	Tournaisien	T2	Calcaires et dolomies		

Primaire	Dévonien	Famennien	T1	Calcaires et schistes	Aquifère des grès Famennien (Fa2-Fa1c)	
			Fa2d	Alternance de calcaire, schiste et psammitite		
			Fa2c	Psammities et schistes		
			Fa2b	Psammities		
			Fa2a	Psammities, schistes		
			Fa1c	Psammities, schistes		
			Fa1b	Schistes, psammities		
		Frasnien	Fa1a	Schistes	Aquiclude (Fa1-Fr2-Frd)	
			Frd	Schistes		
			Frc	Calcaires		
			Frb	Schistes, calcaires		
		Givetien	Fra	Schistes	Aquifère (Fr)	
			Gvb	Calcaire		
		Couvinien	Gva	Calcaire	Aquifère (Givetien)	
			Cob	Schistes et calcaires		
		Burnotien	Coa	Schistes et grès	Aquifère locaux dans grès et psammitite (Dév inf-moy)	
			Bt	Grès et schistes		
		Coblencien	Cb3	Grès et schistes		
			Cb2b	Phyllade		
			Cb2a	Quartzophyllade, psammities et grès		
			Cb1b	Phyllade		
			Cb1a	Grès		
		Gedinnien	Gd	Schistes, grès, arkose et poudingue		Aquiclude (Gedinnien)
			Gc	Schistes, grès et arkose		
			Gb	Schistes et quartzophyllades		
			Ga	Arkose et poudingue		
		Silurien	Supérieur	SI2	Schistes, phyllades, quartzites, psammities	Aquitard localement aquifère (Socle)
			Inférieur	SI1	Schistes, phyllades et quartzites	
		Cambrien	Salmien	Sm2	Phyllades	
				Sm1	Phyllades et quartzophyllades	
			Revinien	Rv	Quartzites et phyllades	
			Devillien	Dv2	Quartzite et phyllades	
Dv1	Quartzites					

Tableau 2. Regroupement en unités hydrogéologiques des différentes formations.

2.4.2 Découpage du bassin de la Meuse

Le découpage du bassin de la Meuse a été réalisé en deux étapes. Dans un premier temps, quatorze entités hydrogéologiques indépendantes (par la suite dénommées sous modèles) ont été distinguées (Figure 4). Les différentes considérations ayant conduit au découpage sont les suivantes :

- La Meuse est l'exutoire de toutes les nappes du district hydrographique. Elle constitue le plus souvent un niveau de base inférieur aux niveaux piézométriques, ce qui implique que les nappes situées dans les formations d'une rive ne

communiquent jamais avec les nappes des formations de l'autre rive.

- Les aquifères localisés dans les formations schisto-gréseuses du massif ardennais et des formations schisteuses de la base du Famennien sont généralement d'extension limitée; ils sont de faible capacité et isolés les uns des autres. Dans ces zones, il est donc proposé de considérer les limites des bassins hydrologiques comme frontières imperméables en ce qui concerne les eaux souterraines.
- Le bassin du Geer peut être considéré comme une structure à part entière dont les échanges avec l'extérieur sont relativement bien connus et estimés.

Les simulations sur ordinateur des sous modèles peuvent être réalisées séparément ce qui facilite leur pré- et le post- processing et permet de diminuer les temps de calcul et l'espace mémoire nécessaires.

Dans un deuxième temps, chaque sous modèle est subdivisé en entités pouvant interagir entre elles, les sous domaines, en fonction des caractéristiques hydrogéologiques et/ou du degré de caractérisation. Les sous modèles sont donc constitués d'une série de sous domaines pouvant échanger des flux d'eau et de contaminants.

Les deux situations proposées ci-dessous permettent d'illustrer la notion de sous domaine et son intérêt pour la modélisation des eaux souterraines en Région wallonne. La modélisation de formations calcaires en contact avec des formations schisto-gréseuses n'est habituellement pas aisée. Tout d'abord, le degré de caractérisation de ces deux types de formations est généralement très différent. En effet, les formations schisto-gréseuses sont souvent moins perméables, elles sont moins exploitées et donc, in fine, elles sont généralement moins bien caractérisées. De plus, une discontinuité piézométrique est généralement observée entre ces deux types de formation, les niveaux de nappes étant assez systématiquement sub-affleurants dans les grès et très profonds dans les calcaires. La meilleure façon de décrire dans le modèle cette discontinuité dans la piézométrie est de la simuler par une condition de Fourier intégrée dans l'interface défini entre les sous domaines calcaires et grès. D'autre part, la représentation de chaque formation par un sous domaine permet éventuellement d'adopter une équation adaptée au degré de caractérisation pour modéliser numériquement les écoulements et le transport de contaminant.

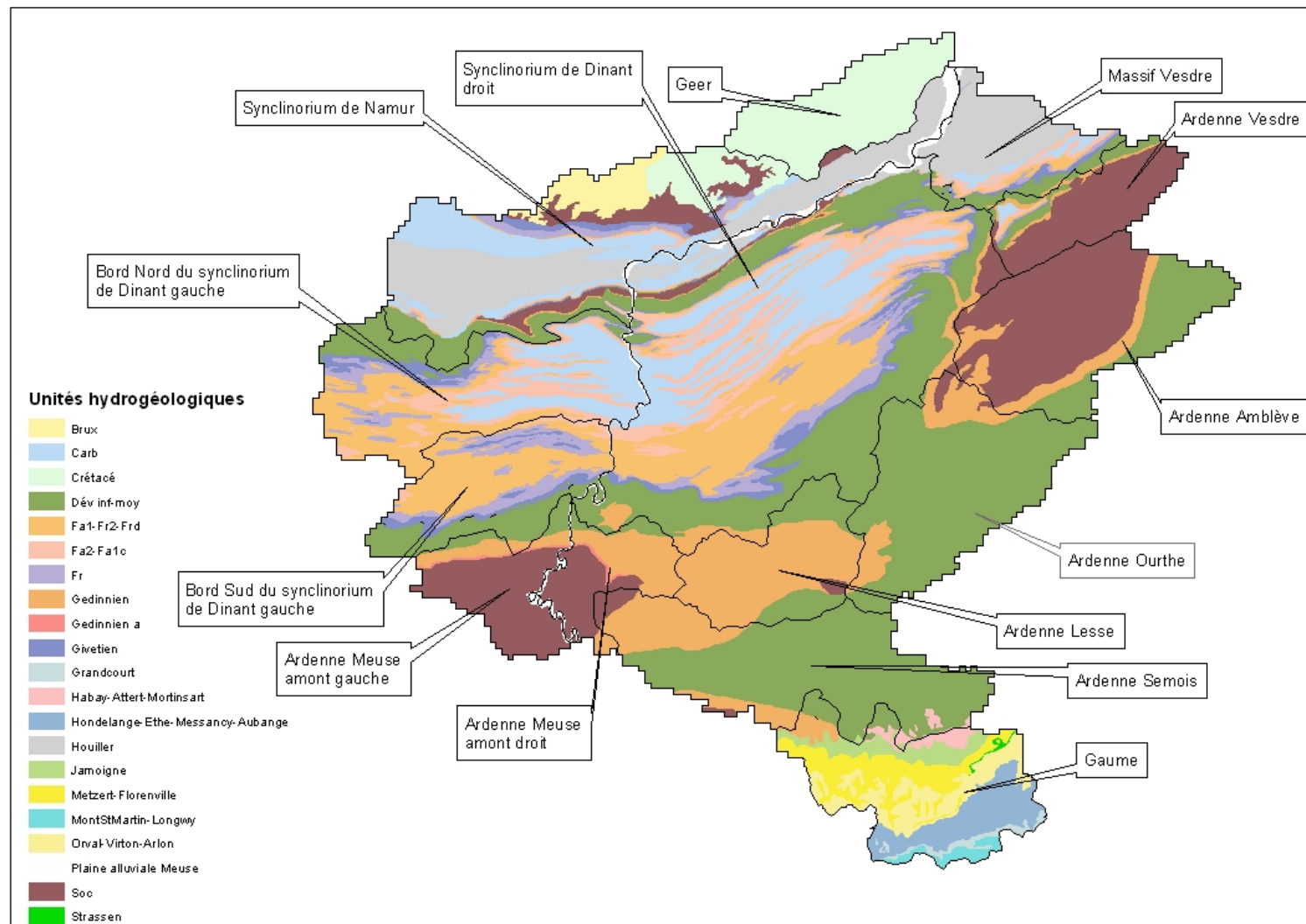


Figure 4. Unités hydrogéologiques et découpage en sous modèles du bassin de la Meuse

L'aquifère des craies de Hesbaye est constitué de deux couches de craie séparées par une couche d'extension limitée de craie peu perméable. Cette couche de craie joue le rôle d'aquitard à l'interface entre les deux niveaux crayeux aquifères. Chaque couche de craie aquifère est donc représentée par un sous domaine, leurs interactions au travers de la mince couche indurée étant simulée par des conditions de Fourier.

2.4.3 Discrétisation et modélisation du bassin de la Meuse

Les paragraphes suivant présentent les discrétisations adoptée par sous modèle ainsi que les résultats des premières simulations réalisées. Faute de données suffisantes, seules des simulations en régime permanent ont pu être effectuées. Seul le sous modèle Geer a pu être calibré, pour les autres sous modèles les résultats n'ont pu être validés. Par ailleurs, vu qu'il s'agissait de premiers tests de modélisation à l'échelle de la Région wallonne, la possibilité d'adapter la formulation écoulement-transport n'a pas encore été exploitée. Il s'agira ultérieurement de déterminer l'approche la plus appropriée, sous modèle par sous modèle, voire sous domaine par sous domaine. Les caractéristiques du maillage global obtenu pour le bassin de la Meuse à l'issue de ces discrétisations sont résumées dans le Tableau 3.

Sous modèles	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Nombre de sous domaines	Conditions de Fourier			Conditions de Cauchy	Captages pris en compte	Superficie (km ²)
				Meuse (nœuds)	Autres rivières (faces)	Faces latérales			
Ardenne Amblève	2632	3260	13	0	669	0	2632	69	950
Ardenne Lesse	1532	1870	7	0	375	0	1532	33	529
Ardenne Meuse amont droit	2587	3510	9	263	294	0	2587	10	317
Ardenne Meuse amont gauche	2711	3710	11	263	336	0	2711	0	398
Ardenne Ourthe	2541	3234	16	0	714	0	2541	18	956
Ardenne Semois	3285	4092	16	0	908	0	3285	46	1025
Ardenne Vesdre	1351	1754	8	0	386	0	1351	27	403
Bord nord Synclinorium Dinant gauche	10192	11948	17	149	1346	0	10192	39	1012
Bord sud Synclinorium Dinant gauche	6035	7478	14	136	935	0	6035	7	643
Gaume	8185	9118	8	0	735	173	5236	36	816
Geer	11112	9860	2	0	642	411	3704	17	459
Massif Vesdre	4669	5814	11	100	841	25	4669	15	462
Synclinorium Dinant droit	30190	36230	61	665	4014	0	30190	110	2900
Synclinorium Namur	17567	21022	26	481	2223	226	17567	53	1622
Bassin de la Meuse	104589	122900	219	2057	14418	835	94232	463	12492

Tableau 3. Caractéristiques des discrétisations adoptées pour chaque sous modèle et pour l'ensemble du bassin de la Meuse pour la modélisation des eaux souterraines en Région wallonne.

2.4.3.1 Sous modèle Gaume

Le sous modèle « Gaume » couvre deux bassins hydrologiques : celui de la Semois, au Nord, et celui de la Chiers, au Sud. Il s'étend jusqu'aux frontières belgo-françaises.

Le sous-sol est formé de roches primaires plissées et pénéplanées (socle Hercynien) sur lesquelles reposent des formations monoclinales d'âge Secondaire. Le socle primaire est constitué des formations du Dévonien inférieur et moyen (schistes, grès et phyllades) et du Gedinnien (schistes, grès et arkose). Ces formations sont peu perméables. Les roches secondaires reposent en discordance sur ce socle et sont constituées d'une alternance de couches perméables (faciès sableux, gréseux ou calcaire) et peu perméables (faciès marneux ou argileux). Le pendage uniforme très faible des formations secondaires vers le sud, associé à l'alternance de formations résistantes et peu résistantes à l'érosion déterminent un relief typique en cuesta.

Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :

- Dévonien inférieur-moyen (aquiclude)
- Gedinnien (aquiclude)
- Habay-Attart-Mortinsart (aquiclude)
- Jamoigne (aquiclude)
- Florenville (aquifère)
- Orval (aquifère)

L'ensemble des formations secondaires présente un pendage faible et uniforme vers le Sud (entre 1 et 3°). Les aquifères les plus importants sont localisés dans la formation des sables et grès calcaires du Sinémurien de la formation de Luxembourg (épaisseur de l'ordre de 80 m). Il s'agit d'aquifères superposés, séparés par des couches marneuses de la formation d'Arlon (marnes). Des phénomènes de karstification, des accidents de faibles rejets ou des lacunes de sédimentation de certains niveaux marneux peuvent entraîner des drainages localisés entre ces différents aquifères. La formation de Luxembourg affleure sous forme d'une large bande orientée Est-Ouest, qui constitue sa zone d'alimentation. Une partie de cette zone est drainée vers le Nord pour alimenter le réseau de la Semois. L'autre partie s'écoule vers le sud, selon le pendage des couches.

Par souci de simplification, le sous modèle Gaume ne tient compte que des deux aquifères majeurs du Sinémurien :

- l'aquifère inférieur, logé dans les grès calcaires de Florenville. Il s'agit d'un aquifère de fissures et de pores. Il est limité à sa base par les marnes de la formation de Jamoigne. L'aquifère de Florenville est drainé par une série de petits ruisseaux alimentant le réseau de la Semois, au Nord, ainsi que par des ruisseaux alimentant le bassin de la Chiers, au Sud ;
- l'aquifère supérieur, logé dans les grès sableux d'Orval. Sa perméabilité est également de type mixte (pores et fissures). Il est limité à sa base par les marnes de la formation d'Arlon (marnes de Strassen). L'aquifère d'Orval est drainé par une série de sources à flanc de coteau jalonnant le contact entre Orval et les marnes de Strassen, ainsi que par certains cours d'eau du bassin de la Chiers tels que le Ton.

Les marnes de Strassen disparaissent à l'Ouest de Valansart et à l'Est du méridien de Sainte-Marie, les différentes nappes de la formation de Luxembourg se soudent alors en un seul aquifère. Au sud de la Gaume, les aquifères de Florenville et d'Orval deviennent captifs suite à la présence de formations aquicludes sus-jacentes (schistes d'Ethe).

2.4.3.1.1 Discrétisation de la géologie

Le sous modèle Gaume est divisé en 8 sous domaines (Annexe 2.1). Pour 6 de ces sous domaines, la subdivision est basée sur les limites des sous bassins hydrologiques de la Semois, d'une part, et sur la limite entre la formation aquiclude de Jamoigne et l'aquifère de Florenville, d'autre part. Les deux autres sous domaines correspondent aux aquifères de Florenville et d'Orval. Les marnes de Strassen séparant Florenville et Orval ne sont pas matérialisées dans le modèle, mais sont représentées de manière implicite par un interface au contact entre les sous domaines Florenville et Orval. Ce coefficient s'annule là où les marnes de Strassen disparaissent.

Un maillage 2D de base a été construit à partir des limites des sous domaines et des unités hydrogéologiques et en redistribuant les nœuds à une fréquence spatiale variant de 1/1000 m à 1/500 m selon la densité voulue. L'élévation de ce maillage en 3 dimensions s'est faite en tenant compte des critères suivants :

1. Le modèle de la Gaume se compose de deux couches d'éléments :
 - la couche inférieure correspond aux grès-calcaires de Florenville. Elle se

prolonge vers le Nord par les formations secondaires aquicludes sous-jacentes (Jamoigne et regroupement de Habay-Attert-Mortinsart) et par les formations du socle primaire (Gedinnien et Dévonien inférieur-moyen) ;

- la couche supérieure correspond aux grès-sableux d’Orval. Cette couche disparaît au Nord du modèle, ce qui est fidèle à la structure monoclinale.

2. Le sommet du maillage correspond :

- pour le Nord du modèle (aquicludes et parties libres des aquifères de Florenville et d’Orval) : à la valeur du MNT interpolée en chaque nœud ;
- pour le Sud du modèle (partie captive de l’aquifère d’Orval) : à la cote du sommet de l’aquifère d’Orval interpolée en chaque nœud.

3. La base du maillage correspond à la valeur du MNT diminuée de 20 mètres, au Nord (au droit des aquicludes), et à la base de l’aquifère de Florenville, au Sud.

2.4.3.1.2 Conditions aux frontières

Les aquifères de Florenville et d’Orval se prolongent au-delà de la frontière considérée au Sud du sous modèle. Les échanges avec l’extérieur à travers certaines frontières latérales sont régulés par une condition de type Fourier, de manière à ce que les flux traversant les frontières soient proportionnels à la différence de niveau existant entre la hauteur piézométrique dans le sous domaine et un niveau de référence (hauteur piézométrique estimée sur base des cartes piézométriques disponibles), en d’autres mots, que la quantité d’eau transitant par cette frontière soit proportionnelle au niveau piézométrique de la nappe dans modèle.

Le Tableau 4 reprend les principales caractéristiques du sous modèle.

Sous modèle « Gaume »	
Nombre d’éléments	8185
Nombre de nœuds	9118
Nombre de sous domaines	8

Conditions de Fourier :	
- rivières (faces)	735
- faces latérales	173
Conditions de Neumann (recharge)	5236 faces
Nombre de captages pris en compte	36
Superficie	816 km ²
Volumes prélevés	6.3 mm/an (5.17 * 10 ⁶ m ³ /an)

Tableau 4. Caractéristiques principales du sous modèle Gaume

2.4.3.1.3 Simulations réalisées sur la Gaume

Les simulations d'écoulement en régime permanent ont été réalisées sur base des paramètres décrits dans le Tableau 5.

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Orval captif	4×10^{-4}	0
Orval-Virton-Arlon	4×10^{-4}	5.61×10^{-9}
Florenville captif	5×10^{-4}	0
Metzert-Florenville	5×10^{-4}	5.6×10^{-9}
Jamoigne	1×10^{-6}	6.3×10^{-10}
Habay-Attart-Mortinsart	9×10^{-6}	2.4×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.45×10^{-9}
Dév inf-moy	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 5. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Gaume

Ces paramètres proviennent en grande partie de modélisations antérieures (Mohican, Mohise...).

La simulation en régime permanent donne une piézométrie dont l'allure générale correspond bien à la réalité (Figure 5) :

- les rivières constituent des axes drainants, tant pour les aquifères du Sinémurien que pour les formations aquicludes ;
- au sein des aquifères de Florenville et d'Orval, l'écoulement se fait vers le Sud ;
- le caractère captif des aquifères dans le Sud de la région est reproduit par le modèle.

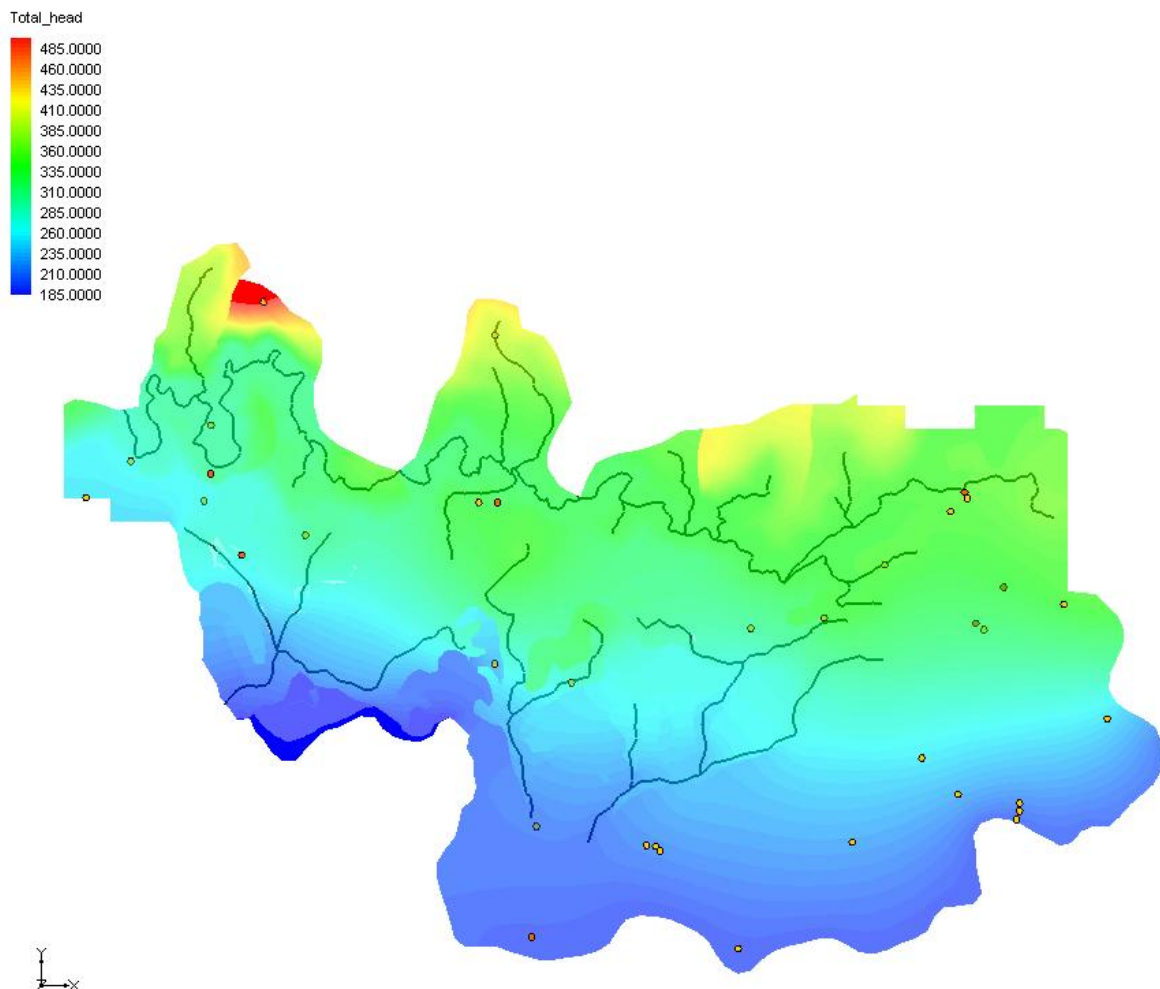


Figure 5. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Gaume" en régime permanent.

Cependant, le modèle montre quelques lacunes :

- les niveaux piézométriques au sein des formations du Dévonien inf-moy dépassent localement la surface topographique. Ce phénomène peut s'expliquer par la faible

densité du réseau hydrographique représenté dans le modèle, qui ne suffit pas au drainage des terrains ;

- les hauteurs piézométriques sont trop hautes dans certaines vallées. Ce phénomène s'explique soit par le drainage insuffisant des ruisseaux ou par une taille de maille excessive (le fond des vallées est ainsi considéré à une cote supérieure à celle correspondant à la réalité).

Faute de temps, la calibration n'a pu être réalisée plus précisément.

2.4.3.2 Sous modèle Geer

Le sous modèle Geer couvre le bassin hydrologique du Geer. De bas en haut, la géologie se compose comme suit (de bas en haut) :

- le socle primaire pénéplané (non représenté)
- les formations du Secondaire (Crétacé); les différentes couches se composent de :
 - la smectite de Herve (Campanien inférieur) : argile calcareuse indurée, formant la base imperméable de l'aquifère de Hesbaye ;
 - la craie blanche ou craie inférieure d'une épaisseur moyenne de 20 m, dont les couches présentent un pendage de 1% à 2% vers le NNE. Cette craie est fissurée par des réseaux de diaclases, des fissures associées aux vallées sèches et des failles associées au bombement du socle ;
 - le Hard-Ground qui est un banc de craie indurée d'épaisseur métrique. Son extension et sa continuité ne sont pas connues avec précision ;
 - les craies grises et tigrées du Maastrichtien (craie grise) totalisant une épaisseur de 10 à 15 m. Ces craies présentent des perméabilités généralement supérieures aux perméabilités de la craie inférieure, suite aux processus de détente et d'altération ;
 - des tuffeaux et calcarénites à bancs de silex, épais de 1 à 10 m selon les endroits. Ces dépôts sont généralement très fortement altérés, conduisant à la formation d'un conglomérat résiduel à silex, présentant une surface supérieure très irrégulière.
- les formations du Tertiaire représentées par une couche de 20 m de sables tongriens s'amincissant vers le Nord ;

- les formations du Quaternaire constituées par des limons d'origine éolienne

Les différentes études de bilan réalisées sur le bassin montrent que le Geer peut être considéré comme le principal exutoire de la nappe mais que de l'eau quitte le bassin hydrologique via les écoulements souterrains au niveau de la frontière nord du bassin.

L'eau de la nappe aquifère du bassin du Geer est logée principalement dans les fissures et pores des niveaux crayeux. Au vu du peu de connaissance concernant le Hard-ground et de sa faible extension verticale, il a été décidé de ne pas le représenter explicitement. Chaque niveau de craie est représenté par un sous domaine avec interactions au travers du Hard-ground représentées par des conditions de Fourier.

2.4.3.2.1 Discrétisation de la géologie

Le maillage bidimensionnel de base a pour frontière externe la limite du bassin hydrologique du Geer (Figure 13). Pour la génération du maillage 2D, les limites du bassin hydrologique du Geer, l'emplacement du Geer et des galeries captantes de la CILE ont été pris en compte. Ce maillage 2D comporte 1370 nœuds et 2551 éléments de forme triangulaire de 700 m de côté en moyenne.

Préalablement à la construction du maillage tridimensionnel, la base de la craie inférieure, de même que le Hard-Ground et le toit de la craie supérieure, ont été interpolés linéairement à partir de données ponctuelles.

Le modèle tridimensionnel est obtenu par la répétition, à quatre niveaux, du maillage bidimensionnel, de sorte que d'une couche de nœuds à la suivante, seule la coordonnée z change, délimitant trois couches d'éléments : la craie inférieure, discrétisée en une seule couche d'éléments, et la craie supérieure, discrétisée en deux couches d'éléments (afin de représenter avec plus de précision la zone de battement de la nappe). Les formations sablo-limoneuses tertiaires et quaternaires sus-jacentes n'ont pas été discrétisées.

Le modèle tridimensionnel comporte 9860 nœuds et 11112 éléments. Dans ce modèle, les éléments utilisés sont des prismes triangulaires à 6 nœuds. La discrétisation tridimensionnelle tient compte des contraintes géométriques suivantes: limites hydrographiques du bassin, limites des différents horizons géologiques, localisation du Geer et emplacement des galeries de captage de la CILE. La discrétisation ne pouvant tenir compte exactement du positionnement vertical complexe des galeries, la galerie Sud, captant les eaux souterraines vers une profondeur de 30 m, a été positionnée au sommet de la craie inférieure tandis que les galeries Nord, captant les eaux vers 60 m de profondeur, a été positionnée à la

base de cette même couche. Les puits de captage, les nombreux piézomètres ainsi que le tracé de la faille de Horion-Hozémont n'ont pas été pris en compte explicitement au sein de la discrétisation. Les débits captés par puits vertical ont été pris en compte par des termes sources imposés dans les éléments finis correspondant à l'emplacement de ces puits.

2.4.3.2.2 Conditions aux frontières

A la base du modèle, une condition de flux nul (condition de Neumann) a été imposée, la smectite de Herve sous-jacente étant le mur peu perméable de l'aquifère des craies. Au sommet du modèle, avant couplage avec le module sol du modèle intégré, l'infiltration efficace est simulée par l'imposition de flux verticaux unidirectionnels (conditions de Neumann).

Pour représenter le plus correctement possible les interactions nappe-rivière ainsi que les flux d'eau quittant le bassin par la frontière Nord, des conditions de flux dépendant d'un potentiel (conditions de Fourier) ont été considérées. Les flux souterrains s'écoulant au travers de la frontière Nord varient en fonction du niveau piézométrique dans l'aquifère. De même, à proximité de la frontière Nord du bassin, le contact entre la nappe et le Geer se traduit par un niveau piézométrique relativement constant (égal au niveau de l'eau dans le Geer) et correspond à des flux d'infiltration de la nappe vers la rivière. Sur les autres frontières du domaine, vu les échanges très faibles qui ont pu être estimés à l'aide de précédents modèles, des conditions de flux nul ont été choisies. En amont (au sud), ces conditions sont tout à fait justifiées car convenant bien à une limite du bassin hydrogéologique.

2.4.3.2.3 Conditions hydrogéologiques simulées

Le modèle a été calibré en conditions de régime permanent, sur base des observations relatives à deux périodes particulières: une période de hautes eaux, correspondant aux années 1983 et 1984, ainsi qu'une période de basses eaux, correspondant aux années 1991 et 1992. Les cotes piézométriques mesurées considérées pour la calibration sont des moyennes (sur les périodes s'étendant du 01/01/1983 au 31/12/1984 et du 01/01/1991 au 31/12/1992 respectivement) des mesures répertoriées au sein de la banque de données pour ces périodes. Quarante-trois cotes piézométriques ont ainsi été utilisées pour la calibration en période de hautes eaux (1983-1984) tandis que cinquante-quatre cotes piézométriques étaient disponibles pour la calibration en période de basses eaux (1991-1992).

Pour les deux périodes sur lesquelles la calibration porte, les valeurs d'infiltration efficace utilisées sont issues de la formule reliant l'infiltration efficace aux précipitations

annuelles (cf point 2.4.2.5). Ces flux s'élèvent à $11,67 \times 10^{-9}$ m/s (soit 368,2 mm/an) pour 1983-1984 et à $7,17 \times 10^{-9}$ m/s (soit 225,9 mm/an) pour 1991-1992. Les valeurs de précipitation annuelle moyenne pour le bassin du Geer proviennent quant à elles de l'Institut Royal Météorologique de Belgique.

A défaut d'informations plus précises et en vue de faciliter la convergence des calculs, les lois de comportement exprimant la relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel de succion ou la conductivité hydraulique sont linéaires. Les hauteurs piézométriques initiales utilisées au cours de la calibration sont celles calculées à l'issue des premières simulations. Ces valeurs s'échelonnent entre 70 et 170 m.

2.4.3.2.4 Résultats de la calibration en régime permanent

Comme indiqué précédemment, la calibration a été effectuée sur base des observations relatives à deux périodes particulières : une période de hautes eaux, correspondant aux années 1983 et 1984, ainsi qu'une période de basses eaux, correspondant aux années 1991 et 1992. Au total, 15 matériaux ont été définis au sein des trois couches d'éléments. Un exemple de distribution spatiale de ces matériaux pour la couche intermédiaire est présenté à la Figure 6

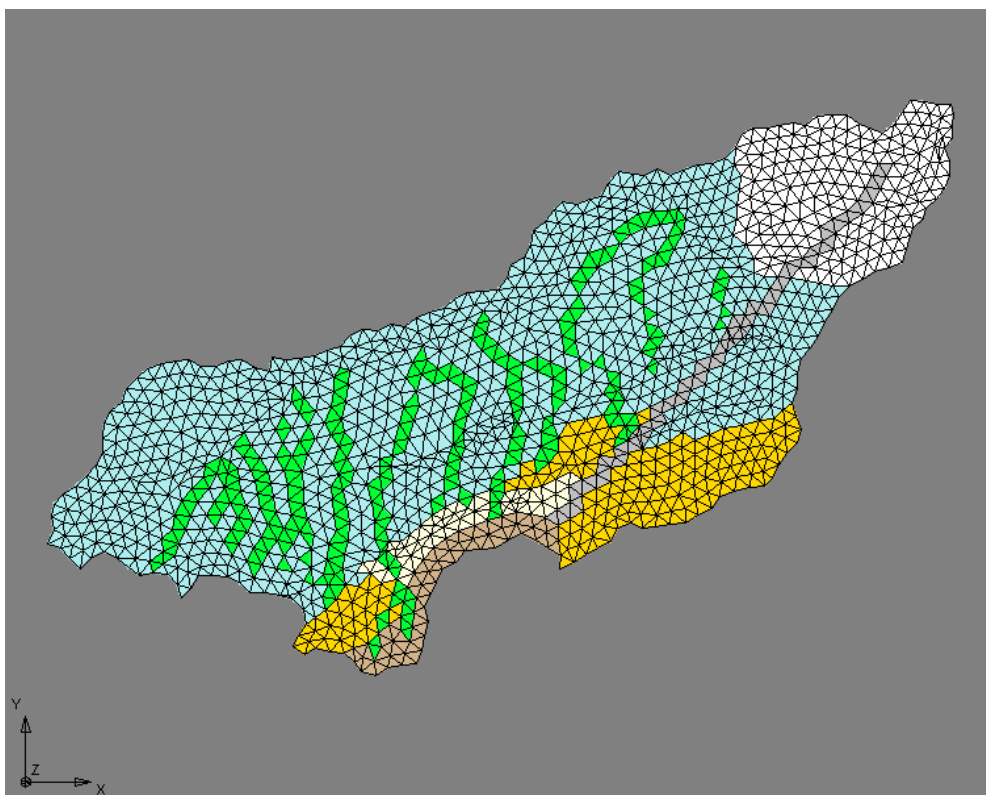


Figure 6. Distribution spatiale des matériaux au sein de la couche intermédiaire (chaque couleur représente un matériau).

A l'issue de la calibration, les valeurs obtenues pour les paramètres d'écoulement sont proches des valeurs mesurées grâce aux essais de pompage effectués dans le bassin.

La comparaison, pour les deux périodes de calibration, des hauteurs piézométriques calculées et observées est présentée aux Figures 7 et 8.

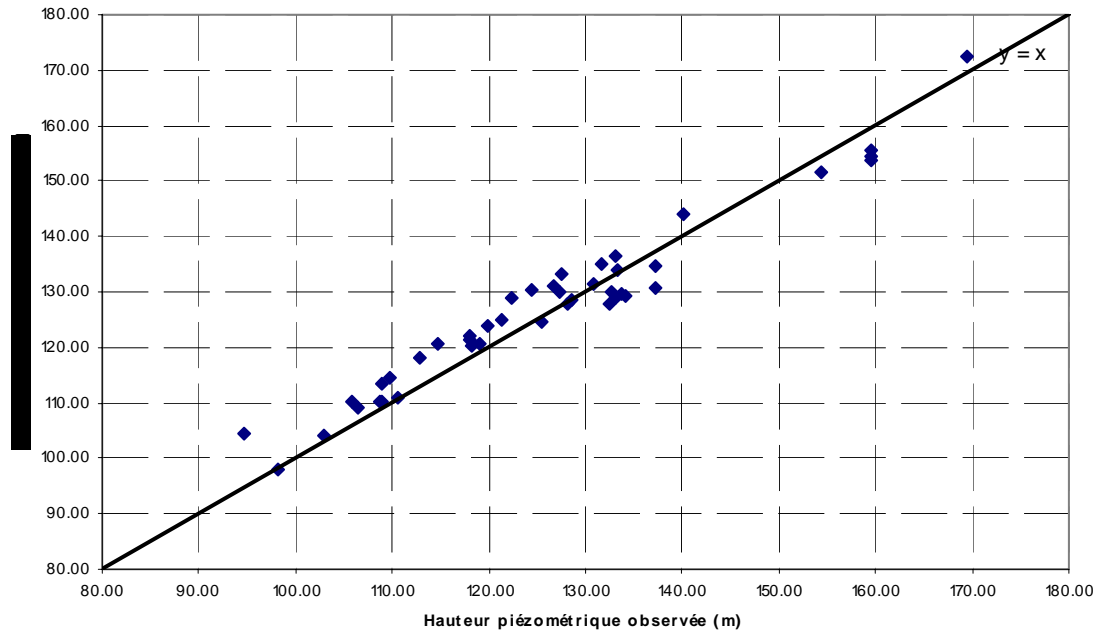


Figure 7. Comparaison des hauteurs piézométriques mesurées et calculées en situation de basses eaux

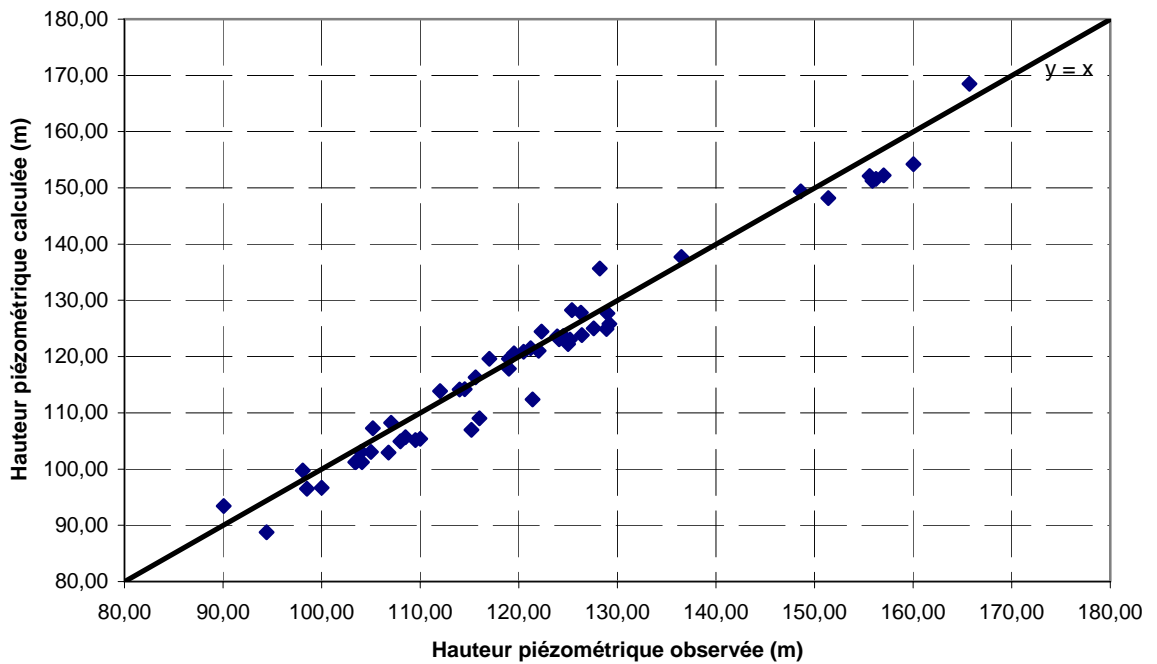


Figure 8. Comparaison des hauteurs piézométriques mesurées et calculées en situation de hautes eaux.

Les cartes piézométriques simulées obtenues respectivement en conditions de basses eaux et de hautes eaux sont présentées aux Figures 9 et 10 ci-dessous.

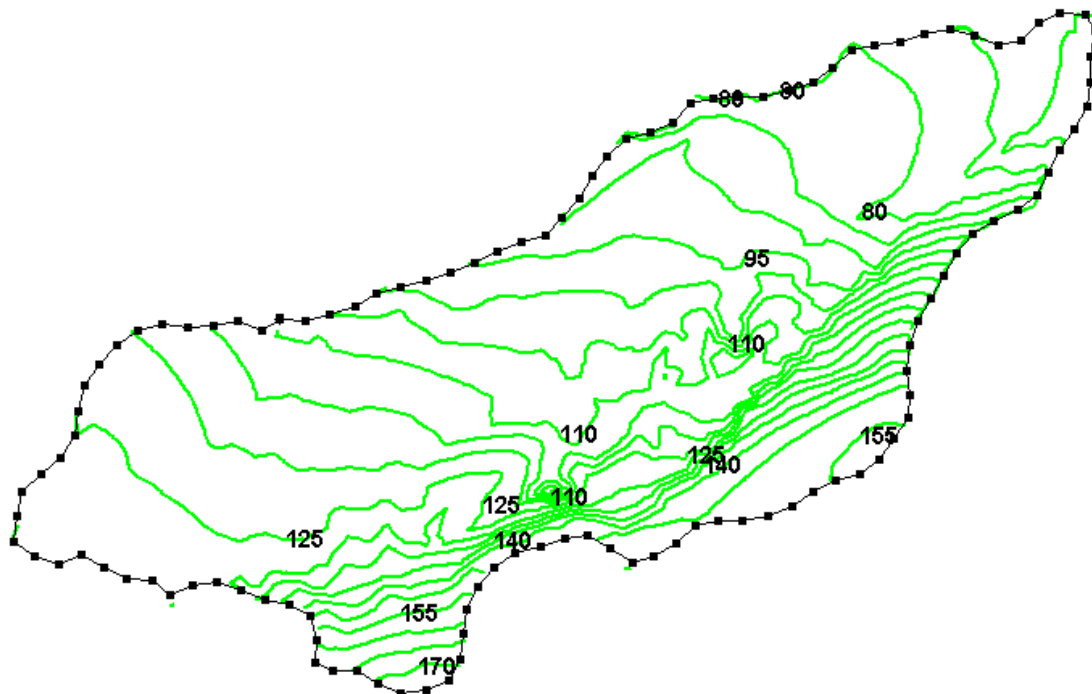


Figure 9. Carte piézométrique calculée en période de basses eaux.

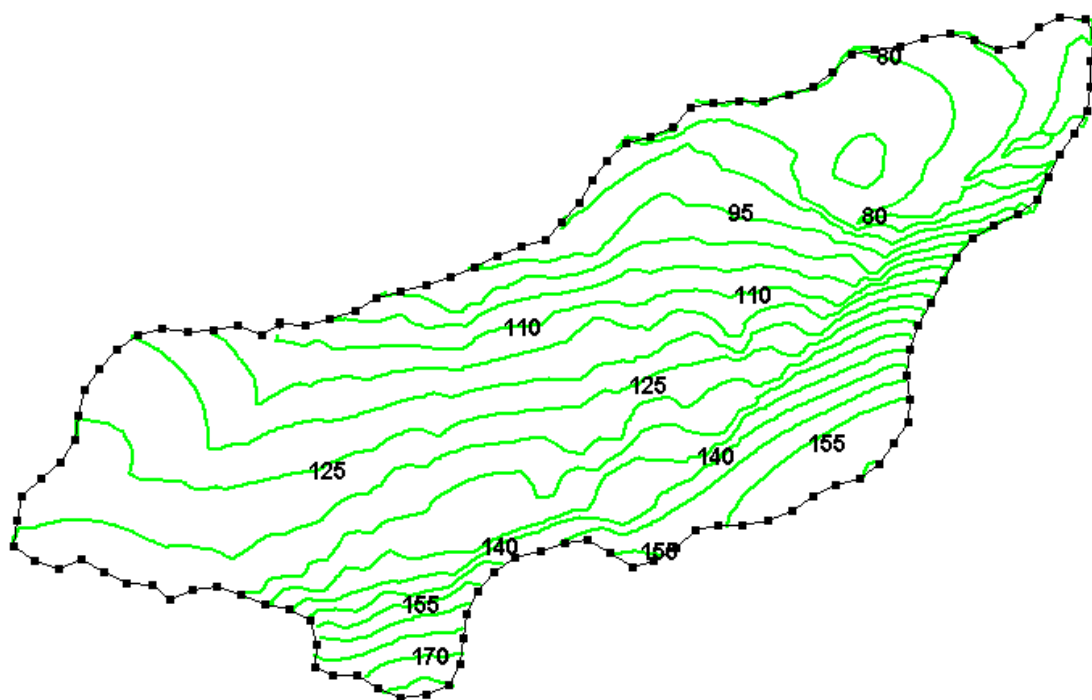


Figure 10. Carte piézométrique calculée en période de hautes eaux.

En situation de basses eaux, les écarts les plus importants par rapport à l'allure générale de la piézométrie mesurée sont observés dans la partie Sud-Est du bassin (au droit de la faille de Horion-Hozémont), à l'Ouest et à proximité de la frontière Sud du bassin. Ceci est probablement imputable à un trop fort contraste de conductivité hydraulique entre les vallées sèches et la zone fracturée à proximité de la faille d'une part, la craie inférieure d'autre part. En moyenne, les valeurs calculées sont légèrement inférieures (de 1.5 m environ) aux valeurs observées. Localement, des différences de plus de 5 m sont observées mais, dans l'ensemble, l'accord entre les valeurs de hauteurs piézométriques calculées et les valeurs observées est bon.

En situation de hautes eaux, la piézométrie calculée reflète assez bien l'allure générale de la piézométrie dans le bassin. Les différences les plus importantes sont constatées dans la partie Sud-Est (le drainage par la faille de Horion-Hozémont est plus important qu'il ne l'est en réalité) ainsi qu'à proximité de la frontière Sud de celui-ci. En moyenne, les valeurs calculées sont supérieures (de 1.2 m environ) aux valeurs observées. En particulier, un biais positif est constaté pour les hauteurs piézométriques inférieures à 130 m. A nouveau, des différences de plus de 5 m sont observées localement, mais l'accord entre les valeurs de hauteurs piézométriques calculées et observées reste bon.

2.4.3.3 Sous modèle Massif ardennais

2.4.3.3.1 Contexte géologique et hydrogéologique

Sous le terme « massif ardennais » sont regroupées les formations gréseuses éodévoniennes, schisto-gréseuses siluriennes, ordoviciennes et cambriennes du Sud-Est de la Région Wallonne. Les sous modèles du massif ardennais sont principalement constitués des unités hydrogéologiques suivantes : socle cambrien, dévonien inférieur-moyen, gedinnien. Pour certains des sous modèles de cette région, s'ajoutent d'autres unités hydrogéologiques correspondant à des formations plus récentes. Ces particularités seront exposées dans la suite.

Du point de vue hydrogéologique, le massif ardennais est caractérisé par de petits aquifères logés dans les grès et quartzites fissurés. Les crêtes topographiques gréseuses et quartzites paléoaltérées en formations sableuses peuvent également être aquifères. Le contact entre couches perméables et peu perméables constitue les frontières principales de ces aquifères. L'exploitation des nappes du massif ardennais est très locale.

2.4.3.3.2 Division en sous-modèles

Le massif ardennais est modélisé par 7 sous modèles :

- Ardenne-Lesse : le sous modèle Ardenne_Lesse comprend les bassins hydrologiques de la Lesse et de ses affluents entièrement situés sur le massif ardennais. Le sous-sol du sous modèle est constitué des formations schisto-gréseuses du Couvinien, Burnotien, Coblencien et du Gedinnien.

Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :

- Socle cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien
- Ardenne-Semois : le sous modèle Ardenne_Semois comprend les bassins hydrologiques de la Semois et de ses affluents entièrement situés sur le massif ardennais. Le sous-sol du sous modèle est constitué des formations schisto-gréseuses du Couvinien, Burnotien, Coblencien et du Gedinnien. A ces formations d'âge primaire s'ajoutent des formations secondaires d'allure monoclinale reposant en discordance sur les formations primaires. Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :

- Socle cambrien
- Dévonien inférieur-moyen
- Gedinnien
- Jamoigne
- Habay-Attart-Mortinsart

- Ardenne-Ourthe : le sous modèle Ardenne_Ourthe comprend les bassins hydrologiques de l'Ourthe et de ses affluents entièrement situés sur le massif ardennais. Le sous-sol du sous modèle est constitué des formations schisto-gréseuses du Couvinien, Burnotien, Coblencien et du Gedinnien.

Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :

- Socle cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien
- Ardenne-Amblève : le sous modèle Ardenne_Amblève comprend les bassins hydrologiques de l'Amblève et de ses affluents entièrement situés sur le massif ardennais.

Le sous-sol du sous modèle est constitué des formations schisto-gréseuses du Couvinien, Burnotien, Coblencien et du Gedinnien.

Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :

- Socle cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien
- Ardenne-Vesdre : le sous modèle Ardenne_Vesdre comprend les bassins hydrologiques de la Vesdre et de ses affluents entièrement situés sur le massif ardennais. Ce sous modèle a la particularité de comprendre non seulement les formations du socle Cambrien, du Dévonien et du Gedinnien, mais également des formations plus récentes (Givetien, Frasnien, Famennien et Carbonifère). Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous-modèle sont les suivantes :
 - Socle cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien
 - Givetien
 - Frasnien
 - Fa1-Fr2-Frd
 - Fa2-Fa1c
 - Calcaires carbonifères
- Ardenne-Meuse-amont-droit : le sous modèle Ardenne_Meuse_amont_droit comprend les bassins hydrologiques de la Meuse et de ses affluents en rive droite situés sur le massif ardennais. Ce sous modèle a la particularité de comprendre non seulement les formations du Socle Cambrien, du Dévonien et du Gedinnien, mais aussi la plaine alluviale de la Meuse. Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :
 - Socle Cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien a

- Gedinnien
- Plaine alluviale
- Ardenne-Meuse-amont-gauche : le sous modèle Ardenne_Meuse_amont_gauche comprend les bassins hydrologiques de la Meuse et de ses affluents en rive gauche situés sur le massif ardennais. Ce sous modèle comprend également la plaine alluviale de la Meuse. Les unités hydrogéologiques considérées dans ce sous modèle sont les suivantes :
 - Socle Cambrien
 - Dévonien inférieur-moyen
 - Gedinnien a
 - Gedinnien
 - Plaine alluviale

2.4.3.3.3 Discrétisation de la géologie

Etant donné que les aquifères contenus dans ces formations terrigènes sont d'étendues locales, il est proposé de découper tous ces sous modèles en sous domaines (Annexes 3.1 à 3.7) suivant les limites des sous-bassins hydrographiques, ces dernières étant considérées comme des frontières imperméables. Les échanges entre sous domaines sont donc supposés nuls pour tous les sous modèles du massif ardennais, à l'exception des sous modèles suivants : « Ardenne-Vesdre », « Ardenne-Meuse-amont-droit » et « Ardenne-Meuse-amont-gauche ».

« Ardenne-Vesdre » présente la particularité de contenir un sous domaine constitué d'une bande calcaire, ce qui implique d'éventuels échanges avec les sous domaines adjacents.

« Ardenne-Meuse-amont-droit » et « Ardenne-Meuse-amont-gauche » sont caractérisés par la présence de la plaine alluviale de la Meuse, cette dernière pouvant interagir avec les sous domaines voisins.

La discrétisation a été réalisée sur base de la digitalisation des unités hydrogéologiques et des sous domaines. Les sous modèles du massif ardennais étant peu caractérisés et possédant des ressources en eaux souterraines peu importantes, une discrétisation grossière a été adoptée. Cette discrétisation est à l'origine d'un maillage 2D. Elle est obtenue en redistribuant les nœuds, qui définissent les arcs des limites des unités hydrogéologiques et des sous domaines, à une fréquence spatiale moyenne de 1 nœud/1000 m.

Sur base du maillage 2D, un maillage 3D à une couche a ensuite été élevé en prenant

comme sommet du maillage la valeur du MNT interpolée en chaque nœud et comme base la valeur du MNT diminuée de 20 mètres.

Les Tableaux 6 à 12 présentent les principales caractéristiques des sous modèles du massif ardennais.

Sous-modèle « Ardenne-Lesse »	
Nombre d'éléments	1532
Nombre de nœuds	1870
Nombre de sous domaines	7
Conditions de Fourier :	
- rivières	375 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	1532 faces
Nombre de captages pris en compte	33
Superficie	529 km ²
Volumes prélevés	3.3 mm/an ($1.75 \cdot 10^6$ m ³ /an)

Tableau 6. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne-Lesse »

Sous-modèle « Ardenne-Ourthe »	
Nombre d'éléments	2541
Nombre de nœuds	3234
Nombre de sous domaines	16

Conditions de Fourier :	
- rivières	714 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	2541 faces
Nombre de captages pris en compte	18
Superficie	956 km ²
Volumes prélevés	0.98 mm/an (9.45*10 ⁵ m ³ /an)

Tableau 7. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne-Ourthe »

Sous-modèle « Ardenne-Semois »	
Nombre d'éléments	3285
Nombre de nœuds	4092
Nombre de sous domaines	16
Conditions de Fourier :	
- rivières	908 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	3285 faces
Nombre de captages pris en compte	46
Superficie	1030 km ²
Volumes prélevés	2.3 mm/an (2.35*10 ⁶ m ³ /an)

Tableau 8. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne-Semois »

Sous-modèle « Ardenne-Ambève »	
Nombre d'éléments	2632
Nombre de nœuds	3260
Nombre de sous domaines	13
Conditions de Fourier :	
- rivières	669 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	2632 faces
Nombre de captages pris en compte	69
Superficie	950 km ²
Volumes prélevés	3.81 mm/an (3.62 * 10 ⁶ m ³ /an)

Tableau 9. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne-Ambève »

Sous-modèle « Ardenne-Vesdre »	
Nombre d'éléments	1351
Nombre de nœuds	1754
Nombre de sous domaines	8
Conditions de Fourier :	
- rivières	386 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	1351 faces

Nombre de captages pris en compte	27
Superficie	403 km ²
Volumes prélevés	3.77 mm/an (1.51*10 ⁶ m ³ /an)

Tableau 10. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne-Vesdre »

Sous-modèle « Ardenne-Meuse-amont-droit »	
Nombre d'éléments	2587
Nombre de nœuds	3510
Nombre de sous domaines	9
Conditions de Fourier :	
- rivières	Meuse : 263 noeuds Autres rivières : 294 faces
- latérales	0 face
Conditions de Cauchy	2587 faces
Nombre de captages pris en compte	10
Superficie	317 km ²
Volumes prélevés	1.12 mm/an (3.54*10 ⁵ m ³ /an)

Tableau 11. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne- Meuse-amont-droit »

Sous-modèle « Ardenne-Meuse-amont-gauche »	
Nombre d'éléments	2711

Nombre de nœuds	3710
Nombre de sous domaines	11
Conditions de Fourier : - rivières - latérales	Meuse : 263 noeuds Autres rivières : 336 faces 0 face
Conditions de Cauchy	2711 faces
Nombre de captages pris en compte	0 (pas de données sur les captages français)
Superficie	398 km ²
Volumes prélevés	Pas de données sur les captages français

Tableau 12. Caractéristiques principales du sous modèle « Ardenne- Meuse-amont-gauche »

2.4.3.3.4 Simulations

Dans chacun des sous modèles, les écoulements en régime permanent ont été simulés. Les paramètres introduits dans ces modèles sont présentés pour chaque sous modèle dans les Tableaux 13 à 19 repris ci-dessous. La distribution spatiale des paramètres est liée à la géologie. Les Figures 11 à 17 présentent les cartes piézométriques dessinées sur base des résultats des modèles

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}

Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
-------	--------------------	----------------------

Tableau 13. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_lesse

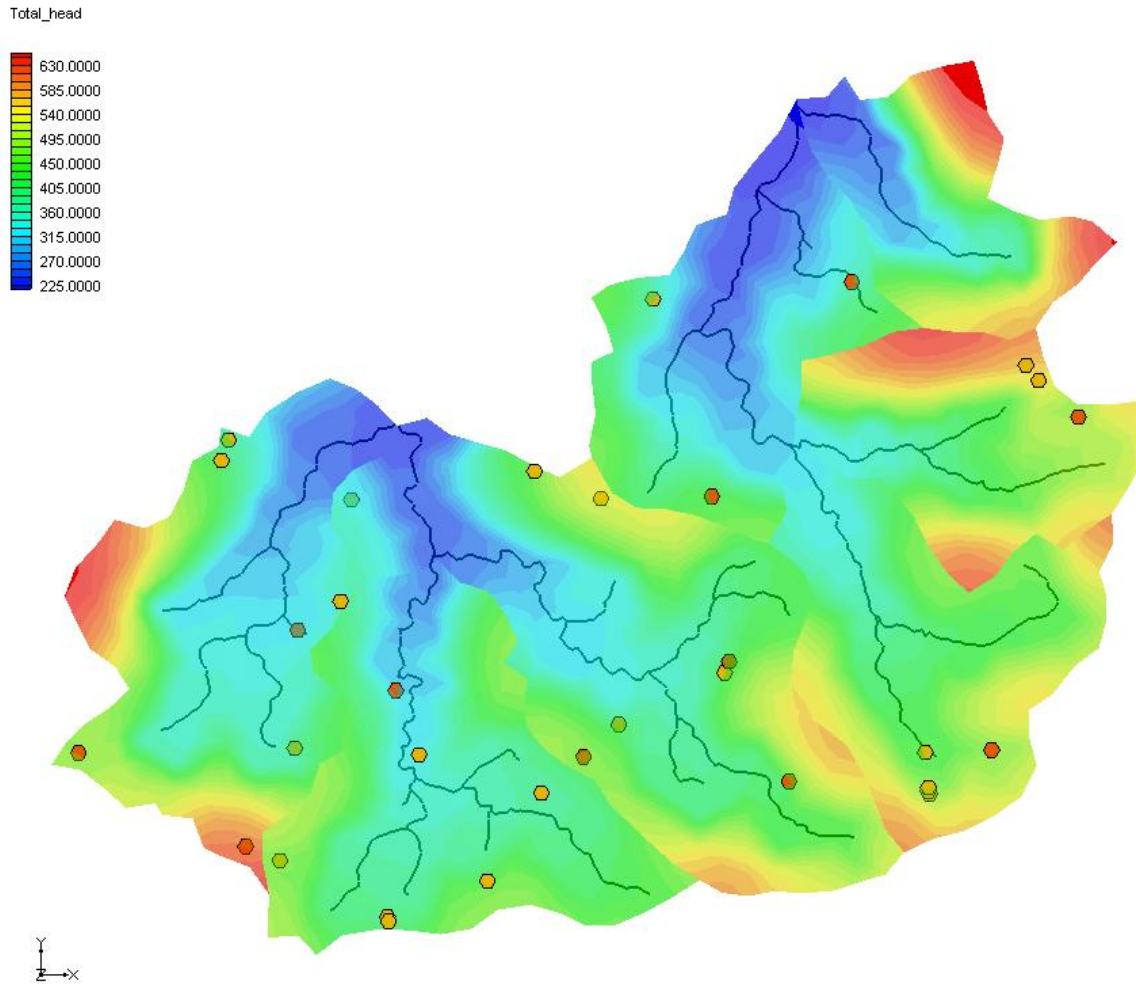


Figure 11. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Lesse" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Gedinnien	1×10^{-6}	1.45×10^{-9}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 14. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Ourthe

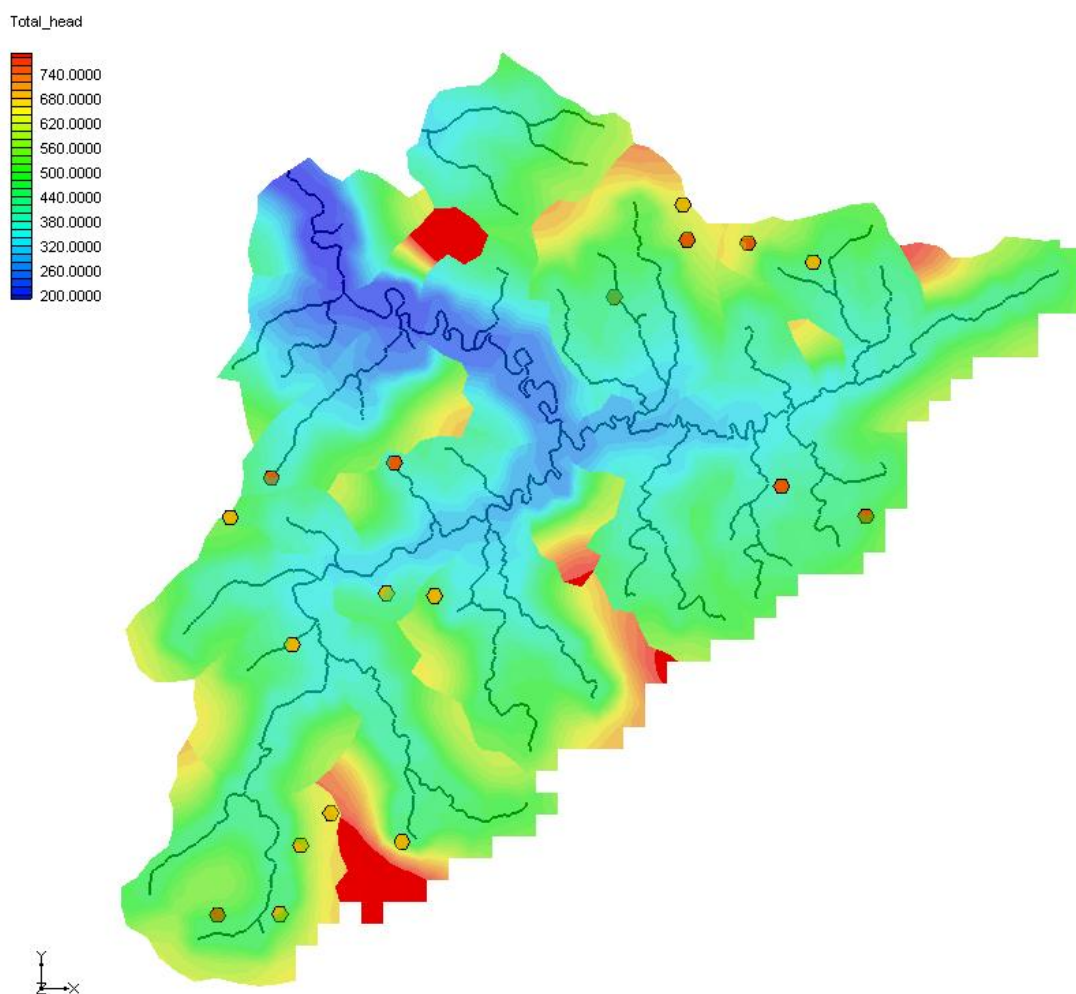


Figure 12. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Ourthe" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Habay-Attert-Mortinsart		2.4×10^{-9}
Jamoigne		6.3×10^{-10}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.45×10^{-9}

Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
-------	--------------------	----------------------

Tableau 15. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Semois

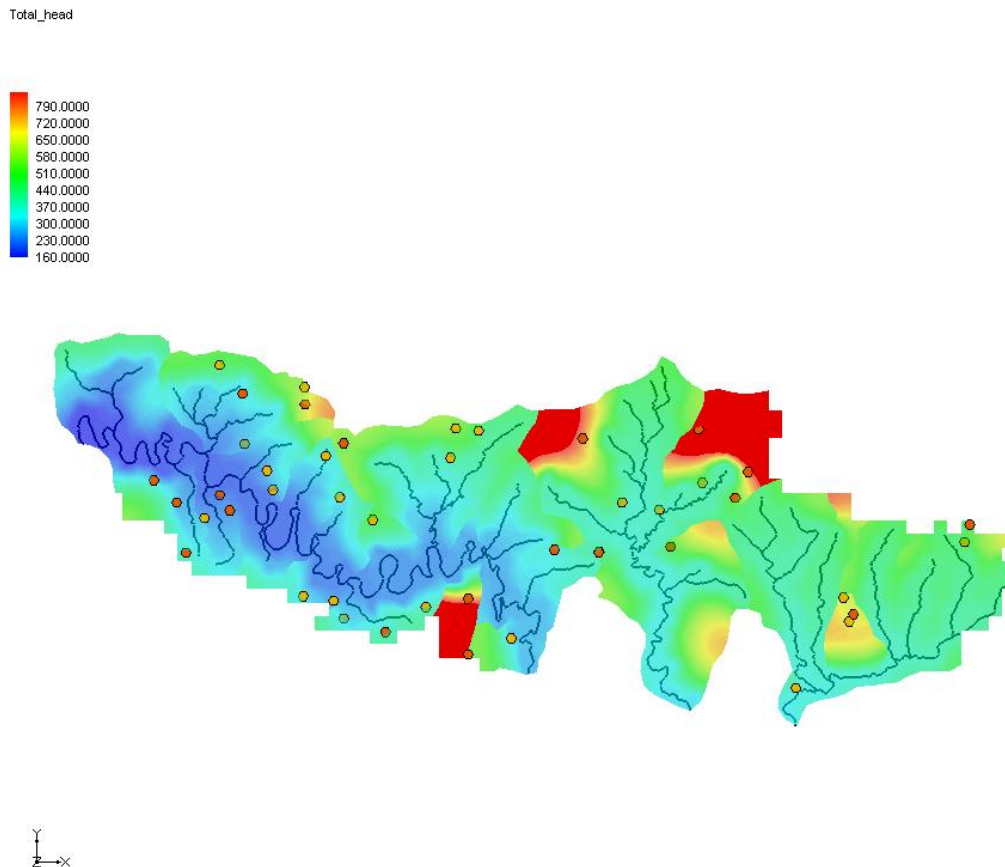


Figure 13. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Semois" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.41×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 16. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Amblève

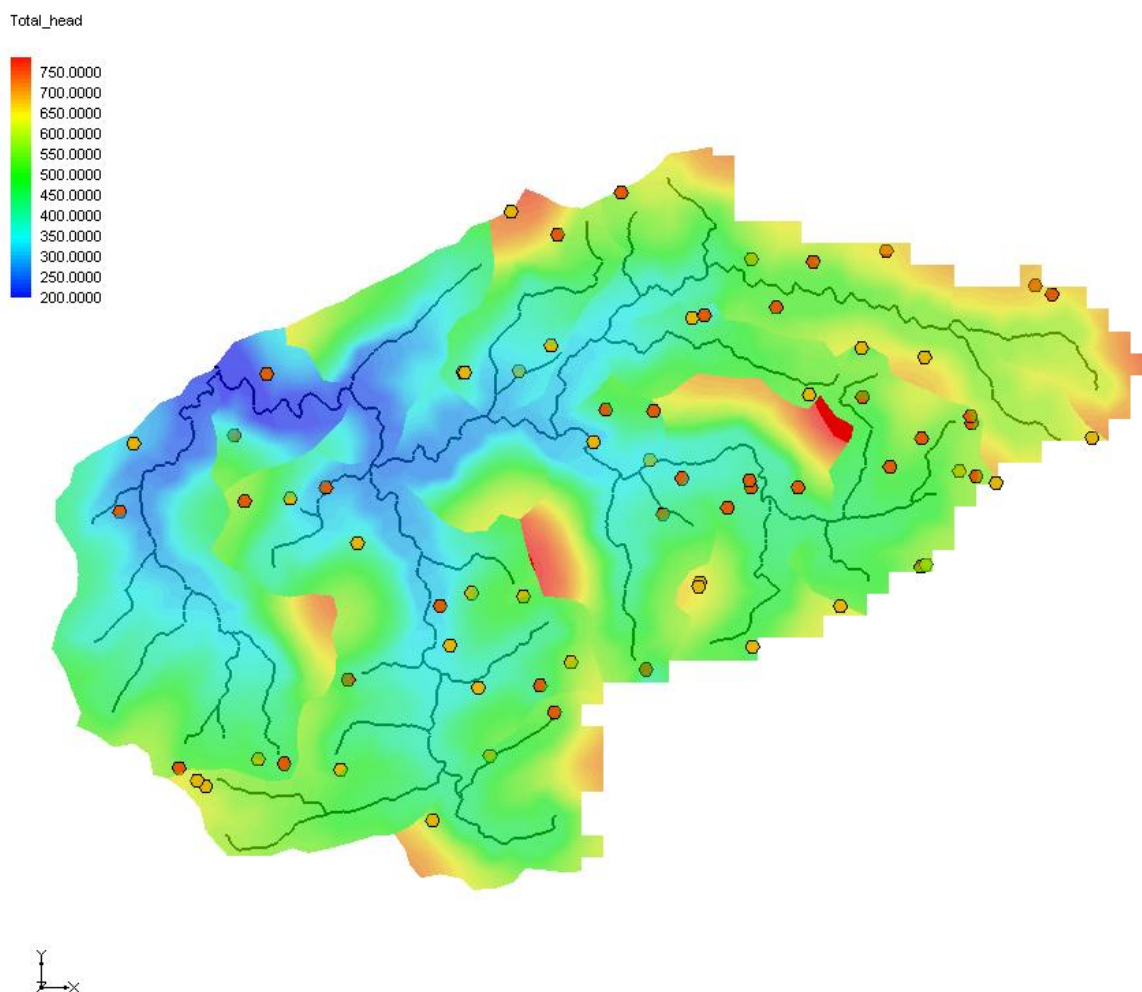


Figure 14. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Amblève" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Calcaires carbonifères	1×10^{-4}	6.35×10^{-9}
Fa2-Fa1c	1×10^{-5}	3.5×10^{-9}
Fa1-Fr2-Frd	1×10^{-6}	6.3×10^{-10}
Frasnien	1×10^{-7}	4.81×10^{-9}
Givetien	5×10^{-5}	4.8×10^{-9}

Gedinnien	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 17. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Vesdre

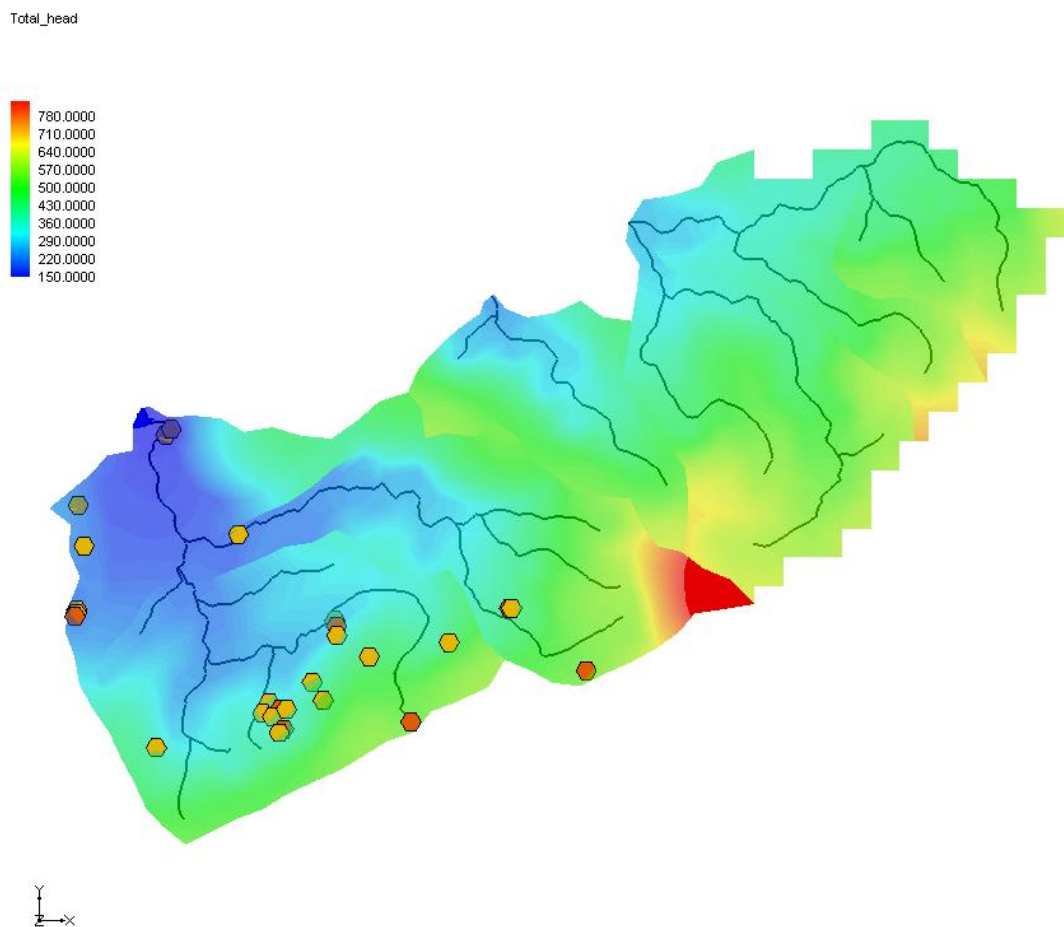


Figure 15. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Vesdre" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Plaine alluviale	1×10^{-3}	5.5×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Gedinnien a	1×10^{-6}	3.2×10^{-9}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 18. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Meuse_amont_droit

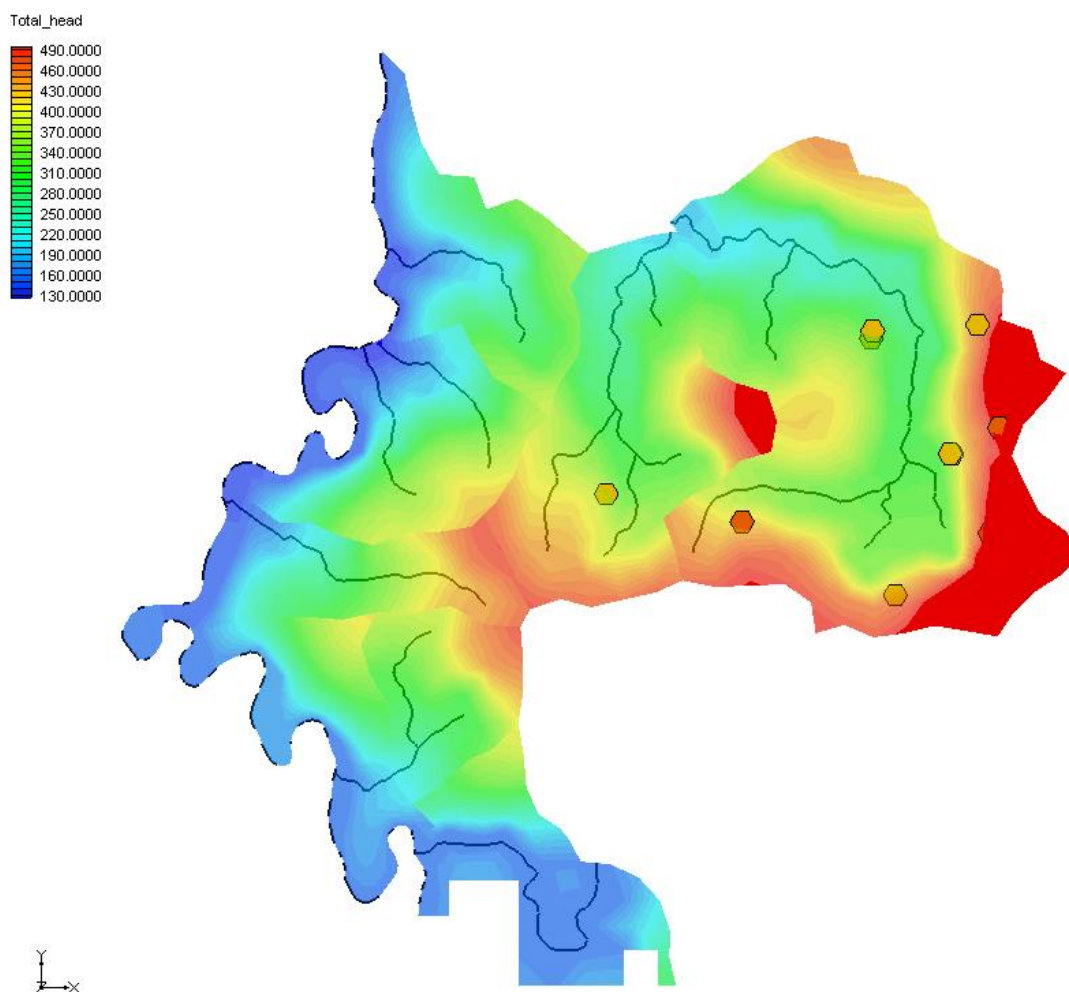


Figure 16. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Meuse amont droit" en régime permanent

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique (m/sec)	Recharge (m/sec)
Plaine alluviale	1×10^{-3}	5.5×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Gedinnien a	1×10^{-6}	3.2×10^{-9}
Dev inf-moy	1×10^{-6}	1.61×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 19. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Ardenne_Meuse_amont-gauche

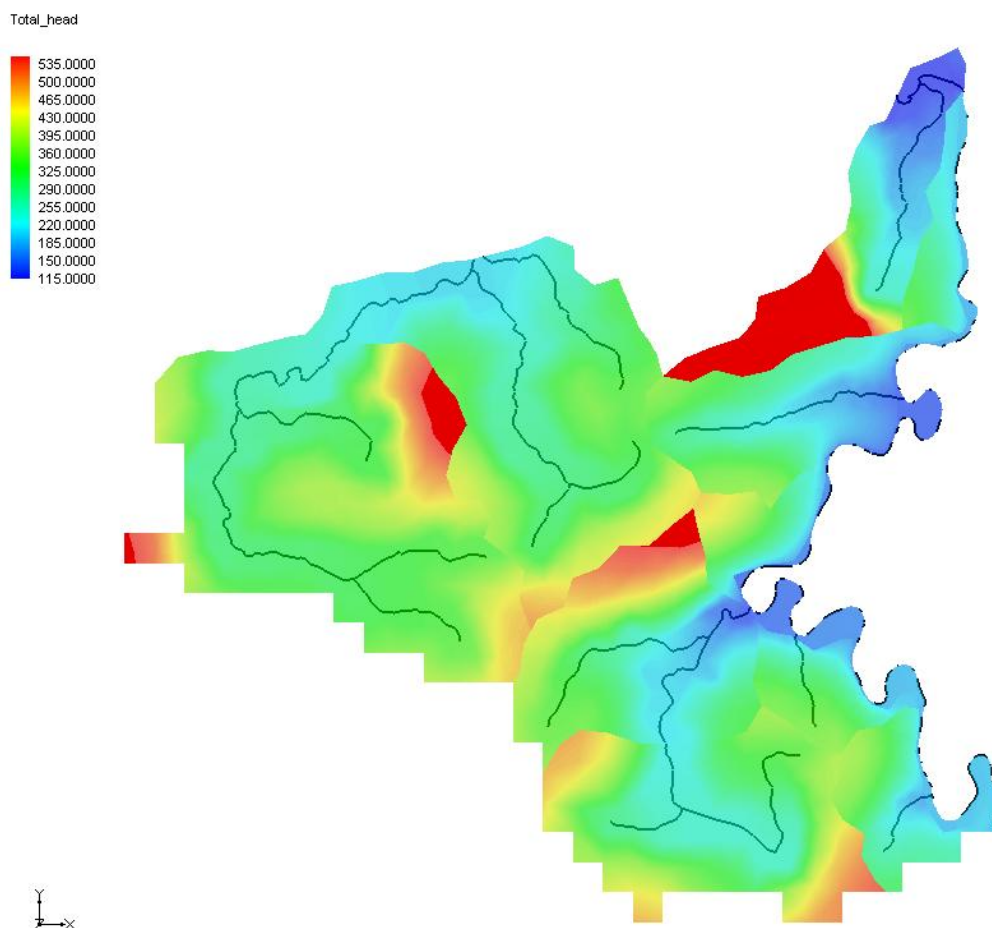


Figure 17. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Ardenne Meuse amont gauche" en régime permanent

Discussion des résultats

Faute de données, les sous modèle ne peuvent malheureusement être calibrés. De manière générale, quelques constatations peuvent néanmoins être établies à partir des cartes piézométriques dessinées sur base des résultats du modèle.

- la piézométrie suit de manière approximative la topographie ;
- les ruisseaux constituent les exutoires des aquifères ;
- dans certaines zones, les hauteurs piézométriques calculées sont plus hautes que la topographie. Ce défaut du modèle peut s'expliquer par la densité trop faible du réseau hydrographique représenté (ce qui entraîne un drainage insuffisant des terrains ;
- les hauteurs piézométriques sont trop hautes dans certaines vallées. Ce phénomène s'explique soit par le drainage insuffisant des ruisseaux ou par une taille de maille excessive (le fond des vallées est ainsi considéré à une cote supérieure à celle correspondant à la réalité).

2.4.3.4 Sous modèle Massif Vesdre

2.4.3.4.1 Géologie et hydrogéologie

Dans le massif de la Vesdre, les roches d'âge primaire appartiennent aux formations du système Dévonien (psammites et schistes du Famennien) et du système Carbonifère (calcaire du Viséen et du Tournaisien). Celles-ci ont été fortement plissées et faillées.

Après érosion et pénéplanation, la surface du socle paléozoïque a été recouverte par des sédiments du Mésozoïque (Crétacé) formant le massif crétacé du Pays de Herve. Ces sédiments sont constitués à leur base de roches argilo-sableuses et sont recouverts par des craies.

Après une nouvelle phase d'érosion et de pénéplanation, les formations mésozoïques ont été recouvertes par des sédiments tertiaires. Les roches meubles argilo-sableuses tertiaires observées en surface représentent principalement l'Oligocène. Elles ne subsistent par le jeu de l'érosion que localement dans des poches de dissolution affectant les craies du Crétacé.

Enfin, durant le Quaternaire, la région a été recouverte par des limons, en général d'origine éolienne sur les plateaux, des colluvions sur les pentes et des dépôts alluvionnaires, récents dans le fond des vallées et plus anciens sous formes de terrasses fluviales. Ces dépôts sont particulièrement importants dans la vallée de la Meuse.

En ce qui concerne, l'hydrogéologie, des nappes aquifères peuvent être distinguées dans les dépôts alluvionnaires, dans les craies et les sables tertiaires, dans les synclinaux calcaires du socle primaire ainsi que dans les grès fissurés.

2.4.3.4.2 Découpage en sous modèles

Le massif de la Vesdre a été représenté par un seul sous modèle. Celui-ci a été divisé en un certain nombre de sous domaines sur base des unités hydrogéologiques. On distingue ainsi du nord au sud (voir carte en Annexe 4.1):

- un sous domaine représentant les alluvions de la Meuse;
- un sous domaine représentant le Houiller;
- un sous domaine représentant les calcaires de la base du Carbonifère (Carb) et les psammites et les schistes du Famennien (Fa2-Fa1c);
- un sous domaine représentant les schistes du Famennien et du Frasnien (Fa1-Fr2-Frd);
- un sous domaine représentant les calcaires du Frasnien (Fr) et du Givetien;
- un ensemble de sous domaine représentant les autres formations du Dévonien et du socle primaire.

En fonction des caractéristiques hydrogéologiques des matériaux les constituant, il est possible que des échanges existent entre ces différents sous domaines.

Par ailleurs, la plupart des aquifères considérés présentant une extension transfrontalière, il s'est avéré nécessaire de pouvoir tenir compte, dans la modélisation, des échanges entre le sous modèle Massif Vesdre et l'extérieur du territoire wallon. Cependant étant donné qu'aucune étude transfrontalière de caractérisation de ces aquifères n'a encore été réalisée, la quantification de ces flux n'a pas été possible.

Enfin, étant donné la complexité de l'hydrogéologie dans le massif de la Vesdre (aquifères superposés,...) et le peu de données disponibles pour caractériser celle-ci, les formations secondaires et notamment les craies du Crétacé n'ont pas été prises en compte dans la modélisation. Le modèle "Massif Vesdre" reste encore très simplifié et nécessiterait des développements ultérieurs.

2.4.3.4.3 Discrétisation

La discrétisation a été réalisée sur base de la digitalisation des unités hydrogéologiques et des sous domaines. Le sous modèle Massif Vesdre présentant une grande variété d'unités hydrogéologiques (notamment dans le Sud, le Nord étant principalement occupé par le

Houiller), une discrétisation assez fine a été réalisée en redistribuant les nœuds des axes délimitant les sous domaines et les unités hydrogéologiques à raison de 1 nœud tous les 500 m (en moyenne). La Meuse a été représentée de façon explicite (contrairement aux autres rivières). Les nœuds y sont répartis avec une densité moyenne de 1 nœud tous les 200 m. Cette opération de discrétisation a permis d'obtenir un maillage 2D qui a été converti en maillage 3D à une couche d'élément par extrusion. Le sommet de ce maillage correspond au MNT interpolé entre chaque nœud, tandis que la base correspond au MNT diminué de 50 m. Le modèle ainsi obtenu présente les caractéristiques suivantes (Tableau 20)

Nombre d'éléments:	4669
Nombre de nœuds:	5814
Nombre de sous domaines:	11
Conditions de Fourier: - rivières - faces latérales:	Meuse: 100 nœuds Autres rivières: 841 faces 25 faces
Conditions de Cauchy:	4669 faces
Nombre de captages pris en compte:	15
Superficie:	462 km ²
Volumes prélevés:	3,0 mm/an (1,40.10 ⁶ m ³ /an)
Recharge:	78,8 mm/an (3,64.10 ⁷ m ³ /an)

Tableau 20. Caractéristiques principales du sous modèle Massif_Vesdre

2.4.3.4.4 Simulation

Les paramètres suivant (tableau 21) ont été adoptés pour les simulations d'écoulement en régime permanent.

Matériau	Conductivité hydraulique (m/s)	Recharge (m/s)
Socle	1×10^{-7}	1.6×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Dév inf-moy	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Givetien	5×10^{-5}	4.8×10^{-9}
Fr	1×10^{-7}	4.8×10^{-9}
Fa1-Fr2-Frd	1×10^{-7}	6.3×10^{-10}
Fa2C-Fa1c	1×10^{-5}	3.5×10^{-9}
Carb	1×10^{-4}	6.35×10^{-9}
Houiller	1×10^{-6}	2.40×10^{-09}
Plaine alluviale	1×10^{-3}	5.50×10^{-09}

Tableau 21. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle Massif_Vesdre

Les échanges avec l'extérieur à travers certaines frontières latérales sont régulées par une condition de type Fourier telle que les flux traversant les frontières soient proportionnels à la différence de niveau qui existe entre la hauteur piézométrique dans le sous domaine et un niveau de référence (placé arbitrairement à 10 m sous la surface topographique). Le facteur de proportionnalité est pris égal à la conductivité hydraulique dans le sous domaine considéré.

2.4.3.4.5 Premiers résultats

Faute de données, les simulations n'ont pu être réalisées qu'en régime permanent (Figure 18) et le modèle n'a malheureusement pas pu être calibré. La seule contrainte que devaient respecter les résultats du modèle était que les niveaux piézométriques calculés soient inférieurs aux niveaux topographiques. Après vérification, il apparaît que cette contrainte est respectée sur la majeure partie du sous modèle.

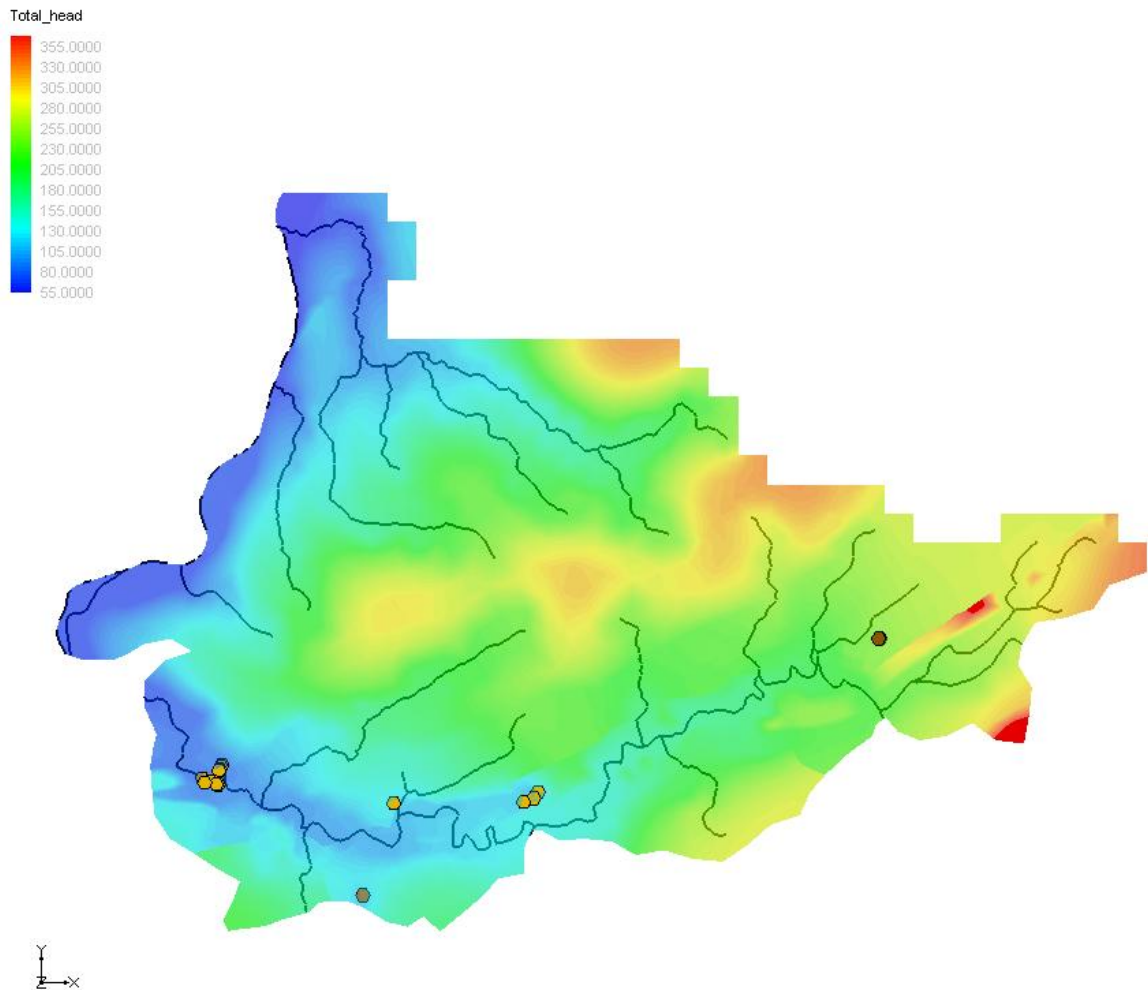


Figure 18. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Massif Vesdre" en régime permanent

Par ailleurs, l'examen de la carte piézométrique montre que les aquifères sont principalement drainés par la Meuse sur la frontière ouest, la Berwinne et ses affluents au Nord et par la Vesdre et ses affluents au Sud. Le modèle met également en évidence la présence d'une crête de partage hydrogéologique entre les bassins de la Berwinne et le bassin de la Vesdre.

Enfin, il montre que l'exploitation des ouvrages de captage dans la zone couverte par ce sous modèle ne perturbe pas la piézométrie régionale.

Il convient de rappeler que ces résultats ne concernent pas l'aquifère des craies du Pays de Herve qui n'a pas été modélisé ici. Une telle modélisation demanderait une connaissance plus approfondie de l'hydrogéologie régionale.

2.4.3.5 Les sous modèles du Synclinorium de Dinant

2.4.3.5.1 Contexte géologique et hydrogéologique

Le synclinorium de Dinant est constitué d'une succession de brachy- synclinaux et anticlinaux d'axes Ouest-Est (dans l'Entre Sambre et Meuse) à Sud-Ouest – Nord-Est (dans la partie occidentale du Condroz). Le cœur de ces synclinaux est généralement constitué de calcaires viséens et tournaisiens, le noyau des anticlinaux étant formé de formations schisto-gréseuses du Famennien. Par endroits, des karsts se sont développés dans les calcaires, plus particulièrement dans le Viséen. Ces karsts sont comblés par des dépôts tertiaires (sables et argiles).

Les principales nappes aquifères sont localisées dans les calcaires carbonifères et dans les grès fissurés du Famennien. Au contact entre les schistes et les formations aquifères, des sources de débordement peuvent alimenter latéralement les aquifères.

Dans l'Entre Sambre et Meuse, les aquifères sont drainés par la Meuse qui les recoupe perpendiculairement. Cette région est également drainée par la Molinee au Sud et par le Burnot au Nord. Des exutoires existent également au niveau des ruisseaux s'écoulant du Sud vers le Nord et se jetant dans la Sambre. Les bassins hydrogéologiques ne coïncident généralement pas avec les bassins hydrologiques. Le bassin de la Molinee perd de l'eau vers la Meuse, notamment au niveau du méandre d'Hastière, suite à l'envoyage de la structure synclinale dans cette direction.

Dans le Condroz, on retrouve les mêmes structures synclinales drainées par le Bocq, le Samson, le Hoyoux et l'Ourthe. Dans cette région, certains bassins présentent également des pertes au niveau du bilan hydrogéologique, notamment le bassin du Bocq, vers la Meuse, suite à l'envoyage des structures synclinales vers le fleuve.

2.4.3.5.2 Les sous modèles

Le synclinorium de Dinant est modélisé par trois sous modèles :

- synclinorium de Dinant droit qui correspond à la partie du synclinorium de Dinant situé en rive droite de la Meuse.
- Bord Nord du synclinorium de Dinant gauche qui correspond à la partie du synclinorium de Dinant situé en rive gauche de la Meuse qui comprend les calcaires du Carbonifère et la bande Nord des calcaires du Frasnien et du Givetien.
- Bord Sud du synclinorium de Dinant gauche qui correspond à la partie du

synclinorium de Dinant situé en rive gauche de la Meuse qui comprend les calcaires du massif de Philippeville et la bande Sud des calcaires du Frasnien et du Givetien.

Chaque sous modèle a été découpé en sous domaines (Annexes 5.1 à 5.3):

- les calcaires frasniens et givetien ont été regroupés ;
- les calcaires carbonifères et les grès du sommet du Famennien (Fa2) ont été réunis ;
- la plaine alluviale constitue un sous domaine ;
- les formations schisto-gréseuses du Famennien et du massif ardennais ont été découpées en sous domaines sans interface sur base des bassins hydrologiques.

Au contact entre les sous domaines déterminés sur base des bassins hydrologiques et des sous domaines reprenant les calcaires, des interfaces permettant les échanges d'eau et de contaminant ont été définis. Tous les sous domaines en contact avec la plaine alluviale peuvent échanger de l'eau avec le sous domaine la représentant.

2.4.3.5.3 Discrétisation

La discrétisation a été réalisée sur base de la digitalisation des unités hydrogéologiques et des sous domaines. Les sous modèles du synclinorium de Dinant présentant une grande variété d'unités hydrogéologiques et un intérêt majeur dans le cadre de la gestion des ressources en eau, une discrétisation assez fine a été réalisée en redistribuant les nœuds des axes délimitant les sous domaines et les unités hydrogéologiques à raison de 1 nœud tous les 500 m (en moyenne). La Meuse a été représentée de façon explicite (contrairement aux autres rivières). Les nœuds y sont répartis avec une densité moyenne de 1 nœud tous les 200 m. Cette opération de discrétisation a permis d'obtenir un maillage 2D qui a été converti en maillage 3D à une couche d'élément. Le sommet de ce maillage correspond au MNT interpolé entre chaque nœud, tandis que la base correspond au MNT diminué de 50 m. Les Tableaux 23, 24 et 25 présentent respectivement les caractéristiques du sous modèle synclinorium de Dinant droit, Bord Nord du synclinorium de Dinant gauche et Bord Sud du synclinorium de Dinant gauche.

Nombre d'éléments:	30190
Nombre de nœuds:	36230
Nombre de sous domaines:	61

Conditions de Fourier:	
- rivières	Meuse: 665 nœuds Autres rivières: 4014 faces
- faces latérales:	/
Conditions de Cauchy:	30190 faces
Nombre de captages pris en compte:	110
Superficie:	2900 km ²
Volumes prélevés:	24 mm/an (7.08E+7 m ³ /an)

Tableau 23. Caractéristiques principales du sous modèle synclinorium de Dinant

Nombre d'éléments:	10192
Nombre de nœuds:	11948
Nombre de sous domaines:	17
Conditions de Fourier:	
- rivières	Meuse: 149 nœuds Autres rivières: 1346 faces
- faces latérales:	/
Conditions de Cauchy:	10192 faces
Nombre de captages pris en compte:	39
Superficie:	1010 km ²
Volumes prélevés:	? mm/an (m ³ /an)

Tableau 24. Caractéristiques principales du sous modèle Bord Nord du synclinorium de Dinant gauche

Nombre d'éléments:	6035
Nombre de nœuds:	7478
Nombre de sous domaines:	14
Conditions de Fourier:	
- rivières	Meuse: 136 nœuds Autres rivières: 935 faces
- faces latérales:	
Conditions de Cauchy:	6035 faces

Nombre de captages pris en compte:	7
Superficie:	643 km ²
Volumes prélevés:	1.21 mm/an (7.78 E+5 m ³ /an)

Tableau 25. Caractéristiques principales du sous modèle Bord Sud du synclinorium de Dinant gauche

2.4.3.5.4 Simulation

La distribution spatiale des paramètres d'écoulement et de la recharge est liée à la distribution spatiale des unités hydrogéologiques. Les paramètres suivant (Tableau 26) ont été adoptés pour les simulations d'écoulement en régime permanent.

Matériau	Conductivité hydraulique (m/s)	Recharge (m/s)
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Dév inf-moy	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
Givetien	5×10^{-5}	4.8×10^{-9}
Fr	1×10^{-6}	4.8×10^{-9}
Fa1-Fr2-Frd	1×10^{-6}	6.3×10^{-10}
Fa2C-Fa1c	1×10^{-5}	3.5×10^{-9}
Carb	1×10^{-4}	6.35×10^{-9}
Houiller	1×10^{-6}	2.4×10^{-9}
Plaine alluviale	1×10^{-3}	5.5×10^{-9}

Tableau 26. Valeur des paramètres d'entrée des sous modèles du synclinorium de Dinant

2.4.3.5.5 Premiers résultats

Faute de données, seules des simulations en régime permanent ont pu être effectuées et les sous modèles n'ont pu être calibrés. L'examen des résultats (Figures 19, 20 et 21 pour respectivement les sous modèles synclinorium de Dinant droit, Bord Nord du synclinorium de Dinant gauche et Bord Sud du synclinorium de Dinant gauche) permet quelques observations

communes quant aux résultats obtenus pour les trois sous modèles :

- les niveaux piézométriques calculés sont inférieurs aux niveaux topographiques sur la majeure partie des sous modèles ;
- les aquifères sont drainés par le réseau hydrique ;
- dans certaines zones des sous modèles, le niveau piézométrique est supérieur au niveau topographique. Ce résultat est principalement observé dans des zones de faible conductivité hydraulique non recoupées par le réseau hydrographique. Le réseau rivière représenté dans ces sous modèles n'est donc certainement pas suffisamment étendu pour drainer l'ensemble des sous modèles.
- l'exploitation des ouvrages de captage dans la zone couverte par ces sous modèles ne perturbe pas la piézométrie régionale.

De manière plus précise, les caractéristiques décrites ci-dessous peuvent être observées.

- Les formations du sous modèle « synclinorium de Dinant droit » sont principalement drainées par la Meuse, la Lesse et l'Ourthe.
- Dans le sous modèle « Bord Nord synclinorium de Dinant droit », les formations calcaires sont drainées par l'eau d'Heure et la Meuse. Une crête de partage hydrogéologique semble se dessiner entre ces deux cours d'eau. Sa localisation précise ne peut évidemment pas être déterminée par ce modèle. Les formations schisteuses de l'Ouest du sous modèle sont drainées par la Hantes et la Thure.
- Les formations du sous modèle « Bord Sud du synclinorium de Dinant droit » sont drainées par le Viroin au sud et l'Hermetton au Nord.

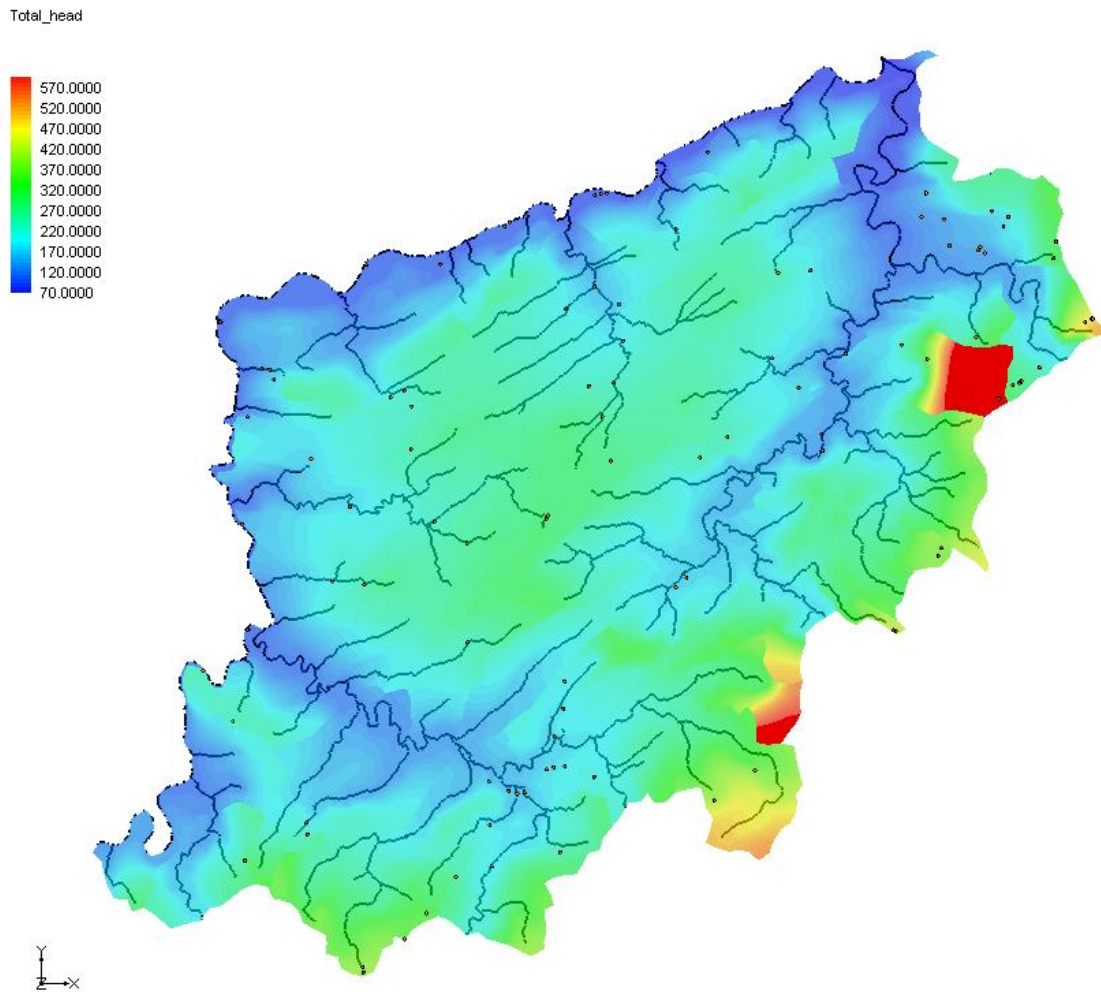


Figure 19. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Synclinorium de Dinant droit" en régime permanent

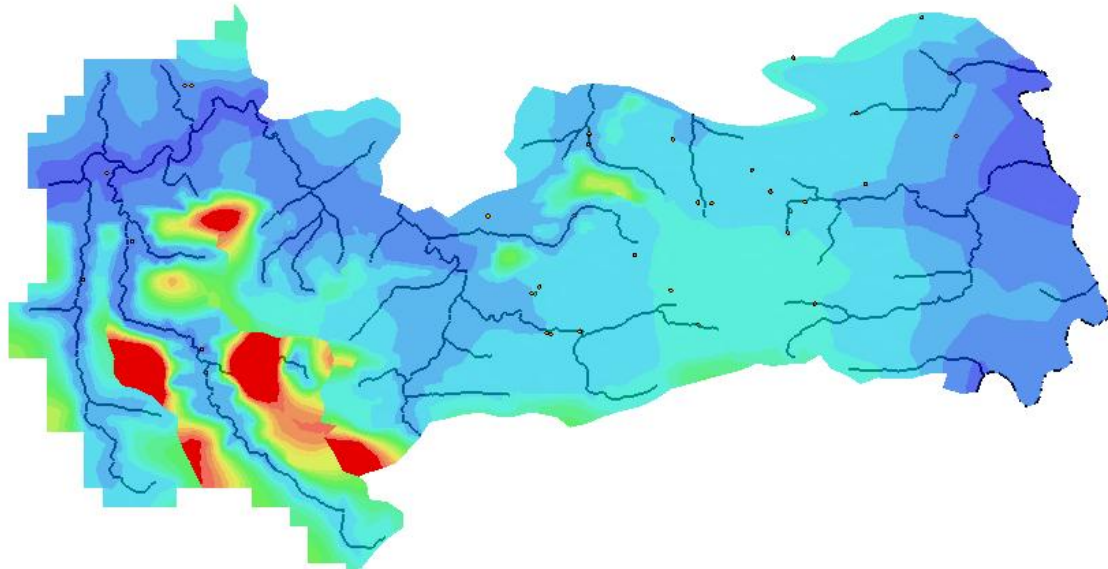


Figure 20. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Bord Nord Synclinorium de Dinant gauche" en régime permanent

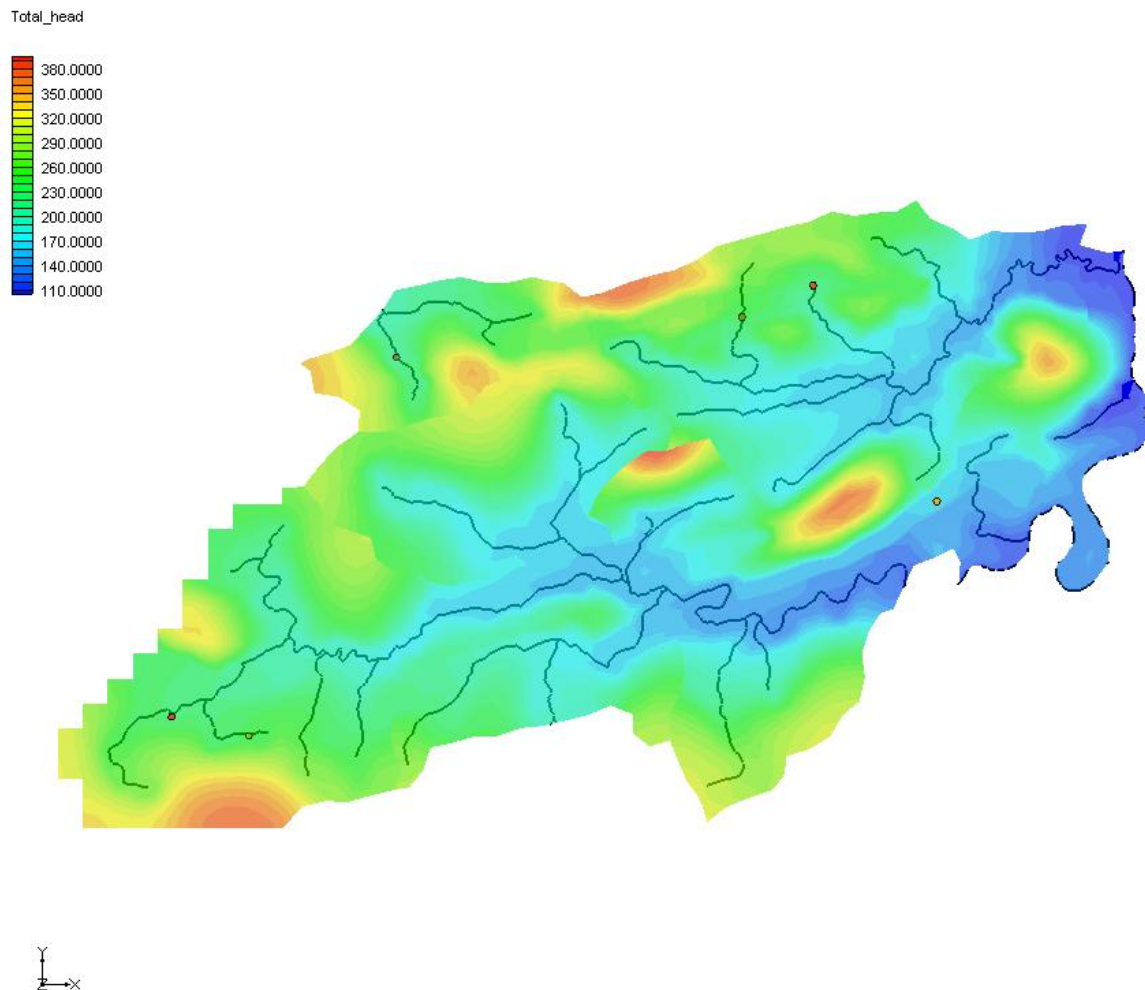


Figure 21. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Bord Sud Synclinorium de Dinant gauche" en régime permanent

2.4.3.6 Sous modèle Synclinorium de Namur

2.4.3.6.1 Géologie et hydrogéologie

Le Synclinorium de Namur est traversé, dans sa partie centrale, par une large bande de formations schisteuses du Houiller.

Au Nord, cette bande est bordée par des formations du Carbonifères et du Dévonien présentant une structure monoclinale d'axe Est-Ouest, avec un pendage Sud. Ces formations passent progressivement aux formations cambro-siluriennes vers le Nord. Celles-ci sont localement recouvertes par des formations tertiaires (argiles ypresiennes, sables bruxelliens et lediens) qui peuvent parfois ne subsister que sous forme de lambeaux dans les poches de dissolution. Vers l'est, ces formations tertiaires laissent la place aux formations crayeuses du Crétacé.

Au Sud de la bande de Houiller, dans l'Entre-Sambre-et-Meuse, les formations du

Carbonifère et du Dévonien font leur réapparition.

Concernant l'hydrogéologie, les principaux aquifères rencontrés dans le Synclinorium de Namur se situent:

- dans les calcaires dévoniens et carbonifères, ceux-ci sont séparés par les schistes et grès faillés du Famennien;
- dans les sables tertiaires, ceux-ci peuvent être localement séparés des aquifère localisés dans les formations primaires par les argiles de l'Yprésien inférieur lorsqu'elles sont présentes;
- dans les craies du Crétacé;
- dans la nappe alluviale de la Meuse.

2.4.3.6.2 Découpage en sous modèles

Le Synclinorium de Namur a été représenté par un seul sous modèle. Celui-ci a été divisé en un certain nombre de sous domaines sur base des unités hydrogéologiques. On distingue ainsi du Nord au Sud (voir carte jointe en Annexe 6.1):

- un vaste sous domaine représentant le massif de Brabant, reprenant les formations cambro-siluriennes, les sables du Bruxellien et les craies du Crétacé;
- deux sous domaines représentant principalement les formations calcaires du Dévonien;
- deux sous domaine représentant principalement les calcaires du Carbonifère;
- deux sous domaines représentant la large bande de Houiller;
- un ensemble de sous-domaines représentant les formations du Carbonifère et du Dévonien du Sud du Synclinorium
- un sous domaine représentant la plaine alluviale de la Meuse.

En fonction des caractéristiques des matériaux constituant ces différents sous domaines, il est possible qu'il y ait des échanges entre eux.

Par ailleurs, la plupart des aquifères considérés s'étendant au-delà de la frontière nord du sous modèle, il s'est avéré nécessaire de pouvoir tenir compte, dans la modélisation, des échanges entre le sous modèle Synclinorium de Namur et l'extérieur du territoire wallon. Cependant, nous ne disposons pas d'une estimation des flux susceptibles de traverser cette frontière.

2.4.3.6.3 Discrétisation

La discrétisation a été réalisée sur base de la digitalisation des unités hydrogéologiques et des sous domaines. Le sous modèle Synclinorium de Namur présentant une grande variété d'unités hydrogéologiques et un intérêt majeur pour l'approvisionnement en eau, une discrétisation assez fine a été réalisée en redistribuant les nœuds des axes délimitant les sous domaines et les unités hydrogéologiques à raison de 1 nœud tous les 500 m (en moyenne). La Meuse a été représentée de façon explicite (contrairement aux autres rivières). Les nœuds y sont répartis avec une densité moyenne de 1 nœud tous les 200 m. Cette opération de discrétisation a permis d'obtenir un maillage 2D qui a été converti en maillage 3D à une couche d'éléments par extrusion. Le sommet de ce maillage correspond au MNT interpolé entre chaque nœud, tandis que la base correspond au MNT diminué de 50 m. Le modèle ainsi obtenu présente les caractéristiques suivantes (Tableau 27)

Nombre d'éléments:	17567
Nombre de nœuds:	21022
Nombre de sous domaines:	26
Conditions de Fourier: - rivières - faces latérales:	Meuse: 481 nœuds Autres rivières: 2223 faces 226 faces
Conditions de Cauchy:	17567 faces
Nombre de captages pris en compte:	53
Superficie:	1622 km ²
Volumes prélevés:	28,4 mm/an ($4,61 \cdot 10^7$ m ³ /an)

Tableau 27. Caractéristiques principales du sous modèle synclinorium de Namur

2.4.3.6.4 Simulation

Les paramètres suivants (Tableau 28) ont été adoptés pour les simulations d'écoulement en régime permanent.

Matériau	Conductivité hydraulique (m/s)	Recharge (m/s)
Bruxellien	1×10^{-5}	6.35×10^{-9}
Carbonifère	1×10^{-4}	6.35×10^{-9}
Crétacé	1×10^{-5}	7.1×10^{-9}
Dév inf-moy	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}
Fa1-Fr2-Frd	1×10^{-6}	6.3×10^{-10}
Fa2-Fa1c	1×10^{-5}	3.5×10^{-9}
Fr	1×10^{-6}	4.8×10^{-9}
Gedinnien	1×10^{-6}	1.4×10^{-9}
Givetien	5×10^{-5}	4.8×10^{-9}
Houiller	1×10^{-6}	2.4×10^{-9}
Plaine alluviale	1×10^{-3}	5.5×10^{-9}
Socle	1×10^{-6}	1.6×10^{-9}

Tableau 28. Valeur des paramètres d'entrée du sous modèle synclinorium de Namur

Les échanges avec l'extérieur à travers certaines frontières latérales sont régulées par une condition de type Fourier telle que les flux traversant les frontières soient proportionnels à la différence de niveau qui existe entre la hauteur piézométrique dans le sous domaine et un niveau de référence (placé arbitrairement à 10 m sous la surface topographique). Le facteur de proportionnalité est pris égal à la conductivité hydraulique dans le sous domaine considéré.

2.4.3.6.5 Premiers résultats

Faute de données, les simulations n'ont pu être réalisées qu'en régime permanent et le modèle n'a malheureusement pas pu être calibré. La seule contrainte que devaient respecter les résultats du modèle était que les niveaux piézométriques calculés soient inférieurs aux niveaux topographiques. Après vérification, il apparaît que cette contrainte est respectée sur la

majeure partie du sous modèle.

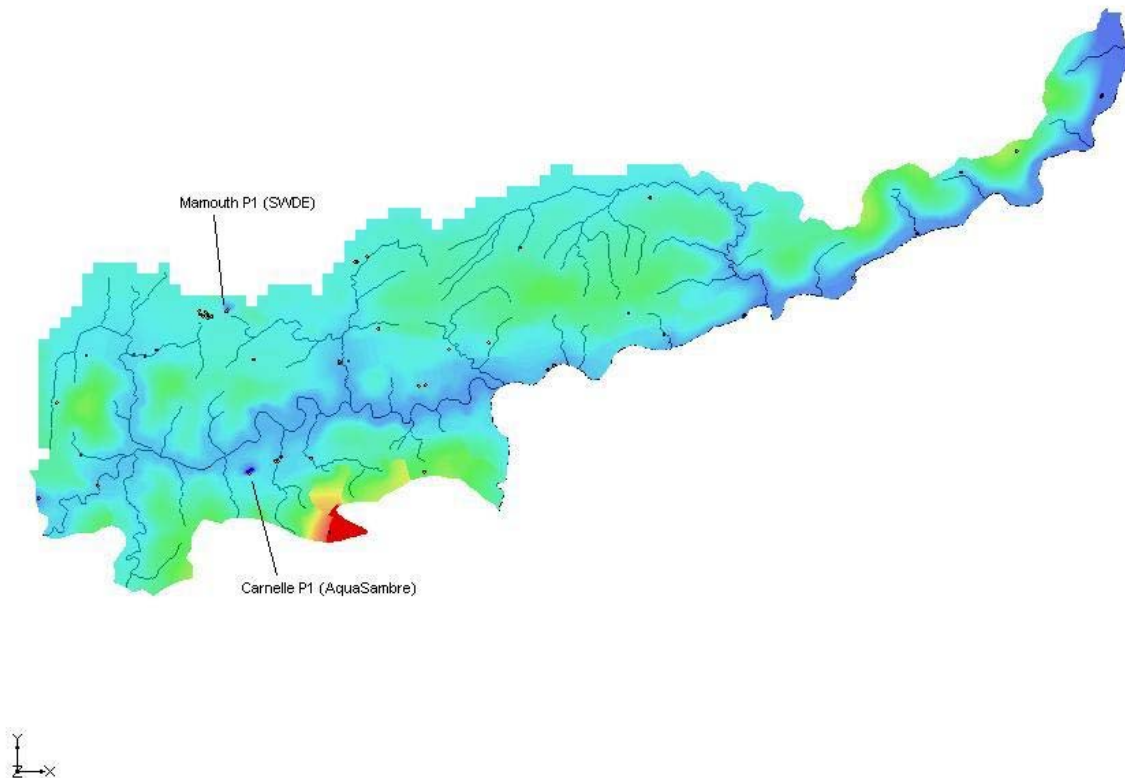


Figure 22. Carte piézométrique simulée pour le sous modèle "Synclinorium de Namur" en régime permanent

Par ailleurs, l'examen de la carte piézométrique montre que les aquifères sont principalement drainés par la Sambre et ses affluents (notamment la Samme et l'Orneau) dans la partie Ouest du sous modèle et par la Meuse et ses affluents (et notamment la Mehaigne) dans la partie Est. Le modèle montre également un léger rabattement des aquifères le long de la frontière Nord du sous modèle. Celui-ci s'explique par les flux d'eau qui peuvent être échangés entre le sous-modèle et l'extérieur à travers ces frontières. Cependant, étant donné le peu d'informations dont nous disposons, ces flux calculés par le modèle ne peuvent être comparés avec ceux existant en réalité.

Enfin, la surface piézométrique calculée par le modèle présente deux dépressions d'extension restreinte traduisant l'effet des prélèvements très importants réalisés aux prises d'eau Mamouth P1 (SWDE) et Carnelle P1 (AquaSambre). Cependant, le modèle n'étant pas calibré, la situation simulée peut être assez éloignée de la situation existante.

3 Thème B Mise au point d'indicateurs quantité et qualité relatifs aux eaux souterraines

3.1 Introduction

Parmi les nombreux travaux dévolus à l'équipe HG-GeomaC figure la mise au point d'indicateurs relatifs à la quantité et la qualité des eaux souterraines. Une réflexion a été menée quand à la manière d'établir ces indicateurs, une synthèse bibliographique sur l'estimation de tendances a été réalisée et un inventaire des données nécessaires a été entamé. Il faut remarquer que deux projets financés par la Région Wallonne (finalisés au printemps 2004) ont permis de proposer des approches pragmatiques. Deux autres projets financés par la Commission Européenne (AQUATERRA 2004-2006 et BRIDGE 2004-2006), permettront prochainement de confronter ces approches, outils et résultats intéressants avec les collègues européens. Une de ces conventions avait pour objectif la mise au point et le test d'une méthode de cartographie détaillée de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle du pixel de 30 X 30 m. A terme, cette approche fournira un support décisionnel permettant de différencier, d'un point de vue spatial, des zones en fonction du risque plus ou moins important qu'entraîne la présence ou l'implantation d'activités anthropiques pour la qualité des eaux souterraines. La deuxième convention a porté sur le test et l'adaptation du SEQ Eaux Souterraines en vue de fournir un état qualitatif des ressources en eaux souterraines. A cette occasion des indicateurs de qualité relatifs aux eaux souterraines ont été proposés, discutés et décidés. D'autre part, les différentes techniques d'agrégation de données ponctuelles ainsi que la méthodologie d'établissement d'un réseau de surveillance pour les eaux souterraines ont été discutées et proposées. Un 'workpackage' du projet européen AQUATERRA (2004-2006) porte sur l'étude d'estimation des tendances.

De manière générale, il s'agit avant toute chose de clarifier ce que l'on entend par la notion d'indicateur. En premier lieu, on peut envisager des indicateurs portant d'une part sur l'état de la nappe (quantité : est-elle surexploitée ? qualité : les normes de potabilité sont-elles dépassées pour tel ou tel produit ?) ou sur les risques qu'elle encourt (quantité : risque-t-on de surexploiter ? qualité : quel est le risque de dégradation et de pollution de l'eau souterraine). Le premier type d'indicateur fournit un renseignement sur l'utilisation potentielle de l'eau souterraine avec, au mieux, la possibilité d'établir un système « d'alarme » correspondant à des seuils à partir desquels une série de mesures visant à remédier au problème sont prises, le second peut être utilisé à des fins de gestion de la ressource en vue d'un développement durable et d'une utilisation et protection optimales. Des techniques de type SEQ-Eau

Souterraine entrent clairement dans la première catégorie, tandis que l'établissement de cartes de vulnérabilité ressortent de la deuxième car elles fournissent une distribution spatiale du risque potentiel, utile par exemple à des fins d'aménagement du territoire.

Une deuxième distinction est à faire entre des indicateurs « statiques » (caractère spatial) et des tendances (caractère temporel). Dans le premier cas, il s'agit d'un « instantané », basé sur la collecte d'informations recueillies habituellement sur une période assez restreinte de temps et analysées en vue d'établir l'état quantitatif et qualitatif de la ressource en eau souterraine. Ici encore, c'est le cas du SEQ-Eau Souterraine. Dans le second cas, il s'agit d'établir de quelle manière l'état quantitatif (surexploitation...) ou qualitatif (concentrations en contaminants dans la nappe ...) évolue au cours du temps. Cela demande une analyse reposant sur des chroniques de mesures (niveaux piézométriques, évolutions de concentrations...) dans la nappe.

En vue d'éviter la redondance avec les projet en cours mentionnés ci-dessus, on se concentrera ici sur l'estimation des tendances comme indicateur de l'évolution de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines. Une recherche bibliographique a donc été menée sur ce sujet. Une synthèse de cette bibliographie est présentée au point suivant.

3.2 Synthèse bibliographique relative aux techniques d'analyse de tendances

La détection et l'analyse de tendances trouvent des applications pratiques dans différentes applications en hydrologie et hydrogéologie, en relation avec l'étude des changements climatiques (ex : *Burn and Hag Elnur, 2002, Ventura et al., 2002*), l'aménagement du territoire (*Ulén et al., 2001, Lischeid, 2001*) voire encore le développement d'outils d'alerte.

Les méthodes « classiques » de détection de tendance peuvent être groupées en deux principales catégories. La première regroupe des méthodes paramétriques reposant sur des outils de régression et de moyennisation : régression globale linéaire et non-linéaire, régressions locales telles que le « Loess smoother » ou le « test Anova » (*Grath et al. 2001*). Ces techniques conviennent particulièrement à l'estimation de tendances non monotones. La seconde catégorie regroupe des méthodes non paramétriques, basées sur une évaluation « pas-à-pas » de la tendance croissante ou décroissante entre des observations successives, par exemple les tests « Mann Kendall » ou « Spearman's rho » (*Hirsch et al. 1982, Yue and al. 2002*). Les techniques non-paramétriques sont plus adaptées à l'estimation de tendances monotones.

Quelles qu'elles soient, ces techniques sont habituellement applicables uniquement sur des longues séries de mesures. De plus, elle ne permettent pas de réaliser des extrapolations fiables, ce qui limite considérablement les capacités de prédictions, et elles ne tiennent en rien compte de la complexité des systèmes hydrologiques (hétérogénéité, évolution au cours du temps...). En vue du développement d'outils performants d'estimation et d'analyse de tendance, deux aspects importants à prendre en compte se rapportent à la représentativité du réseau d'observations et de mesures et l'adéquation de la fréquence d'échantillonnage (Zhou 1996, ...).

Idéalement, il serait utile et intéressant d'envisager le développement d'approches reposant sur des outils de modélisation des écoulements et du transport des contaminants en vue de pouvoir, par la liaison entre la cause (quantité : débits prélevés, changements climatiques ; qualité : épandages de fertilisants et pesticides) et les effets (quantité : variations des niveaux d'eau ; qualité : évolutions des concentrations dans la nappe et à ses exutoires), permettraient une analyse prévisionnelle et le test de scénarii.

References

- Burn, D. H. and M. A. Hag Elnur (2002) Detection of hydrologic trends and variability, *J. Hydrol.*, 255, 107-122.
- Grath, J. *et al.* (2001) The EU water framework directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results, Final Report, Austrian ministry of agriculture and forestry, environment and water management, European Commission, Vienna.
- Hirsch, R. M., J. R. Slack, and R. A. Smith (1982) Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resour. Res.*, 18(1), 107-121.
- Lischeid, G. (2001) Investigating short-term dynamics and long-term trends of SO₄ in the runoff of a forested catchment using artificial neural networks, *J. Hydrol.*, 243, 31-42.
- Ulén B., G. Johansson, and K. Kyllmar (2001) Model predictions and long-term trends in phosphorus transport from arable lands in Sweden, *Agr. Water Manag.*, 49, 197-210.
- Ventura, F., P. R. Rossi and E. Ardizzoni (2002) Temperature and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999. *Atmosph. Research.*, 61, 203-214.
- Yue, S., P. Pilon, and G. Cavadias (2002) Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, *J. Hydrol.*, 259, 254-271.
- Zhou, Y. (1996), Sampling frequency for monitoring the actual state of groundwater systems, *J. Hydrol.*, 180, 301-318.

3.3 Données disponibles pour des tests

En vue de tests, des jeux de données exploitables sont disponibles d'un point de vue quantité : des chroniques d'évolution de niveaux piézométriques dans des ouvrages pour plusieurs aquifères de la Région wallonne. D'un point de vue qualité, des données, principalement des évolutions de concentration en NO₃, sont disponibles pour des puits, piézomètres, sources et galeries pour quatre aquifères de la Région wallonne : l'aquifère des craies de Hesbaye, l'aquifère des craies du Pays de Herve, la nappe alluviale de la Meuse et le bassin du Hoyoux-Néblon.

Malheureusement, il n'a pas été possible, dans les délais impartis au projet PIRENE de réaliser de tests.

4 Thème C : Mise au point d'indicateurs hydrogéologiques relatifs aux ZHIB

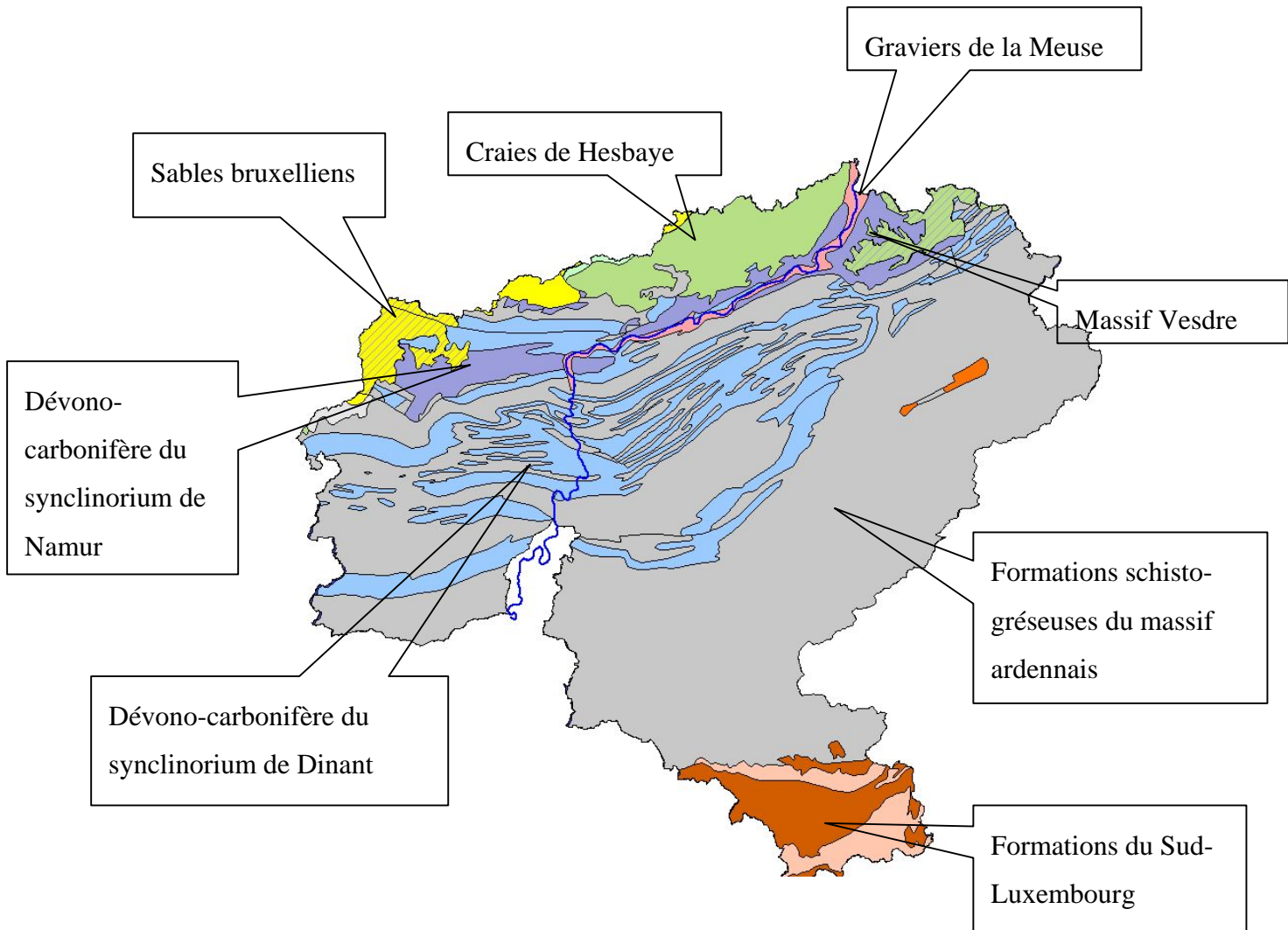
Parmi les travaux dévolus à l'équipe HGE_GeomaC figure la mise au point d'indicateurs hydrogéologiques relatifs aux Zones Humides à Intérêt Biologique (ZHIB). Dans le cadre d'un travail de fin d'étude, il a été tenté d'établir une classification, basée sur des critères hydrogéologiques, de quarante et une ZHIB préalablement étudiées par l'équipe aCREA-ULg (Dr Melin).

Cette classification repose sur des critères topologiques et géologiques et a pour but de refléter l'importance des apports en eaux souterraines dans l'alimentation en eau de ces zones humides.

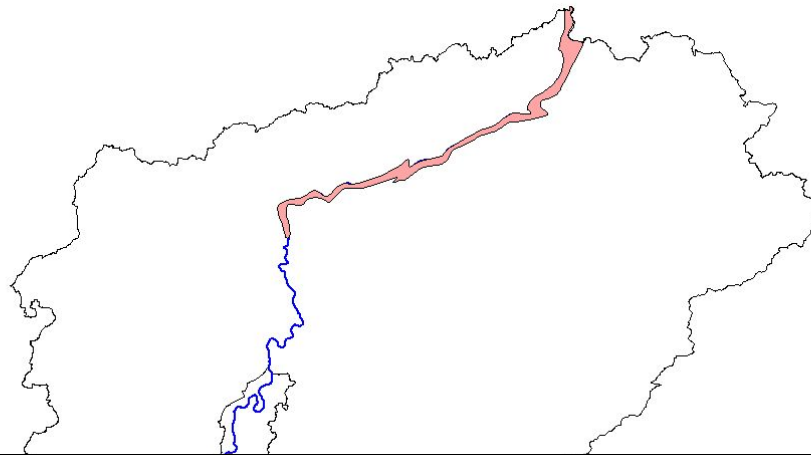
Pour chaque cas précis, faute de données pertinentes concernant les conditions hydrogéologiques locales, cette étude n'a pas permis de mettre en évidence et de préciser l'impact des eaux souterraines sur le fonctionnement de ces zones humides.

Pour plus d'information concernant cette étude, le lecteur est invité à se référer au travail de Fin d'Etude de B. Demany "Proposition d'une classification pour les zones humides à intérêt biologique".

Annexe 1 Les principales formations du bassin de la Meuse et leur "degré" de caractérisation

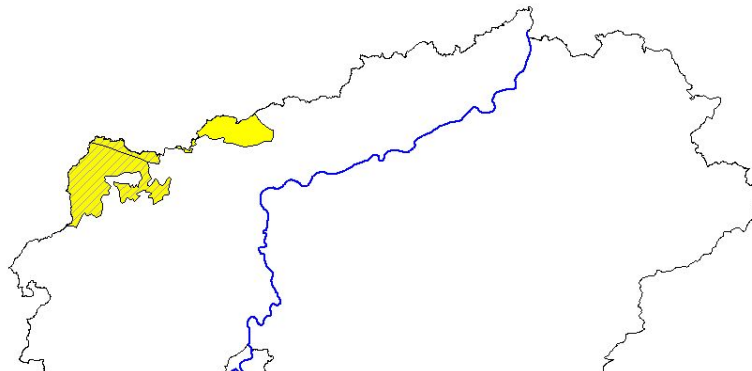


Les graviers de la Meuse



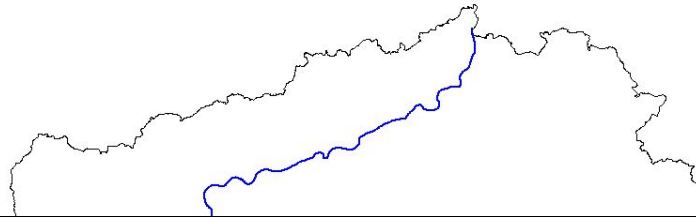
ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Suffisant
Paramètres hydrogéologiques	Suffisant
Données piézométriques	Suffisant/insuffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Suffisant
Paramètres hydrodispersifs	Insuffisant
Production moyenne (% production en RW)	21 10 ⁶ m ³ (6%)

Les sables bruxelliens

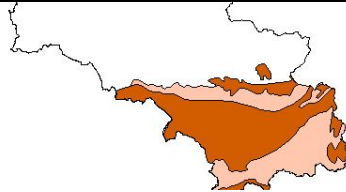


ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Suffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Insuffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Insuffisant
Paramètres hydrodispersifs	Insuffisant
Production moyenne (% production en RW) (Non dissociée des prélèvements effectués dans la partie du synclinorium de Namur située dans le bassin de l'Escaut)	23 10 ⁶ m ³ (6.6%)

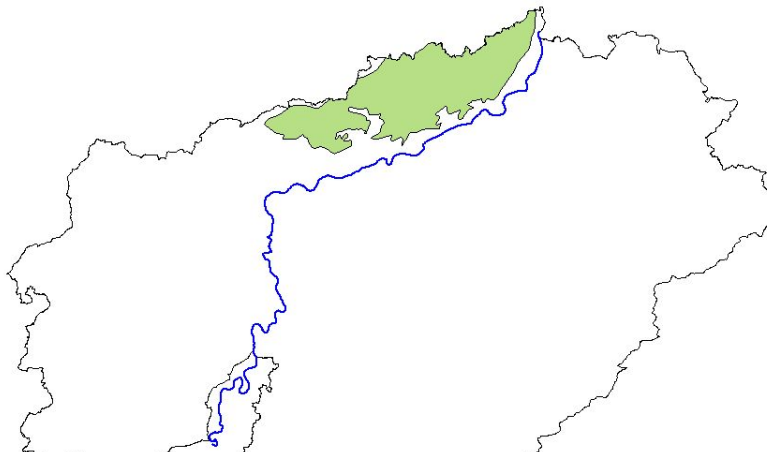
Les formations du sud du Luxembourg



ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Suffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Insuffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Insuffisant
Paramètres hydrodispersifs	Insuffisant
Production moyenne (% production en RW)	9.6 10 ⁶ m ³ (2.8%)

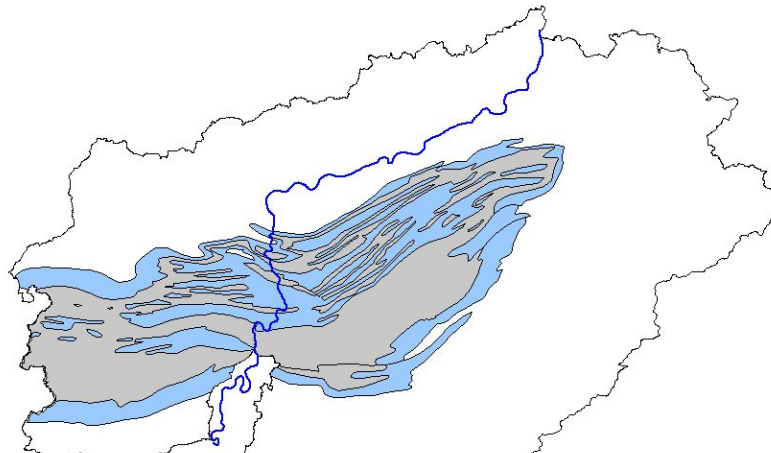


Les craies de Hesbaye



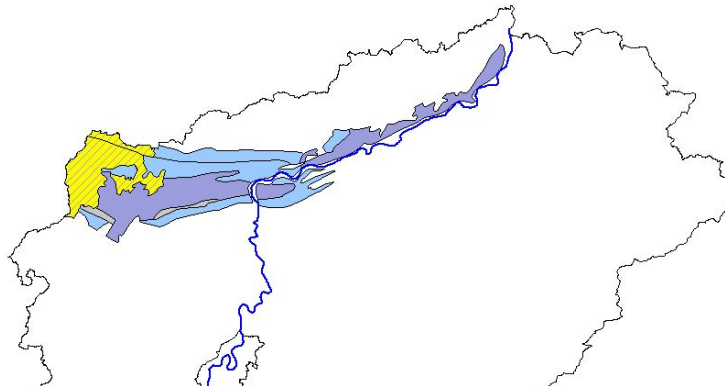
ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Suffisant
Paramètres hydrogéologiques	Suffisant
Données piézométriques	Suffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Suffisant
Paramètres hydrodispersifs	Moyen
Production moyenne (% production en RW)	21.5 10 ⁶ m ³ (6.2%)

Dévonno-carbonifère du Synclinorium de Dinant



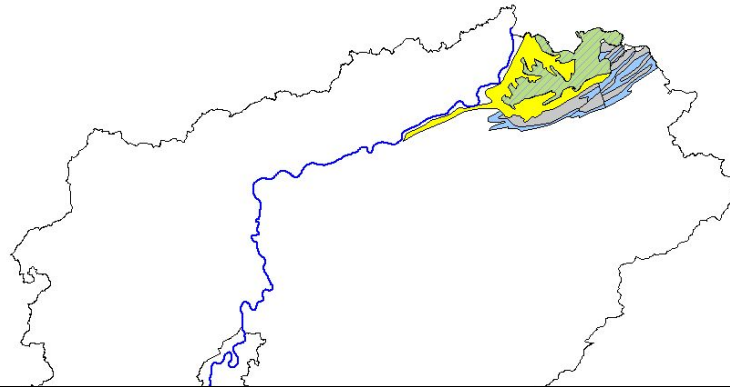
ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Insuffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Absent
Sollicitations (infiltration, pompage)	Suffisant
Paramètres hydrodispersifs	Absent
Production moyenne (% production en RW)	64.5 10 ⁶ m ³ (18.5%)

Dévonno-carbonifère du Synclinorium de Namur



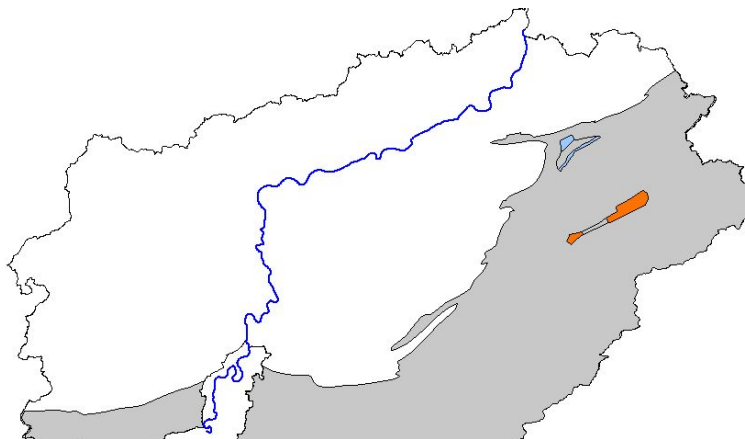
ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Insuffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Absent
Sollicitations (infiltration, pompage)	Suffisant
Paramètres hydrodispersifs	Absent
Production moyenne (% production en RW) (Non dissociée des prélèvements effectués dans la partie du synclinorium de Namur située dans le bassin de l'Escaut)	113.4 10 ⁶ m ³ (32.5%)

Les formations du Massif de la Vesdre

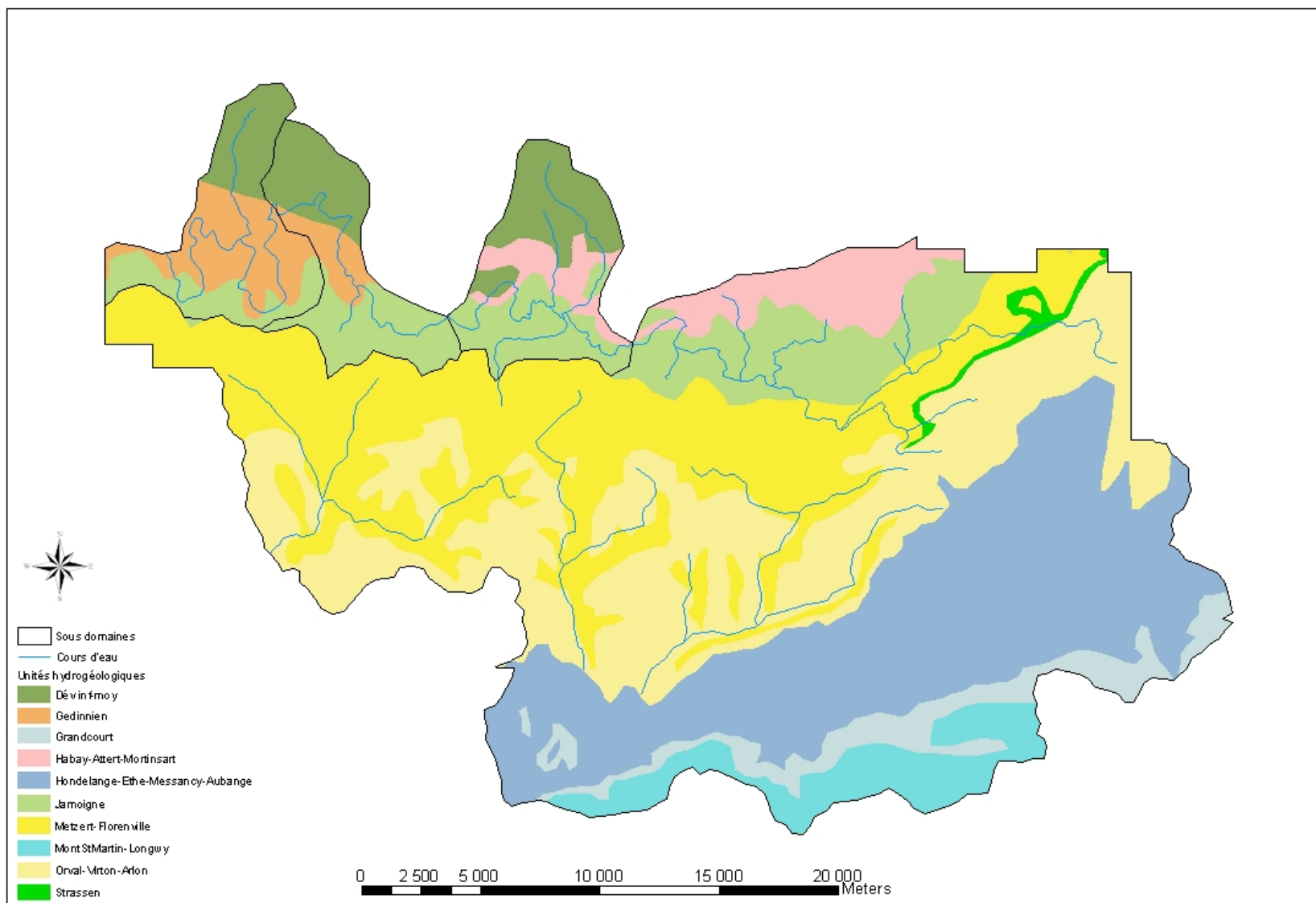


ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Insuffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Insuffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Insuffisant
Paramètres hydrodispersifs	Insuffisant
Production moyenne (% production en RW)	3 10 ⁶ m ³ (0.7%)

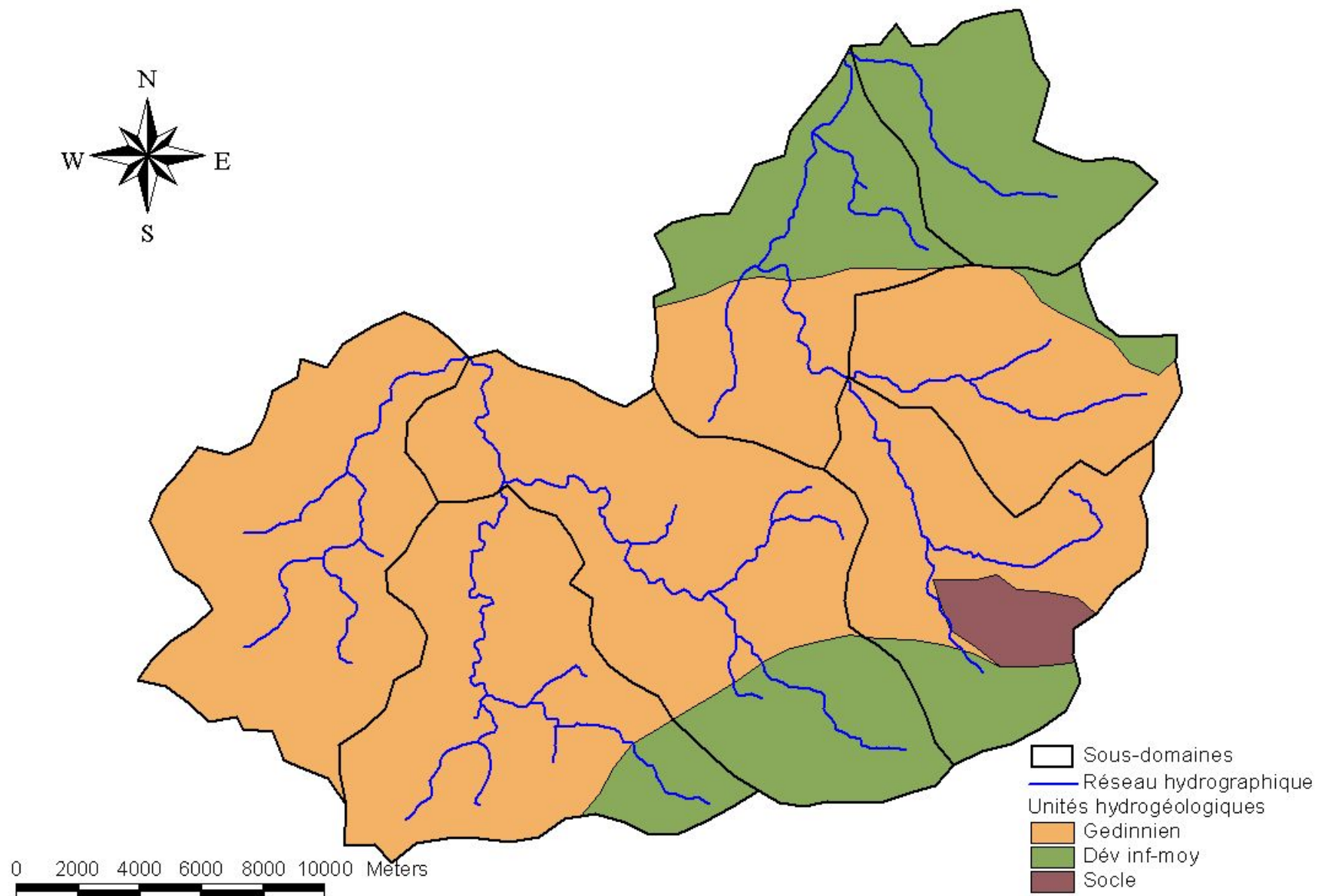
Les formations schisto-gréseuses du massif ardennais



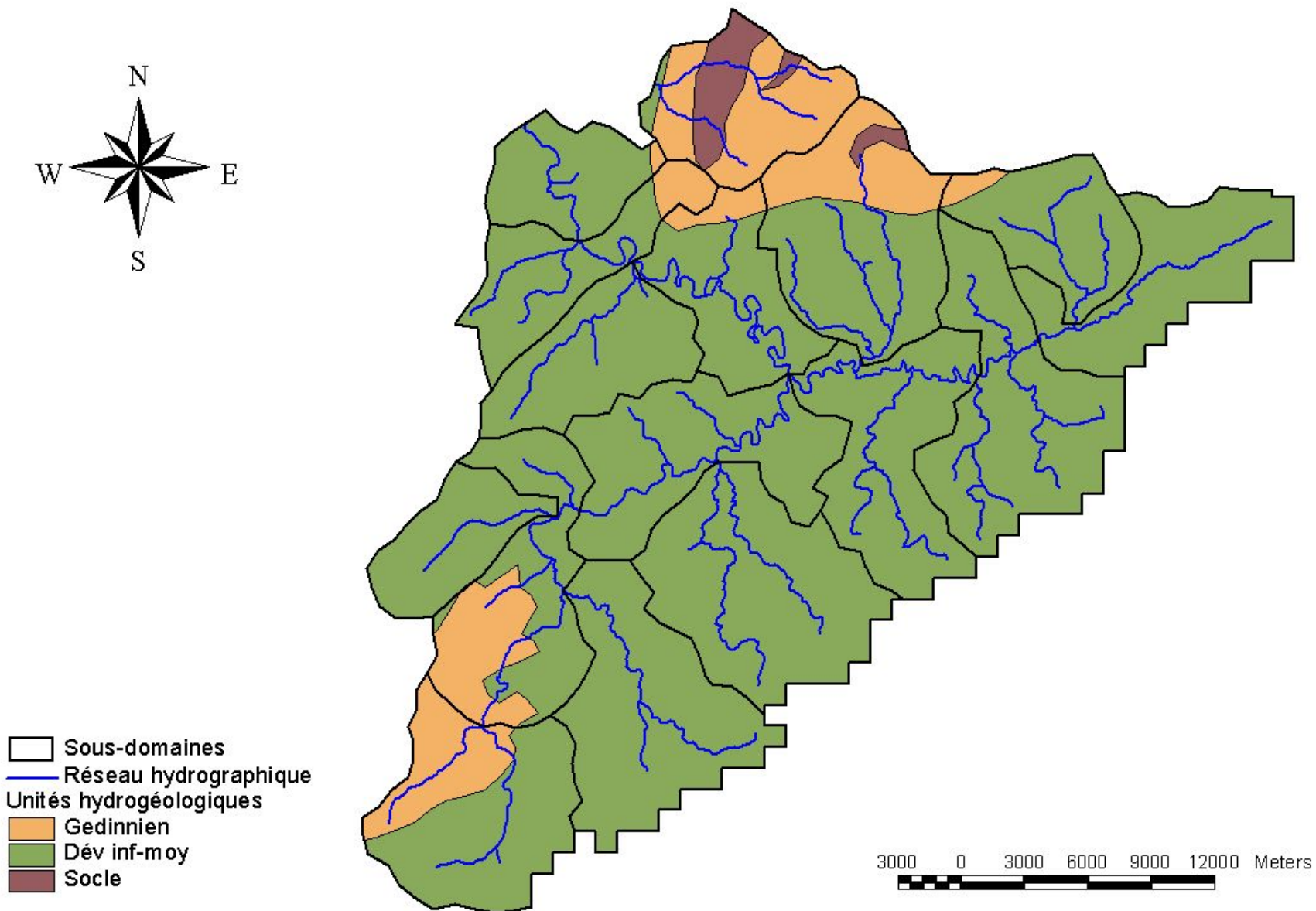
ETAT DES CONNAISSANCES	
Caractérisation géologique et géométrique	Insuffisant
Paramètres hydrogéologiques	Insuffisant
Données piézométriques	Insuffisant
Sollicitations (infiltration, pompage)	Insuffisant
Paramètres hydrodispersifs	Insuffisant
Production moyenne (% production en RW)	14 10 ⁶ m ³ (4%)



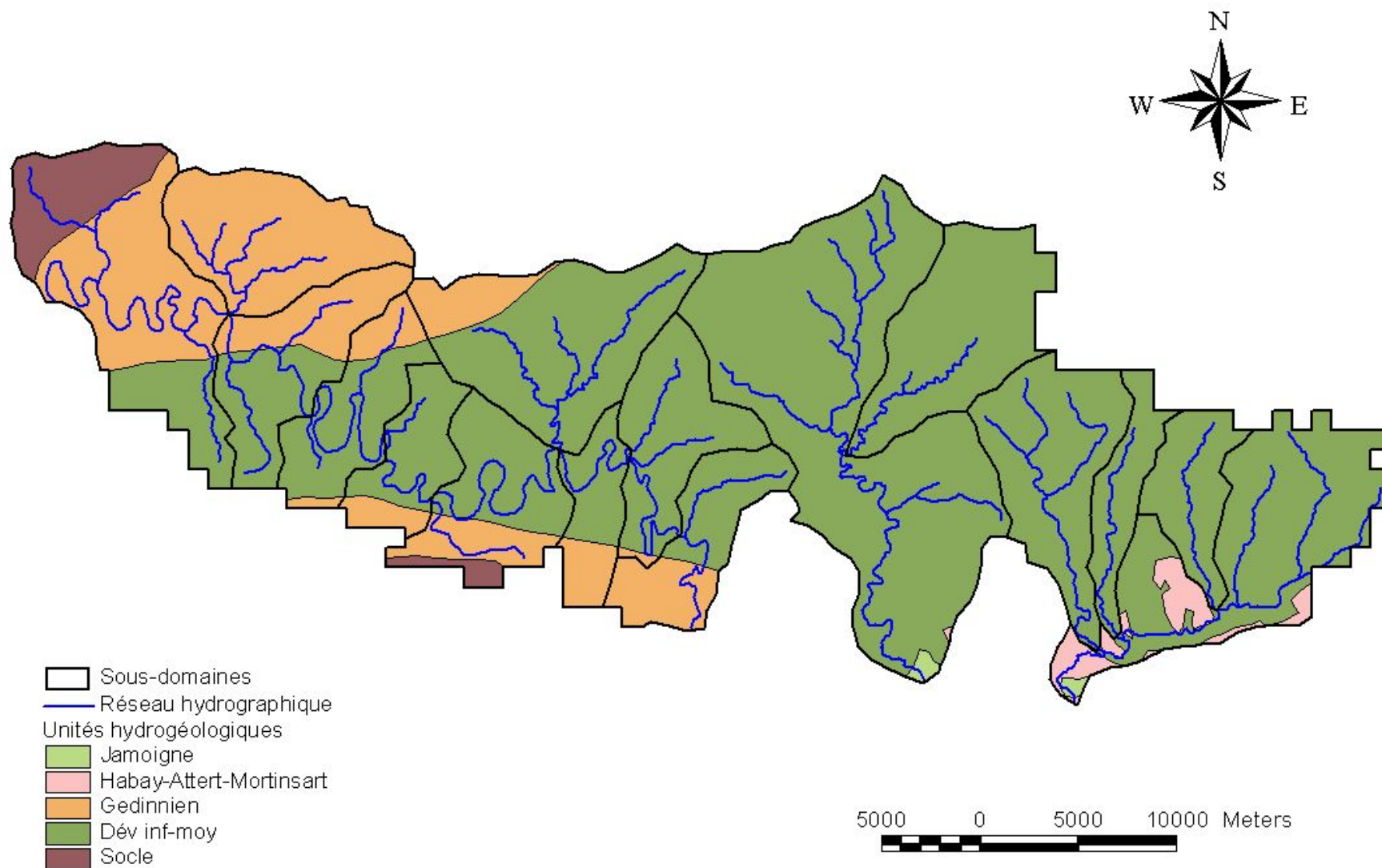
Annexe 2.1. Sous modèle Gaume: sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



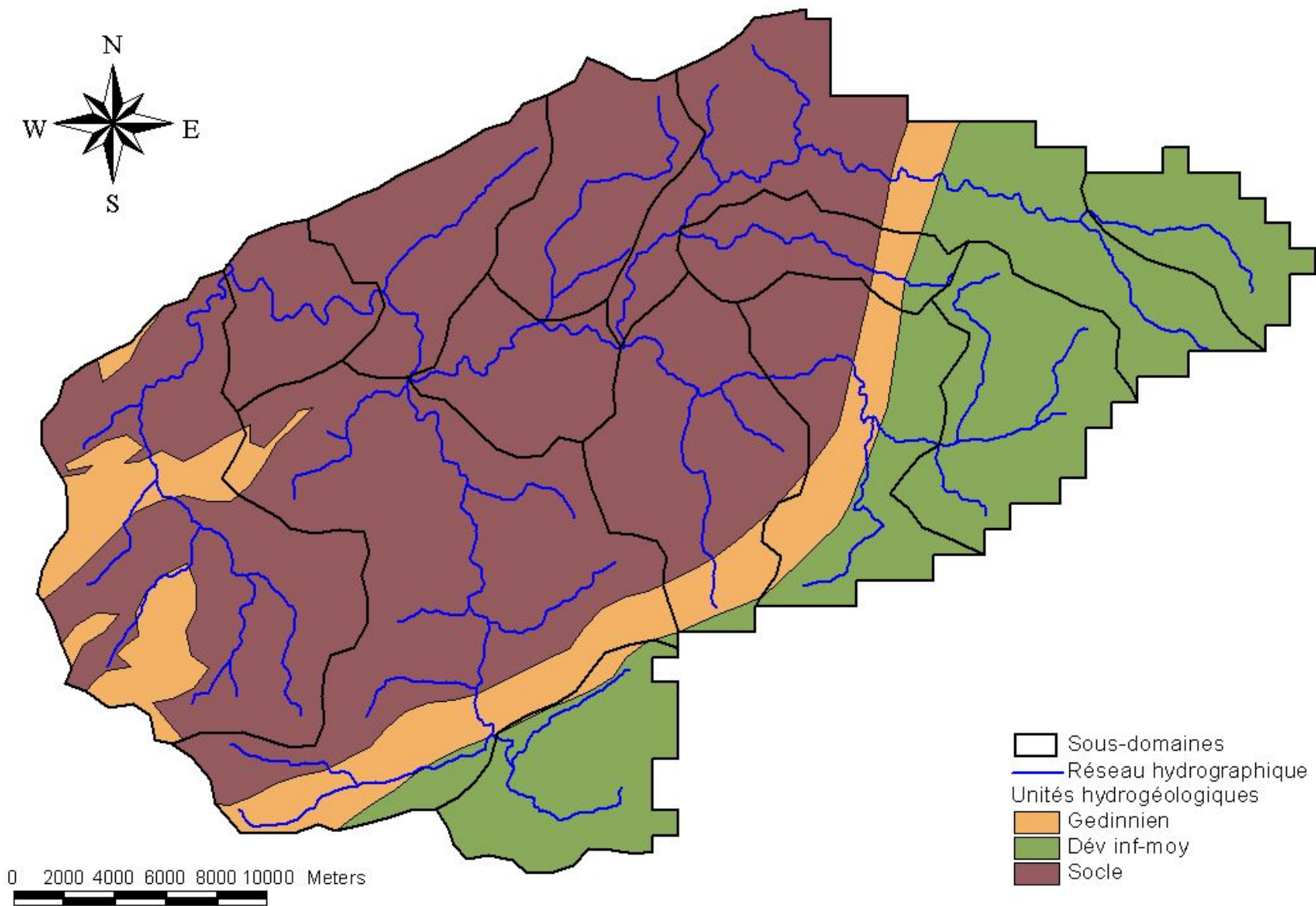
Annexe 3.1. Sous modèle "Ardenne Lesse": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



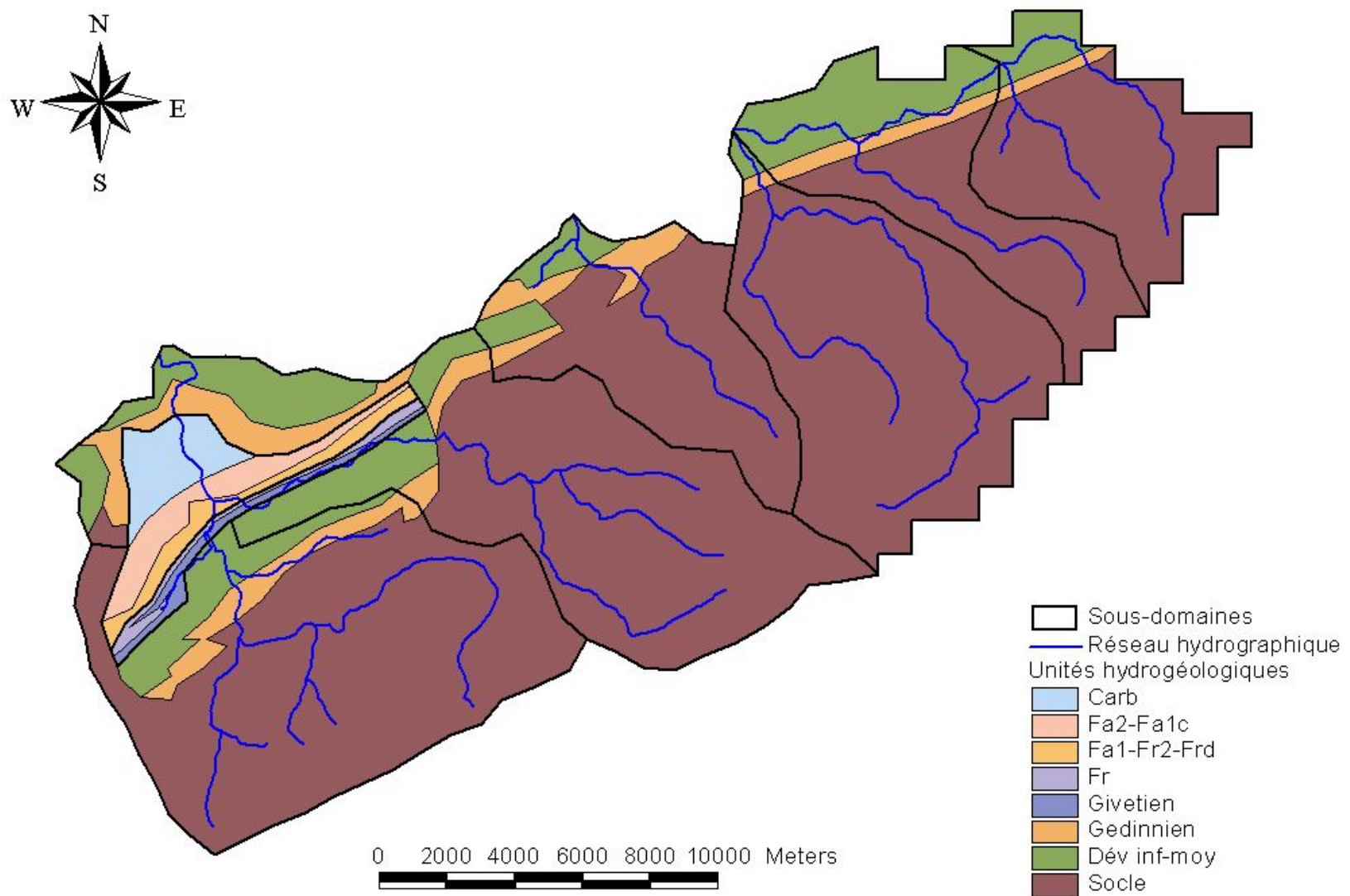
Annexe 3.2. Sous modèle "Ardenne Ourthe": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



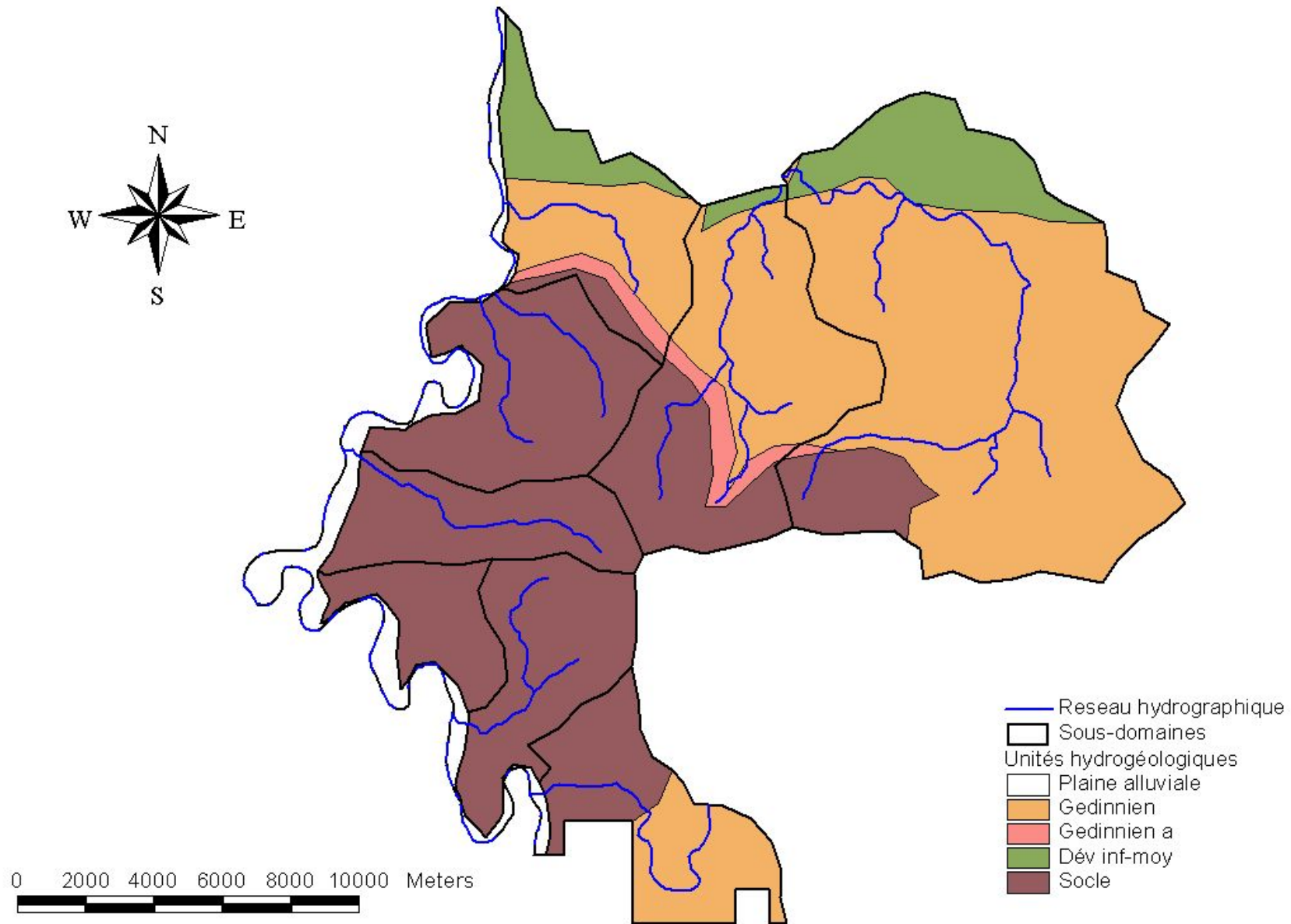
Annexe 3.3. Sous modèle "Ardenne Semois": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



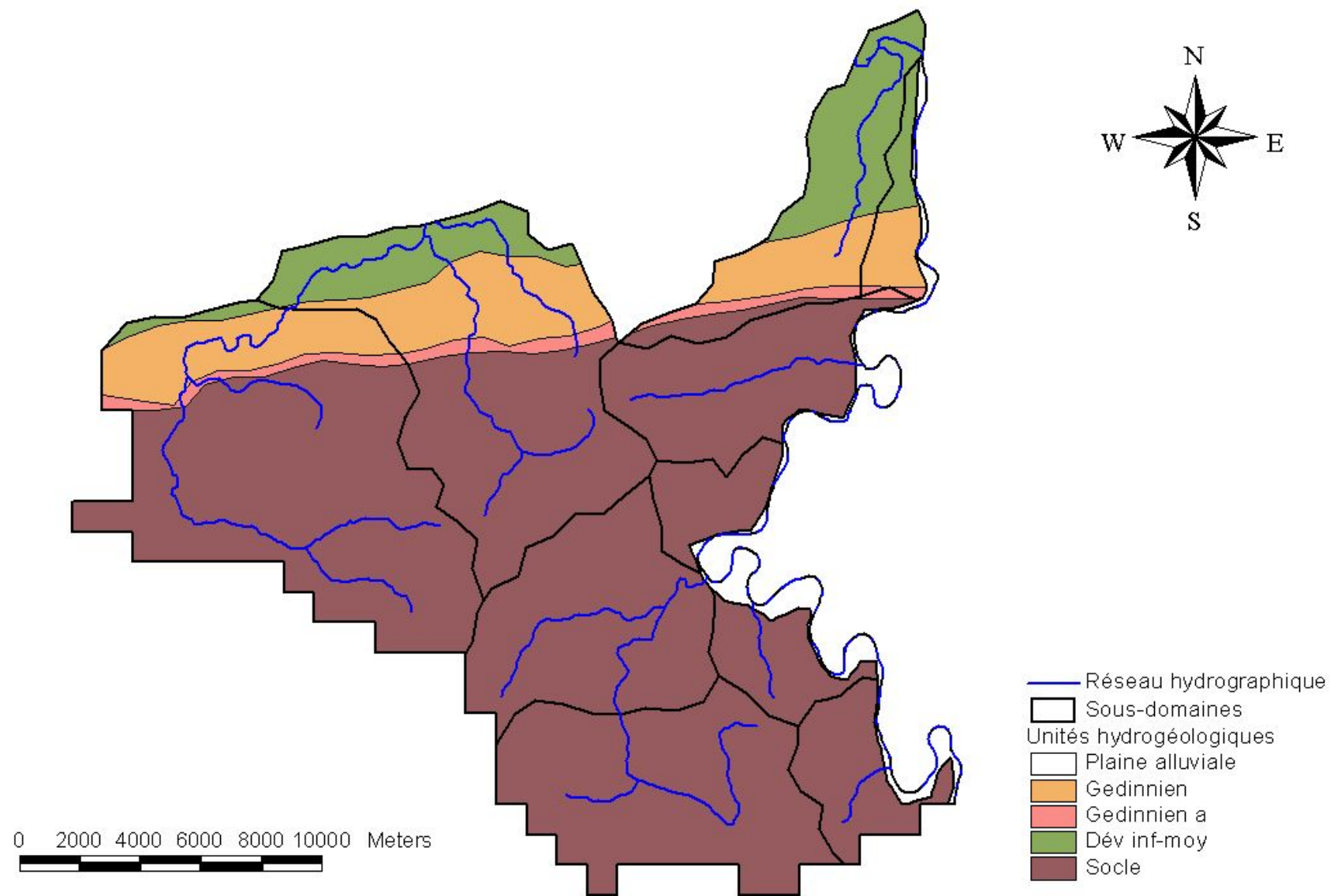
Annexe 3.4. Sous modèle "Ardenne Amblève": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



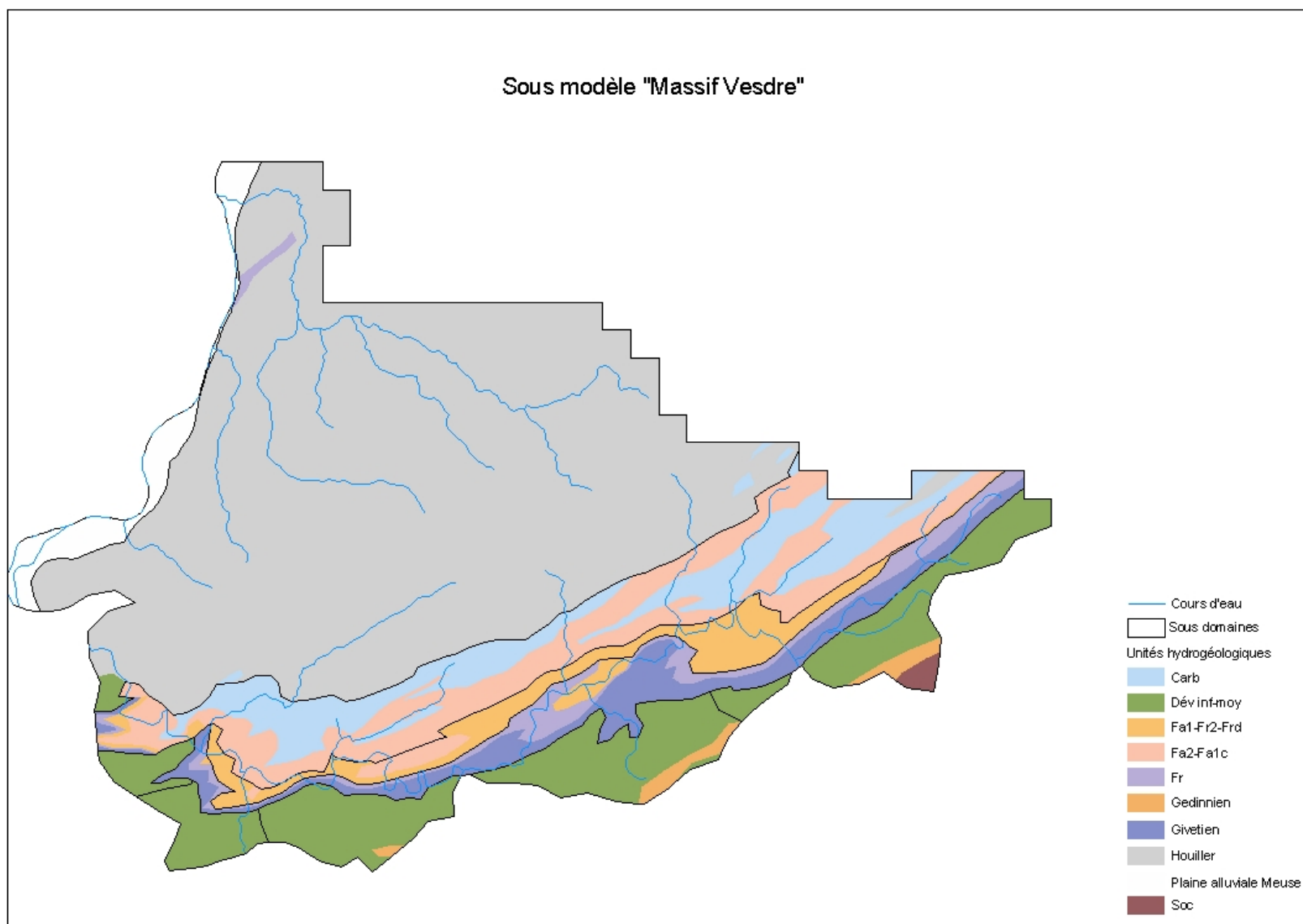
Annexe 3.5. Sous modèle "Ardenne Vesdre": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



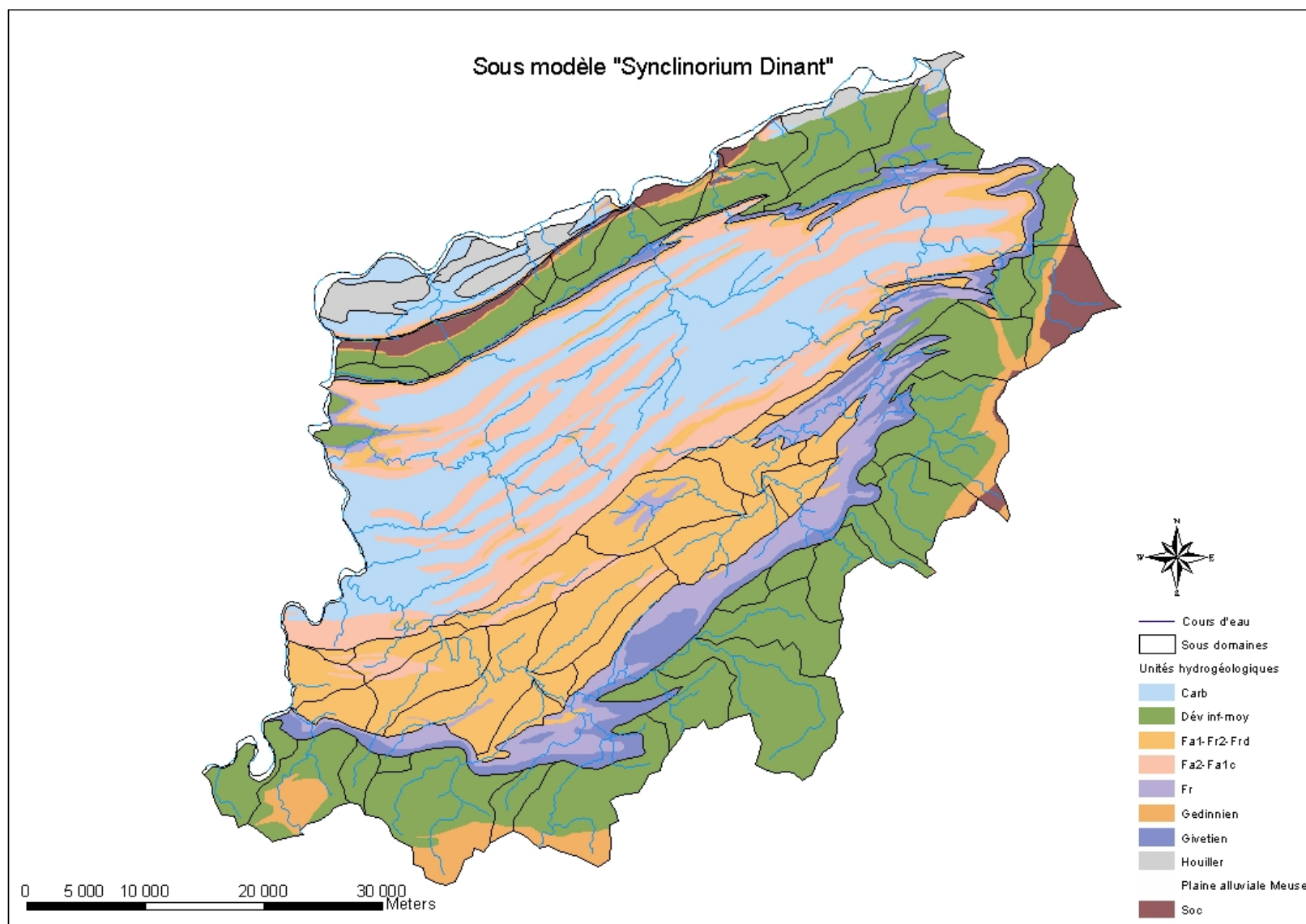
Annexe 3.6. Sous modèle "Ardenne Meuse amont droit": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



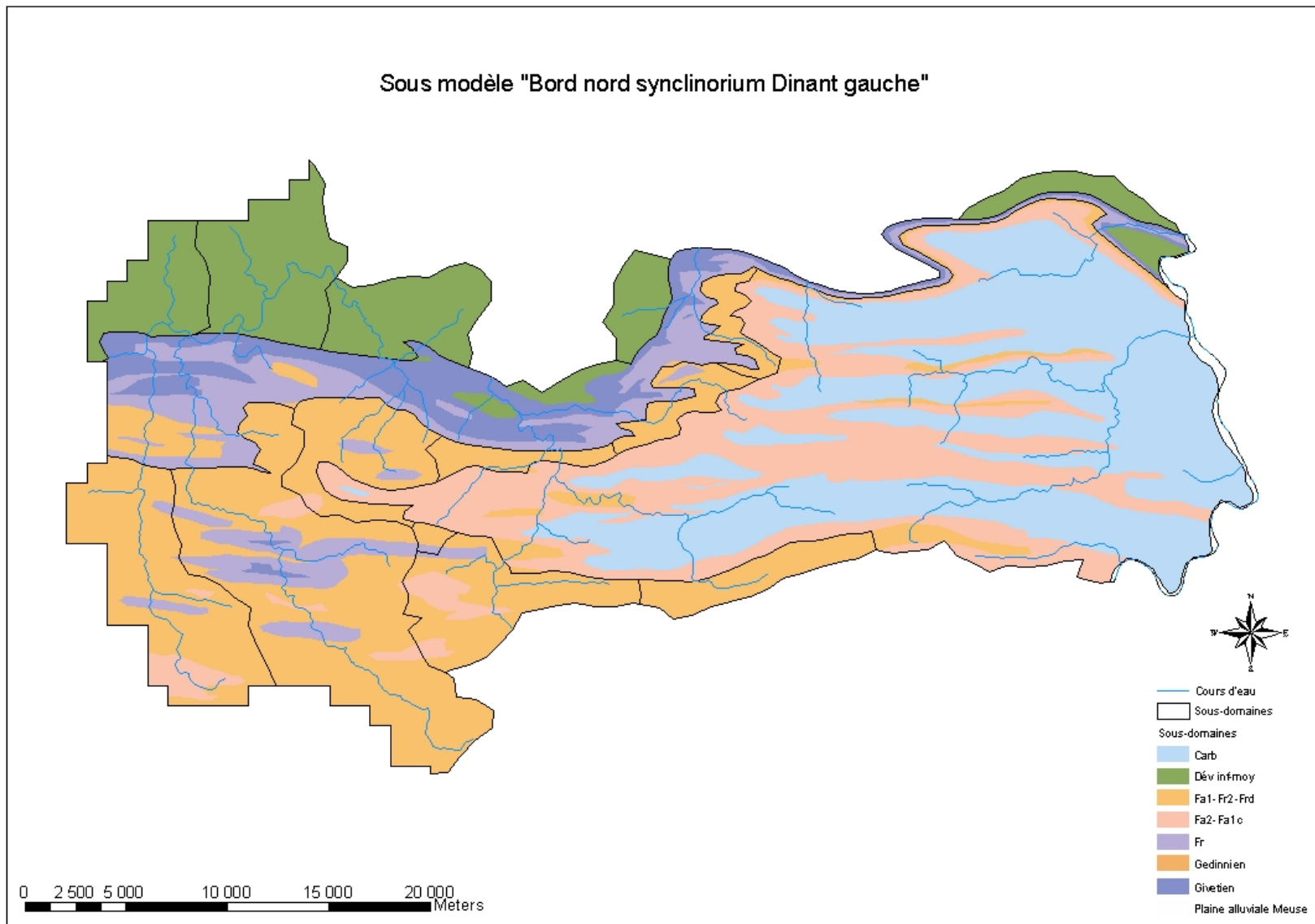
Annexe 3.7. Sous modèle "Ardenne Meuse amont gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



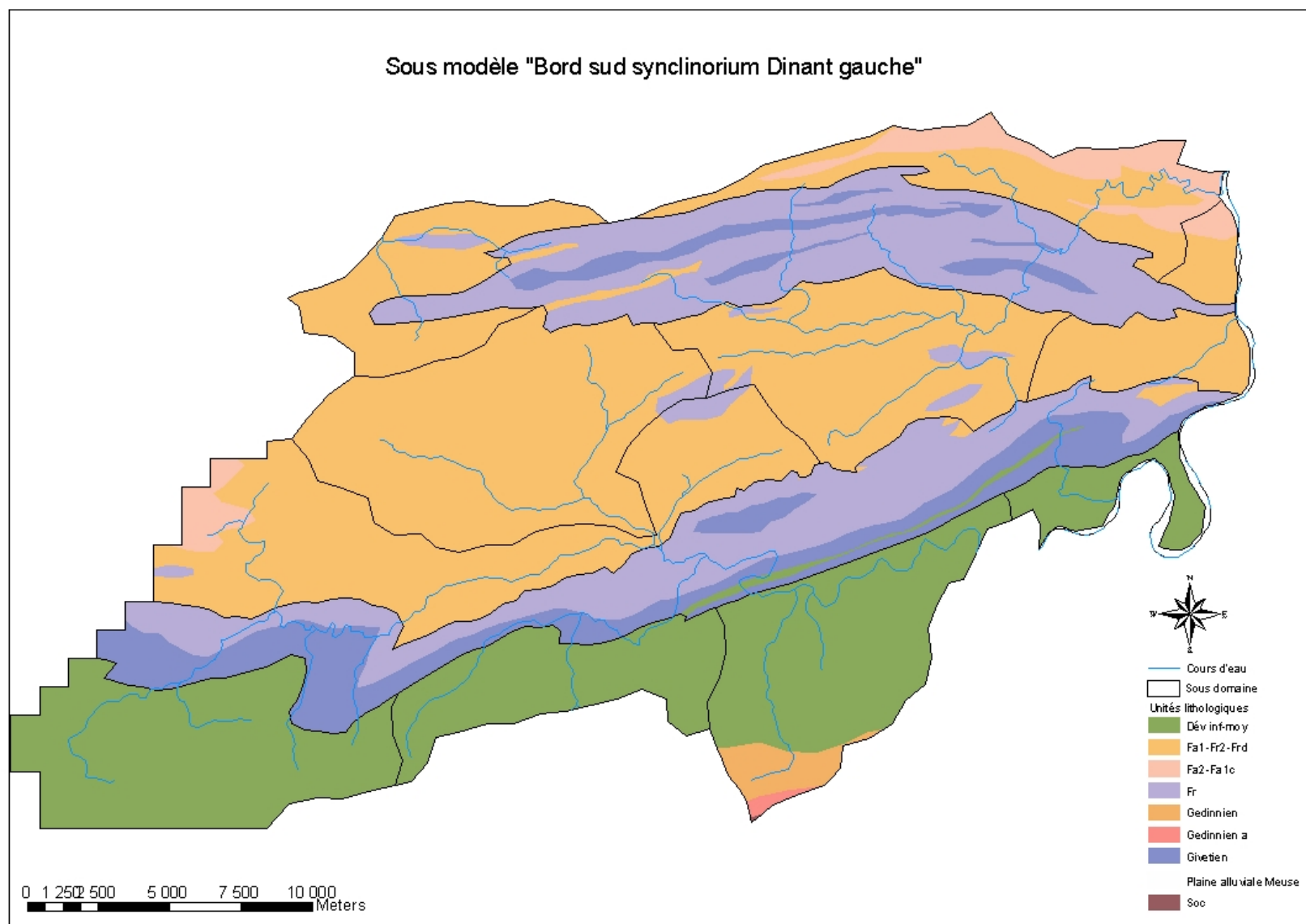
Annexe 4.1. Sous modèle "Massif Vesdre": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



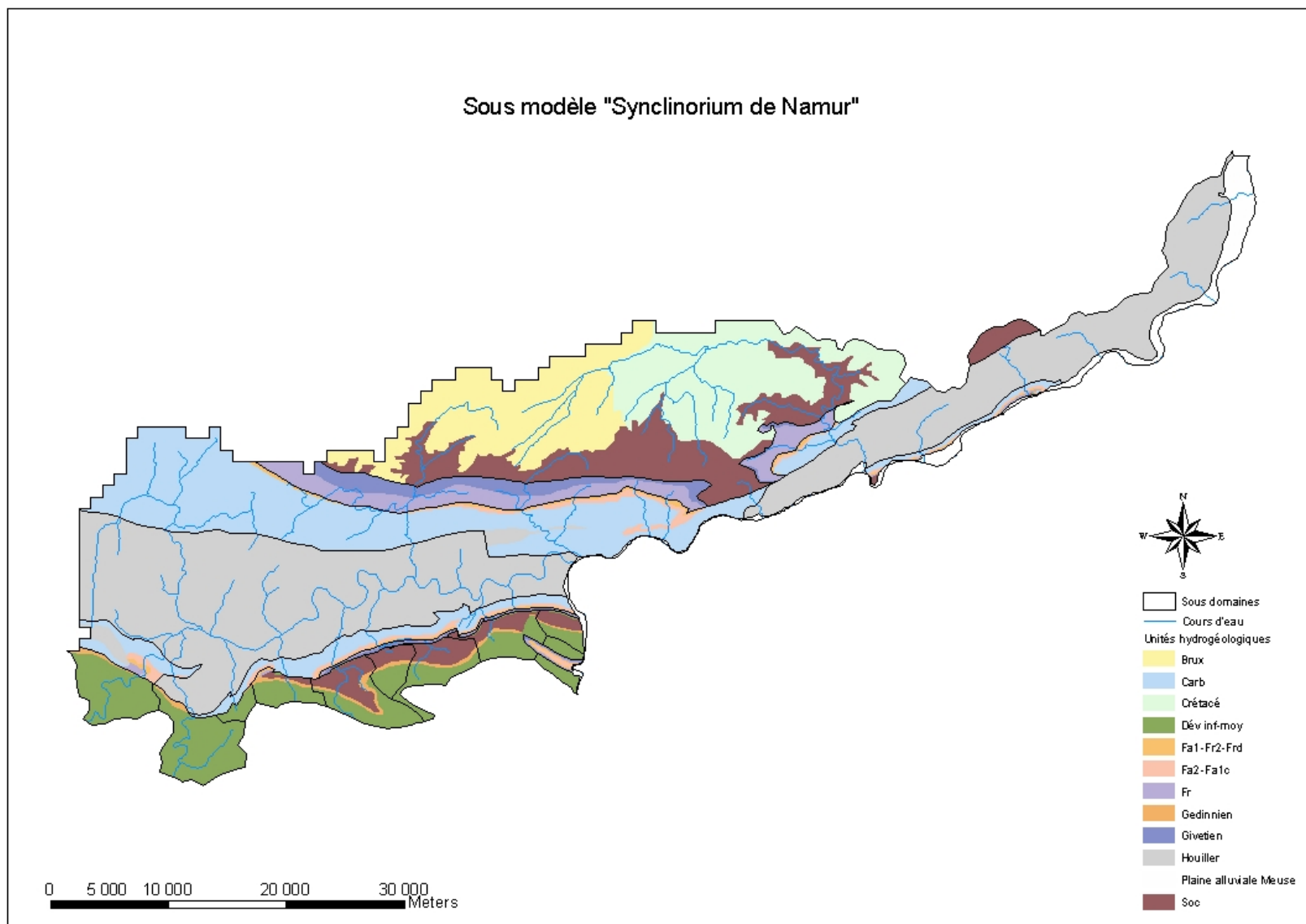
Annexe 5.1. Sous modèle "Synclinorium Dinant droit": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



Annexe 5.2. Sous modèle "Bord nord Synclinorium Dinant gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



Annexe 5.3. Sous modèle "Bord sud Synclinorium Dinant gauche": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau



Annexe 6.1. Sous modèle "Synclinorium Namur": sous domaines, unités hydrogéologiques et cours d'eau