

La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières

Actualisation et spatialisation des données climatiques
et réalisation de la carte bioclimatique dans le cadre
de la révision du Fichier écologique des essences
et du Guide de boisement

Raphaële Van der Perre* | Stephen Bythell* | Patrick Bogaert*
Hugues Claessens[⊗] | François Ridremont[⊗] | Christian Tricot[⊗]
Caroline Vincke* | Quentin Ponette*

* UCL, Earth & Life Institute, Environmental Sciences

[⊗] ULg, Gembloux Agro-Bio Tech, Gestion des Ressources Forestières

[⊗] IRM, Service scientifique « Renseignements météorologiques et climatologiques »

La révision du Fichier écologique des essences intègre un nouveau découpage du territoire wallon en dix zones bioclimatiques. Basées sur des données climatiques actualisées et sur les dernières connaissances en autécologie des essences, elles sont la porte d'entrée du Fichier écologique*, outil indispensable aux gestionnaires forestiers.

Le climat conditionne à la fois la distribution des espèces végétales et leur comportement en termes de croissance et de reproduction¹¹. Les végétaux répondent non seulement aux valeurs annuelles des paramètres climatiques tels que la température moyenne ou les précipitations totales, mais ils sont également largement affectés par la variation temporelle de ces différents paramètres⁴. Ils sont aussi sensibles à des écarts, excès ou déficits, aux conditions moyennes caractéristiques de la zone de croissance, en particulier si ceux-ci surviennent à certains stades de leur développement ou à des moments clés de leur cycle annuel¹². Enfin, les patrons de variation du climat et leurs effets sur les végétaux sont modulés, au sein d'une région donnée, par des facteurs stationnels locaux tels que la topographie et la nature des sols.

Dans le cadre de la révision du *Fichier écologique des essences*²⁴ et du *Guide de boisement*²⁵, la caractérisation du climat régional, ou macroclimat, a été mise à jour en tirant parti de données climatiques de températures et de précipitations collectées dans un grand nombre de stations météorologiques de l'Institut royal météorologique (IRM) sur une période de 20 ans (1986-2005). Dans une première étape, ces données ont permis de spatialiser une série d'indicateurs climatiques pertinents pour les arbres forestiers sur une maille de 500 x 500 mètres. Dans une seconde étape, elles ont permis de découper le territoire wallon en dix zones bioclimatiques, définies sur la base des caractéristiques climatiques et des sensibilités des essences forestières à celles-ci. Ce nouveau découpage territorial constituera désormais la porte d'entrée du Guide de boisement, à la place des actuels territoires écologiques.

Mise à jour et spatialisation des données climatiques

À quelques exceptions près, les données climatiques utilisées proviennent de la base de données *bdclim* de l'IRM : cent quinze stations wallonnes pour la pluviométrie mensuelle ; quatre-vingt-une stations wallonnes, une station bruxelloise et trois stations limitrophes (Luxembourg, Maestricht et Aix-la-Chapelle) pour les températures journalières minimum et maximum ; douze stations wallonnes pour le rayonnement solaire journalier (figure 1). La température moyenne journalière a été calculée à partir des températures minimum et maximum.

Les données utilisées couvrent une période de 20 ans, de janvier 1986 à décembre 2005 inclus. Cette période, postérieure au réchauffement relativement abrupt qu'a connu la Belgique vers le milieu des années '80, permet de prendre en compte les modifications du climat. Les données acquises après 2005 n'ont pas été utilisées car certaines n'étaient pas encore entièrement validées.

La spatialisation des données a été réalisée sur une maille de 500 mètres de côté recouvrant la Wallonie. En chacun des 67 000 points, les variables climatiques ont été interpolées à partir des stations météorologiques disponibles.

Les données de température journalière ont été spatialisées en trois étapes, selon une méthodologie validée^{8, 9, 18} :

1. Estimation des moyennes mensuelles des températures journalières (minimum, moyenne et maximum) pour chaque année à l'aide d'un modèle de

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la révision du Fichier écologique des essences et du Guide de boisement, les deux principaux outils à disposition du gestionnaire pour la bonne adéquation essence-station, un nouveau découpage du territoire a été réalisé sur base de données climatiques actualisées et à la lumière des nouvelles connaissances en autécologie des essences.

Dans un premier temps, les données de températures, de précipitations et de rayonnement solaire, de 1986 à 2005, ont été rassemblées et spatialisées sur une maille de 500 x 500 mètres.

Le croisement de ces données avec les sensibilités écologiques des essences a permis d'aboutir à un nouveau découpage du territoire en dix zones bioclimatiques. Ces dix zones remplacent les territoires écologiques comme porte d'entrée du Guide de boisement. Elles permettent également de proposer des cartes de zones à risques pour les différentes essences en fonction de paramètres climatiques spécifiques et selon les quatre niveaux d'aptitude définis pour le nouveau Fichier écologique des essences (optimum, tolérance, tolérance élargie et exclusion).

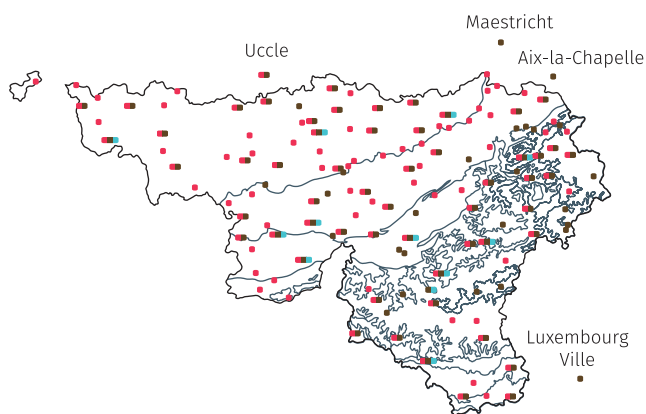


Figure 1. Localisation des stations météorologiques wallonnes (IRM) et limitrophes concernées dans ce projet, sur fond des régions naturelles de Wallonie.

Stations utilisées pour les données de :

- rayonnement solaire
- températures
- précipitation

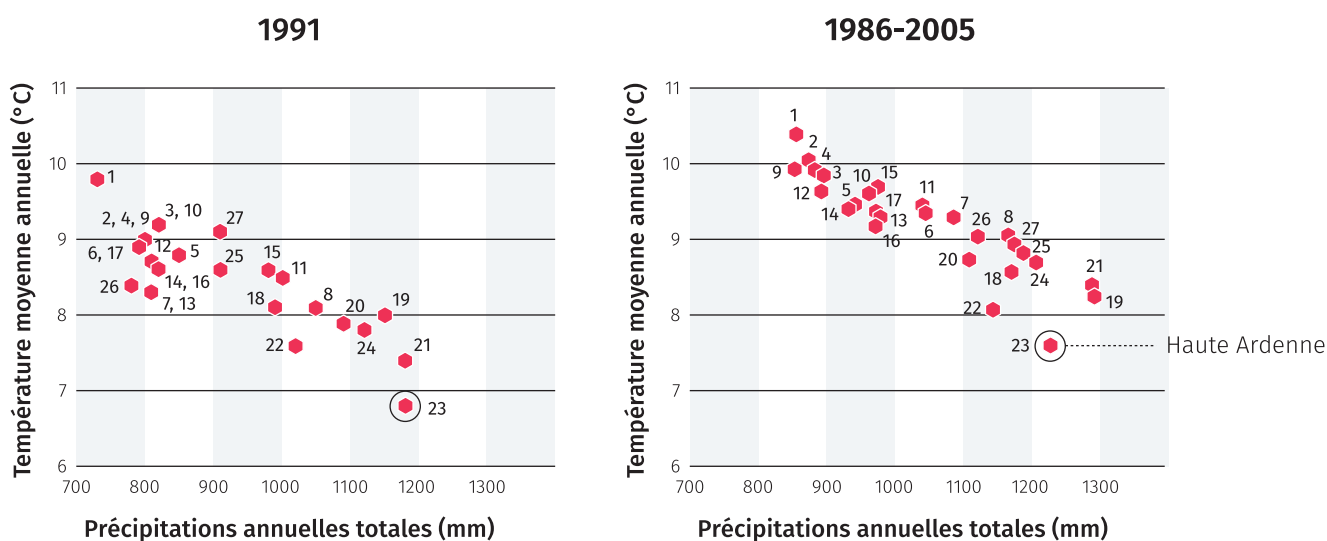


Figure 2. Relation entre la température moyenne annuelle et les précipitations annuelles totales des vingt-sept territoires écologiques selon les données du Fichier écologique des essences forestières de 1991 (à gauche) et les données actualisées (à droite).

régression linéaire simple impliquant l'altitude pour définir la tendance des données.

2. Krigeage des anomalies quotidiennes (différences entre la température du jour et la moyenne mensuelle estimée par régression).
3. En chaque point de la maille, estimation de la valeur de température en additionnant les valeurs issues respectivement de la régression et du krigeage. Une fois la modélisation réalisée, un travail de validation a été effectué.

La modélisation des précipitations a été réalisée selon la même méthode que pour les températures, mais les données à interpoler étaient des données mensuelles.

Compte-tenu du nombre très limité de stations enregistrant le rayonnement solaire, les données jour-

nalières de ce paramètre ont été interpolées selon la méthode simple « *inverse distance weighting* »³, afin de disposer de valeurs spatialisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) grâce à la formule de Turc²².

La comparaison des caractéristiques climatiques moyennes des territoires écologiques après actualisation avec les valeurs reprises dans le Fichier écologique de 1991²⁴ montre l'intérêt du travail effectué. La figure 2 indique en effet clairement que le nuage de points reflétant la relation entre la température moyenne annuelle et les précipitations annuelles totales s'est déplacé à la hausse. Par exemple, pour le territoire écologique de la Haute Ardenne, la température est passée de 6,8 à 7,6 °C et les précipitations de 1180 à 1211 mm. Ces changements traduisent des différences méthodologiques^{16, 23} ainsi que l'évolution

du climat sur la période de temps considérée. En effet, les normales thermométriques journalières (maximales et minimales) et les normales pluviométriques mensuelles utilisées pour caractériser les territoires dans le Fichier écologique de 1991, ont été établies sur base de données climatiques précédant 1979^{20,5}.

Spatialisation des indicateurs climatiques et identification des zones à risques climatiques

À partir des valeurs de températures journalières (minimum, moyenne et maximum) et de précipitations mensuelles disponibles pour chaque année durant la période considérée (1986-2005), il est possible de dériver des indicateurs climatiques. Ces indicateurs s'appuient sur des variables ou des combinaisons de variables plus ou moins complexes. Spatialisés, ils permettent de caractériser la variabilité spatiale du climat d'une région donnée et d'identifier des zones à risques climatiques pour les essences d'intérêt. Parmi les indicateurs calculés citons l'indice de Lang (rapport entre la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle) ou encore la température minimale du mois le plus chaud de l'année.

La figure 3 montre, à titre d'exemple, la carte obtenue en spatialisant les températures moyennes du mois le plus chaud de l'année, sur la base des vingt années de mesures.

Pour la définition de zones à risques climatiques, le principe consiste à identifier les indicateurs pertinents pour l'espèce en question, et à obtenir pour ceux-ci des valeurs de référence qui caractérisent la tolérance ou, au contraire, la sensibilité climatique. Même si l'interprétation de certains indicateurs est rendue complexe par les interactions avec d'autres facteurs, climatiques ou non, ou par l'influence de facteurs sous-jacents, ces indicateurs sont extrêmement précieux pour définir des risques potentiels encourus par une espèce dans une zone donnée. Les valeurs seuils peuvent être obtenues à l'aide de différents types de modèles (modèles de niche¹⁵, par exemple) ou parfois, plus simplement, en s'appuyant sur des observations empiriques. La démarche mise en œuvre est illustrée à la figure 4 dans le cas du hêtre. D'après la littérature^{7,21}, le développement approprié de cette espèce implique une température moyenne journalière supérieure à 10 °C durant un nombre de jours par an compris entre 120 et 180. Sur cette base, la carte présentée à la figure 4 représente les zones de Wallonie où le climat constitue

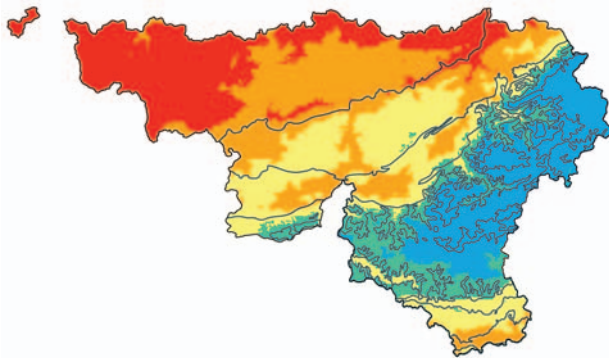


Figure 3. Carte des températures moyennes du mois le plus chaud de l'année, moyennées sur 20 ans (en degré centigrade), sur fond des régions naturelles de Wallonie.

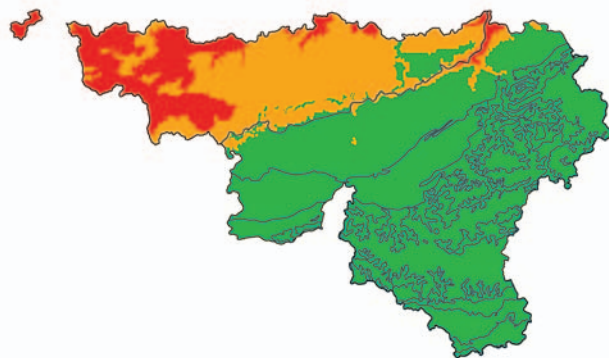


Figure 4. Carte du nombre annuel de jours durant lesquels la température moyenne journalière est supérieure à 10 °C, sur fond des régions naturelles de Wallonie. Le développement optimal du hêtre nécessite un nombre de jours compris entre 120 et 180.

une contrainte potentielle pour le hêtre (zones rouge et orange).

Certains risques, comme ceux associés aux gelées tardives, n'ont pas pu être pris en compte en raison de leur caractère souvent local et de la distribution spatiale des stations météorologiques qui n'autorisait pas leur évaluation ; dans ce contexte, il reste indispensable d'affiner l'analyse climatique en prenant en compte l'impact de la topographie au niveau local.

La suite de l'article indique comment la spatialisation de ces indicateurs climatiques a permis d'obtenir une nouvelle zonation écologique de la Wallonie.

Une nouvelle zonation écologique du territoire wallon

Suite aux travaux de Delvaux et Galoux⁶, complétés par ceux d'Onclinx *et al.*¹⁶, vingt-sept territoires écologiques ont été individualisés à l'échelle de la Wallonie, majoritairement sur la base du climat et de la géomorphologie. Dans le Guide de boisement paru en 1994²⁵, chaque territoire écologique est associé à une liste d'essences feuillues et résineuses potentiellement compatibles avec celui-ci dans le cadre d'un objectif de production de bois.

Lors de la révision de l'outil, initiée en 2009, cette approche a été adaptée pour plusieurs raisons. Comme indiqué ci-dessus, la délimitation des territoires écologiques reposait sur un ensemble de critères, dont l'importance relative variait d'une zone à l'autre ; dans certains cas, elle incluait aussi des critères topographiques relevant de l'échelle stationnelle pris en compte dans une phase ultérieure du diagnostic de l'aptitude. *A contrario*, l'impact majeur du climat et de ses changements attendus impliquait de définir la zonation sur des bases climatiques clairement établies et mises à jour. Par ailleurs, la multiplicité des territoires rendait l'utilisation de l'outil complexe et aboutissait à des listes d'essences largement redondantes entre certains territoires. Enfin, en relation avec l'évolution des concepts sylvicoles, la compatibilité d'une essence intègre désormais quatre niveaux d'aptitudes (optimum, tolérance, tolérance élargie et exclusion²), au lieu des trois considérés antérieurement.

Même si la spatialisation des facteurs bioclimatiques rend possible la constitution de cartes de risques climatiques pour chaque espèce, comme décrit ci-dessus pour le hêtre (figure 4), le principe d'un découpage *a priori* du territoire a été maintenu. En effet, dans un guide de boisement, l'approche consiste à identifier une liste d'espèces potentiellement compatibles qui

est alors progressivement filtrée sur la base d'autres critères, plutôt que de procéder essence par essence.

Dans ce contexte, un découpage purement climatique du territoire a d'abord été réalisé sur base d'indicateurs climatiques spatialisés. Ce découpage a ensuite été affiné en identifiant les zones de sensibilité climatiques pour une série d'essences clé. Enfin, dans un but opérationnel, les zones « brutes » ainsi obtenues ont été toilettées pour éviter l'inclusion de micro-zones et faciliter la définition des limites sur le terrain. Cette troisième phase a bénéficié largement de l'expertise des membres du groupe de travail mobilisé dans le cadre de la révision du Guide de boisement.

Dans une première phase (figure 5), cinquante-neuf variables climatiques pertinentes pour l'écologie des essences ont été identifiées et leurs valeurs spatialisées à l'échelle de la Wallonie. La liste des indicateurs est la suivante (le chiffre entre parenthèses précise le nombre de variables obtenues) :

- la longueur de la saison de végétation (1). Le début de la saison de végétation est déterminé par le franchissement d'un seuil de degré-jour. Dans le cas présent, ce seuil est fixé à 180 °C-jour, la température de base étant de 5 °C et la somme se faisant à partir du 1^{er} janvier. La fin de la saison de végétation est calculée sur base d'une droite de régression entre la température du mois d'octobre et la date de sénescence pour le hêtre et le chêne¹³ (paramètres de l'équation aimablement communiqués par les auteurs). Les valeurs de cet indicateur dépendent donc uniquement de la localisation géographique, indépendamment de l'espèce ;
- la température moyenne en période de végétation (1) ;
- les températures mensuelles moyennes, minimales et maximales (36, soit trois températures multipliées par 12 mois) ;
- la fréquence des gelées tardives et précoces (4). Les gelées tardives sont définies comme étant les gelées ayant lieu entre la date de début de la saison de végétation et la moitié de la durée de la saison de végétation. Les gelées hâtives (ou précoces) ont lieu entre le milieu de la période de végétation et la fin de la saison de végétation. La caractérisation du risque de gelée est faite par deux indicateurs : la probabilité d'avoir une gelée une année, et le nombre total de gelées sur la période de mesures disponible (20 ans). Comme indiqué précédemment, la portée écologique de ces indicateurs est limitée par le nombre et la localisation des stations météorologiques disponibles ;
- les précipitations annuelles, mensuelles et en période de végétation (14). Dans ce cas précis, la période de végétation est définie comme s'étendant

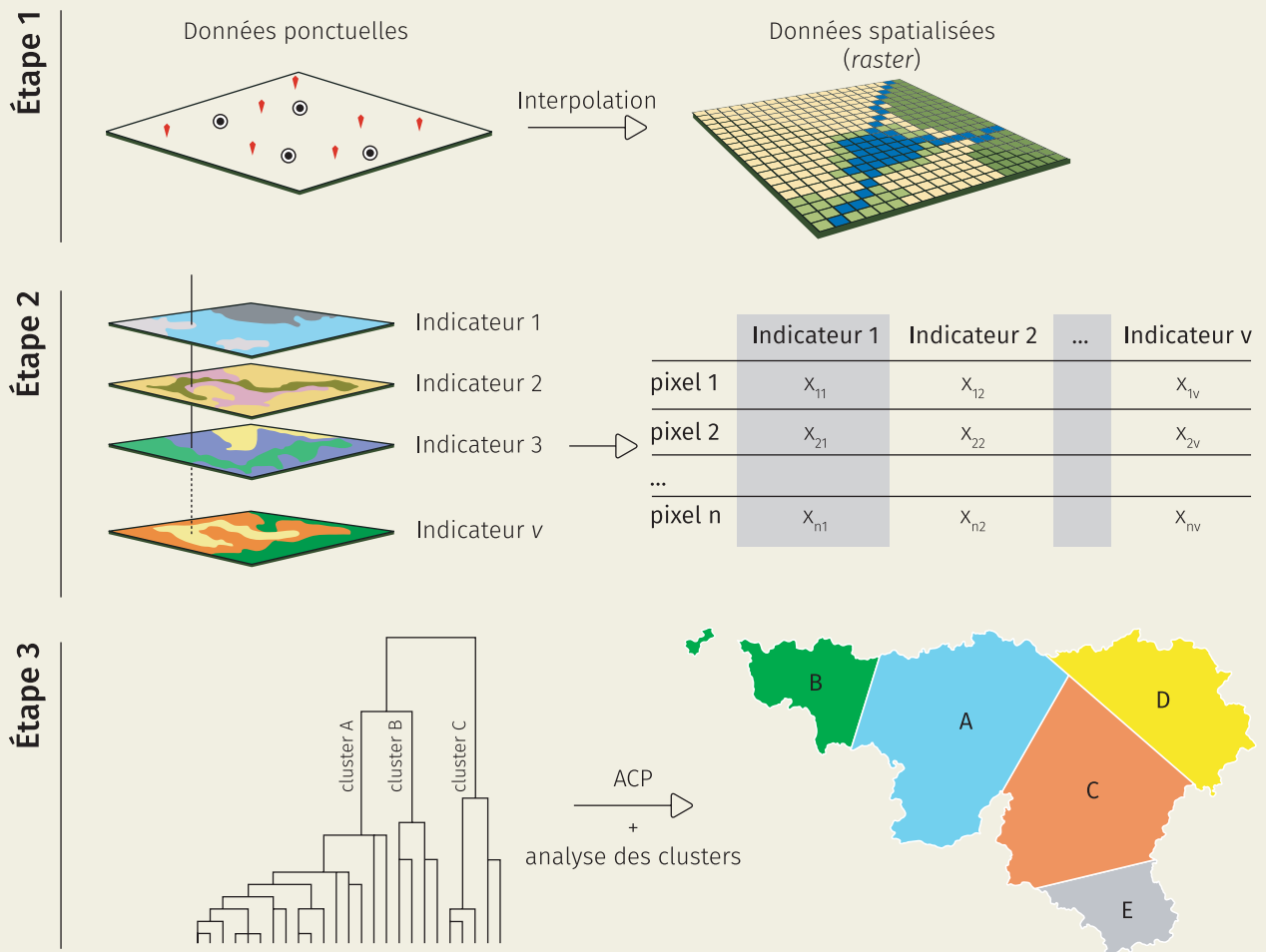


Figure 5. Schéma de la démarche mise en œuvre pour délimiter les zones climatiques.

d'avril à septembre inclus, les précipitations n'étant disponibles qu'au pas de temps mensuel ;

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) cumulée de mai à août (1). L'ETP a été calculée à partir du rayonnement et des températures à l'aide de la formule de Turc²². En effet, sur base des données disponibles, cette formule est celle qui évalue le mieux l'ETP durant la saison de végétation. La formule de référence habituelle¹⁷ nécessite des variables climatiques non disponibles dans le cas présent ;
- un indice de xéricité (indice de Lang) (1). Il s'agit du rapport entre la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle ;
- le bilan hydrique climatique estival (1). Il s'agit de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle calculée sur la période d'avril à septembre compris. Une valeur négative indique un déficit hydrique durant la période de végétation.

Les cinquante-neuf variables ont été classées en isolant les variables indépendantes par une analyse en composantes principales (ACP) puis par une procédu-

re de regroupement sur ces variables. L'ACP est une analyse statistique multivariée qui permet de synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant des individus (par exemple : chaque maille) et des variables quantitatives (par exemple : des données climatiques). Elle permet ensuite par une procédure de regroupement de trouver des ensembles d'individus homogènes et donc de mettre en évidence une typologie d'individus.

Après un premier lissage des pixels isolés, il en est ressorti quatre régions climatiques bien définies (figure 6) avec, du nord au sud :

1. Une région à climat atlantique, correspondant étroitement à la région sablo-limoneuse.
2. Une région de transition comprenant la Famenne, le Condroz et une partie de la Lorraine.
3. Une région « Ardenne chaude » comprenant la basse Ardenne, une partie de la moyenne Ardenne et de la Lorraine.
4. Une région « Ardenne froide » comprenant la haute Ardenne et une partie de la moyenne Ardenne.

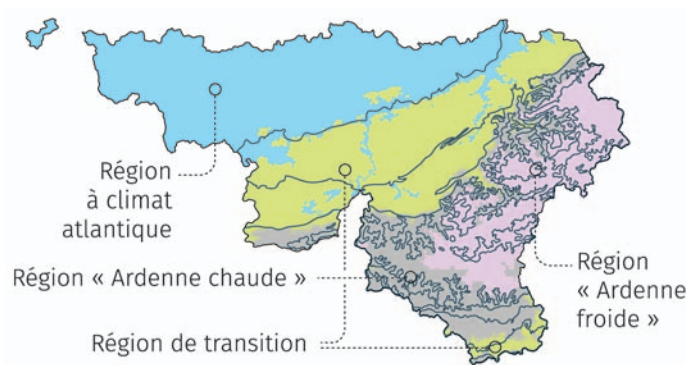


Figure 6. Carte climatique synthétique issue d'une ACP et d'un regroupement sur les cinquante-neuf indicateurs climatiques, sur fond des régions naturelles de Wallonie.

Si cette procédure aboutit effectivement à quatre zones homogènes sur le plan climatique, elle ne permet pas de prendre en compte les différences de sensibilités entre espèces. Ces différences peuvent impliquer soit des seuils ou des gammes de valeurs d'un même indicateur, soit des variables ou combinaisons de variables différentes. C'est la raison pour laquelle les zones susceptibles de présenter un risque climatique ont été cartographiées pour chacune des vingt-neuf essences reprises au tableau 1.

Selon les essences, les sensibilités climatiques ont été définies à partir de modèles issus de la littérature, comme pour le hêtre par exemple (figure 4), ou en s'appuyant sur les informations issues du Fichier écologique²⁴, comme pour le merisier (figure 7). Dans ce dernier cas, l'analyse conjointe de la carte d'aptitude et des risques repris dans les rubriques « Facteurs climatiques » et « Facteurs climatiques et géomorphologiques », respectivement, a permis de déduire les contraintes climatiques impliquées ; une fois celles-ci identifiées, les zones concernées ont été cartographiées à partir de la base de données climatiques mise à jour.

Les zones bioclimatiques retenues *in fine* (figure 8) ont été délimitées en considérant simultanément quatre types de cartes : cartes des variables bioclimatiques individuelles, carte climatique synthétique, cartes des zones à risques par essence, et carte actualisée des territoires écologiques¹⁹. Cette phase de synthèse a pu être finalisée en mobilisant l'expertise des membres du groupe de travail associé à la révision de l'outil.

Au total, dix zones (figure 8) ont été définies dans lesquelles les aptitudes climatiques de chacune des essences principales sont globalement homogènes.

Pour un ensemble de zones, les limites obtenues se sont avérées étroitement liées à l'altitude. Dans ce

Tableau 1. Liste des essences prises en compte pour la délimitation des zones à risques climatiques.

Sapin pectiné		<i>Abies alba</i> MILLER
Sapin de Vancouver		<i>Abies grandis</i> (D.DON) LINDL.
Sapin noble		<i>Abies procera</i> REHDER
Érable sycomore		<i>Acer pseudoplatanus</i> L.
Aulne glutineux		<i>Alnus glutinosa</i> (L.) GAERTHN.
Bouleau verruqueux		<i>Betula pendula</i> ROTH
Bouleau pubescent		<i>Betula pubescens</i> EHRH.
Charme commun		<i>Carpinus betulus</i> L.
Hêtre commun		<i>Fagus sylvatica</i> L.
Frêne commun		<i>Fraxinus excelsior</i> L.
Mélèze d'Europe		<i>Larix decidua</i> MILLER
Mélèze du Japon		<i>Larix kaempferi</i> (LAMBERT) CARR.
Épicéa commun		<i>Picea abies</i> (L.) KARST.
Épicéa de Sitka		<i>Picea sitchensis</i> (BONG.) CARR.
Pin de Koekelare		<i>Pinus nigra</i> ARNOLD <i>subsp. laricio</i> cv. Koekelare
Pin laricio		<i>Pinus nigra</i> ARNOLD <i>subsp. laricio</i> MAIRE
Pin noir d'Autriche		<i>Pinus nigra</i> ARNOLD <i>subsp. nigra</i>
Pin sylvestre		<i>Pinus sylvestris</i> L.
Peuplier tremble		<i>Populus tremula</i> L.
Merisier		<i>Prunus avium</i> L.
Douglas		<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>Menziesii</i> (MIRB.) FRANCO
Chêne sessile		<i>Quercus petraea</i> (MATTUSCHKA) LIEBLEIN
Chêne pédonculé		<i>Quercus robur</i> L.
Chêne rouge d'Amérique		<i>Quercus rubra</i> L.
Robinier faux-acacia		<i>Robinia pseudoacacia</i> L.
Thuja géant		<i>Thuja plicata</i> D.DON
Tilleul à petites feuilles		<i>Tilia cordata</i> MILL.
Tilleul à grandes feuilles		<i>Tilia platyphyllos</i> SCOP.
Tsuga hétérophylle		<i>Tsuga heterophylla</i> (RAFIN.) SARG.

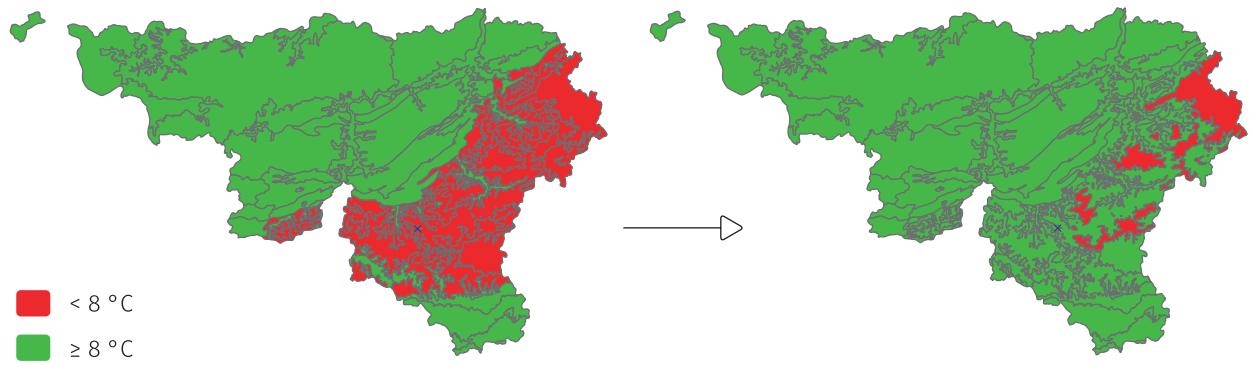
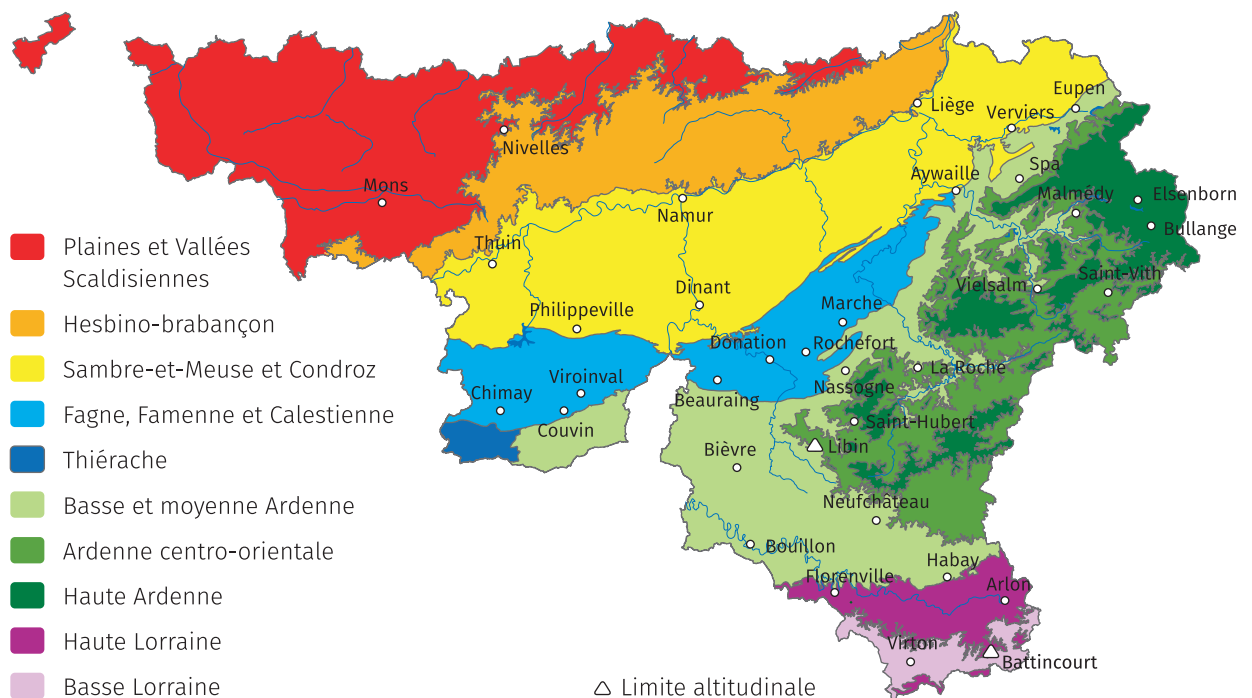


Figure 7. Zone à risques climatiques (en rouge) pour le développement du merisier dans l'ancien Fichier écologique des essences (carte de gauche) et le nouveau (carte de droite), établie en considérant un seuil de température moyenne annuelle de 8°C . En vert : zones où la température moyenne annuelle est supérieure ou égale à 8°C ; en rouge : zones où la température moyenne annuelle est inférieure à 8°C .

cas, les limites issues de la spatialisation des zones à risques ont été simplifiées en définissant des valeurs seuils d'altitude. La limite entre la zone *Plaines et Vallées Scaldisiennes* et la zone *Hesbino-Brabançon* est fixée à une altitude de 130 mètres. La limite entre la zone *Haute Ardenne* et la zone *Ardenne centro-orientale* est fixée à 500 mètres d'altitude. La limite entre la zone *Ardenne centro-orientale* et la zone *Basse et Moyenne Ardenne*, située au sud de Libin, se trouve à une altitude de 470 mètres et la limite nord-ouest à 400 mètres d'altitude. La limite nord entre la zone *Basse Lorraine* et la zone *Haute Lorraine* se situe à 300 mètres à l'ouest de Battincourt et à 340 mètres à

l'est de ce lieu. Pour les autres zones, les limites obtenues étaient proches de celles des anciens territoires écologiques. Elles ont donc été conservées après une nécessaire actualisation de leur tracé pour les rendre compatibles avec le niveau de précision de la nouvelle carte bioclimatique¹⁹. Le risque lié aux gelées n'ayant pas pu être pris en compte de manière satisfaisante, la zone *Fagne, Famenne et Calestienne*, connue des praticiens pour ce risque, a été définie en conservant les limites des territoires écologiques correspondants. Enfin, la zone *Thiérache* a été conservée dans ses limites antérieures en raison de son climat spécifique à la fois chaud et humide (figure 9), en continuité de part

Figure 8. Carte bioclimatique issue de la zonation du territoire sur base des facteurs climatiques et de la sensibilité des essences.



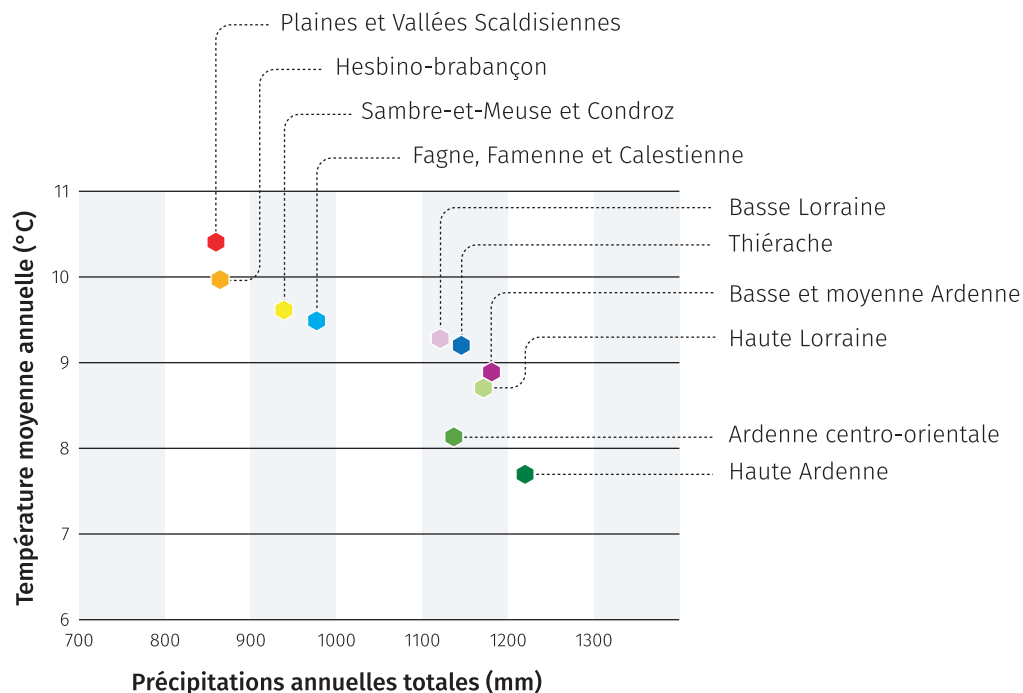


Figure 9. Relation entre la température moyenne annuelle et les précipitations annuelles totales pour les dix zones bioclimatiques.

et d'autre de la frontière, malgré une altitude comparable à celles de zones adjacentes.

Les principales caractéristiques climatiques de chaque zone sont reprises au tableau 2. La projection de ces dix zones sur les axes d'une ACP reprenant les variables du tableau 2 (figure 10) permet de les comparer plus facilement. On observe, par exemple, que les zones *Haute* et *Basse Lorraine* se démarquent des autres par une température maximale absolue supérieure. Plus simplement, la figure 9 montre la position des dix zones par rapport aux gradients de température moyenne annuelle et de précipitation annuelle totale observés en Wallonie.

Cette discrimination du territoire peut être comparée à la carte climatique synthétique (figure 6). La région à climat atlantique correspond spatialement aux zones *Plaines et Vallées Scaldisiennes* et *Hesbino-Brabançon*. La région de transition correspond spatialement aux zones *Sambre-et-Meuse et Condroz*, *Fagne, Famenne et Calestienne* et *Basse Lorraine*. La région « Ardenne chaude » correspond spatialement aux zones *Thiérache*, *Basse et moyenne Ardenne* et *Haute Lorraine*. Enfin, la région « Ardenne froide » correspond spatialement aux zones *Ardenne centro-orientale* et *Haute Ardenne*.

À ce stade de développement de l'outil, les vallées autrefois identifiées comme territoires écologiques à part entière, seront simplement matérialisées sur la

nouvelle carte et prises en compte pour affiner l'aptitude stationnelle si nécessaire. À terme, une cartographie automatisée de la topographie pourrait être mise en œuvre pour faciliter le diagnostic stationnel.

Conclusion

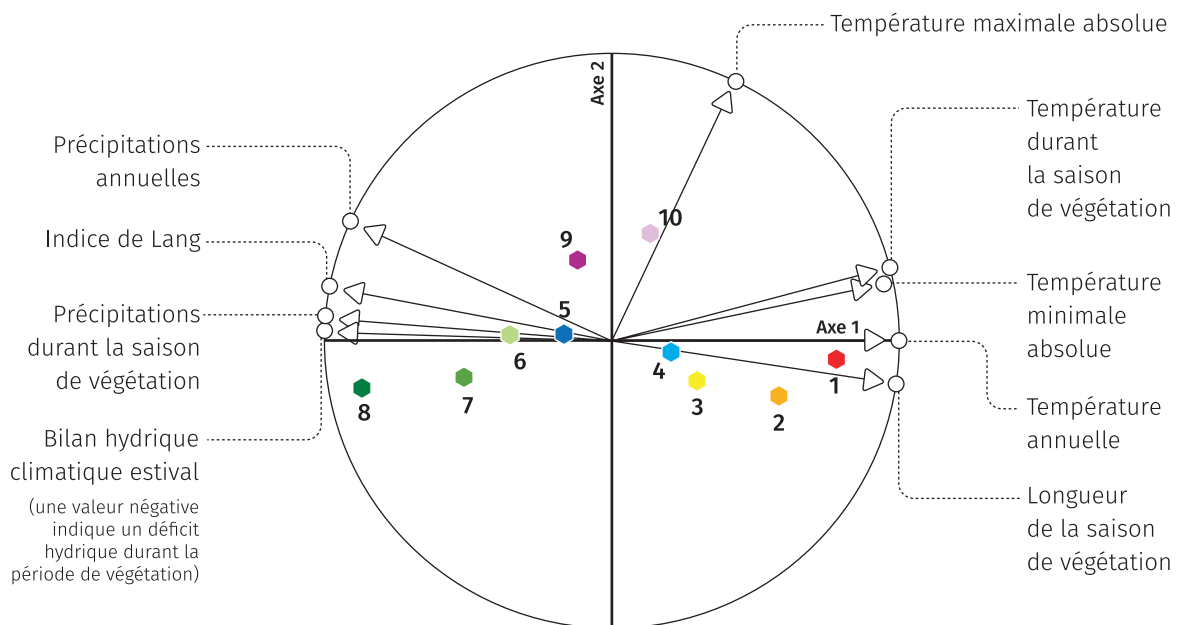
La nouvelle carte bioclimatique permet désormais au gestionnaire d'identifier une liste d'espèces potentiellement adaptées à la station sur la base de leur compatibilité au macroclimat de la zone considérée. Comme dans toute carte de ce type, les limites entre zones doivent être considérées comme une zone « tampon » dont la taille est laissée à l'appréciation du gestionnaire en fonction de son expertise et des différences éventuelles de risque climatique de part et d'autre de celle-ci. La compatibilité climatique de chaque espèce dans chacune des dix zones identifiées est exprimée selon quatre niveaux, dans les fiches essence correspondantes :

1. **Optimum.** L'essence est en optimum au niveau climatique. Elle peut être utilisée comme essence principale ou en accompagnement.
2. **Tolérance.** L'essence est plus ou moins en station mais certains facteurs climatiques sont limitants. La production de grumes de qualité est possible en présence de facteurs de compensation.
3. **Tolérance élargie.** Certains facteurs climatiques sont limitants et il n'existe pas de facteur de compensation. L'essence ne peut être maintenue que si

	Longueur de la saison de végétation (jours)		Précipitations annuelles (mm)		Température moyenne annuelle (°C)		Indice de Lang (xéricité) (mm.°C ⁻¹)		Température maximale absolue (°C)		Température minimale absolue (°C)	
Plaines et Vallées Scaldisiennes	187	2	859	32	10,4	0,2	83,5	3,5	36,2	0,4	-14,5	0,9
Hesbino-Brabançon	182	2	864	32	10,0	0,1	87,6	3,6	35,7	0,3	-16,5	0,8
Sambre-et-Meuse et Condroz	177	5	937	56	9,6	0,3	98,9	8,6	35,8	0,4	-17,8	0,9
Fagne, Famenne et Calestienne	174	3	976	50	9,5	0,2	104,5	6,6	36,2	0,3	-18,3	0,5
Thiérache	170	2	1145	27	9,2	0,1	126,1	4,5	35,9	0,1	-18,5	0,2
Basse et moyenne Ardenne	1163	4	1170	118	8,7	0,3	136,8	17	35,8	0,4	-18,9	0,5
Ardenne centro-orientale	56	2	1136	70	8,1	0,2	141,8	9,2	35,3	0,3	-19,8	0,5
Haute Ardenne	151	2	1219	79	7,7	0,2	161,4	13,1	34,9	0,3	-20,6	0,4
Haute Lorraine	163	1	1179	53	8,9	0,1	135,1	6,5	36,9	0,3	-17,4	0,2
Basse Lorraine	168	2	1119	44	9,3	0,2	122,8	5,3	37,5	0,3	-17	0,3

Tableau 2. Moyenne et écart-type à la moyenne (en italique) des principaux indicateurs climatiques pour les dix zones bioclimatiques.

Figure 10. ACP réalisée en considérant les principaux indicateurs climatiques, et projection sur les axes des dix zones retenues *in fine*. L'axe 1 explique 84,2 % de la variabilité totale et l'axe 2, 12,7 %.



1 Plaines et Vallées Scaldisiennes | 2 Hesbino-brabançon | 3 Sambre-et-Meuse et Condroz | 4 Fagne, Famenne et Calestienne | 5 Thiérache | 6 Basse et moyenne Ardenne | 7 Ardenne centro-orientale | 8 Haute Ardenne | 9 Haute Lorraine | 10 Basse Lorraine

Précipitations durant la saison de végétation (mm)		Température moyenne du- rant la saison de végétation (°C)		Bilan hydrique climatique estival* (mm)	
411	12	15	0,1	-76	12,7
419	11	14,9	0,1	-65,8	11,1
450	25	14,7	0,2	-33,2	25,5
457	16	14,6	0,1	-25,2	18,0
505	9	14,4	0	31,8	10,2
509	26	14,2	0,2	37,3	29,4
502	27	13,9	0,1	37,3	25,5
537	35	13,5	0,2	78,6	34,6
483	19	14,5	0,1	10,6	22,8
467	17	14,8	0,1	-13,7	19,0

* Une valeur négative indique un déficit hydrique durant la saison de végétation

elle est indigène et a un impact positif sur l'environnement. Elle sera utilisée pour ses rôles d'accompagnement et pour son impact positif sur les écosystèmes (fane, biodiversité, etc.).

4. **Exclusion.** Soit les contraintes climatiques sont telles que l'essence ne survit pas à long terme dans la station. Soit, pour les essences qui n'ont pas d'impact positif sur l'environnement, certains facteurs climatiques sont limitants et il n'existe pas de facteur de compensation.

Pour les zones dans lesquelles l'espèce n'est pas en optimum d'un point de vue climatique, un tableau situé dans la fiche essence précise les facteurs de risque et indique, le cas échéant, les compensations possibles.

Pour résumer, le macroclimat constitue le premier filtre pour la sélection des espèces. La procédure se poursuit en prenant en compte les niveaux hydrique et trophique de la station, de même que son microclimat. La dernière étape considère les caractéristiques écologiques et sylvicoles des essences, en retenant parmi ces dernières celles qui permettent de répondre au mieux aux objectifs de gestion ou d'aménagement.

POINTS-CLEFS

- ▶ Le climat régional a été caractérisé sur base de données de températures et de précipitations collectées par l'IRM entre 1986 et 2005 (20 ans).
- ▶ Une série d'indicateurs climatiques liés aux arbres forestiers ont été spatialisés sur une maille de 500 x 500 mètres.
- ▶ Le croisement de ces caractéristiques climatiques avec les sensibilités de 29 essences, aboutit à un nouveau découpage territorial en 10 zones bioclimatiques.
- ▶ Ce nouveau découpage remplace les territoires écologiques comme porte d'entrée du nouveau Fichier écologique des essences.

L'approche mise en œuvre pour la spatialisation du climat permettra une mise à jour régulière des fiches essence en fonction de l'avancement des connaissances en autécologie. ■

Bibliographie

- ¹ Bogaert P. (2011). *Analyse des données spatiales et temporelles*. Cours de master Bioingénieur : sciences et technologie de l'environnement à l'UCL (BIRE 2101).
- ² Claessens H., Bifulchi E., Bythell S., Cordier S., De Bont A., Desjonquères A., Iboukassene S., Ridremont F., Van der Perre R., Vincke C., Ponette Q. (2014). Le nouveau Fichier Écologique des Essences. Pourquoi et comment ? *Forêt Wallonne* 129 : 60-70. 
- ³ Cressie N. (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons, New York, 900 p.
- ⁴ Differt J. (2000). *Phénologie des espèces arborées. Synthèse bibliographique et analyse des données RENECOFOR*. Rapport de stage, ENGREF, Nancy, 224 p.
- ⁵ Dupriez G.L., Sneyers R. (1982). *Précipitations : les normales du réseau pluviométrique belge*. Publication série A 101, Institut royal Météorologique de Belgique.

- ⁶ **Galoux A.** (1967). *Les territoires écologiques. Analyse, description et classification.* Lejeunia 41, 20 p. + 1 carte.
- ⁷ **Gausson H.** (1953). La hêtraie sans hêtre. *Revue Forestière Française* 10 : 650-652.
- ⁸ **Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M.** (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research* 113.
- ⁹ **Hengl T.** (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping.* 2nd ed.
- ¹⁰ **Hofstra N., Haylock M., New M., Jones P., Frei C.** (2008). Comparison of six methods for the interpolation of daily European climate data. *Journal of Geophysical Research* 113 : D21110 (DOI: 10.1029/2008jd010100).
- ¹¹ **Kramer K., Leinonen I., Loustau D.** (2000). The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems : An overview. *International Journal of Biometeorology* 44(2) : 67-75.
- ¹² **Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E., Granier A.** (2005). Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees - Structure and Function* 19(4) : 385-401.
- ¹³ **Lebourgeois F., Pierrat J.-C., Perez V., Piedallu C., Cecchi S., Ulrich E.** (2008). Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : étude sur les peuplements du réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française* 60(3) : 323-343.
- ¹⁴ **Masson G.** (2005). *Autoécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place. 1. Autoécologie.* Tec & Doc Lavoisier.
- ¹⁵ **McCullagh, P., Nelder J.A.** (1997). *Generalized linear models.* 2nd ed., Chapman & Hall, London.
- ¹⁶ **Onclinx F., Tanghe M., Galoux A., Weissen F.** (1987). La carte des territoires écologiques de la Wallonie. *Revue Belge de géographie* 111(1-2) : 51-59 + 1 carte hors texte.
- ¹⁷ **Penman H.L.** (1956) Evaporation. An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4 : 9-29.
- ¹⁸ **Perčec Tadić M.** (2010). Gridded Croatian climatology for 1961-1990. *Theoretical and Applied Climatology* : 1-17 (DOI: 10.1007/s00704-009-0237-3).
- ¹⁹ **Ridremont F., Henrotay F.** (2012). *Carte numérique des territoires écologiques de Wallonie (1/20000).* 1^{ère} Édition, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels.
- ²⁰ **Sneyers R., Vandiepenbeeck M.** (1981). *Les normales du réseau thermométrique belge.* Publication série A, 106, éd. IRM.
- ²¹ **Teissier du Cros E.** (1981). *Le hêtre.* INRA Ed.
- ²² **Turc L.** (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Annales agronomiques* 12(1).
- ²³ **Volle M.** (1985). *Analyse des données.* Economica, Paris, 323 p.
- ²⁴ **Weissen F.** (1991). *Le fichier écologique des essences.* MRW, DGRNE, DNF, Jambes, 45 p. (T1), 190 p. (T2) et 205 p. (T3). 
- ²⁵ **Weissen F., Bronchart L., Piret A.** (1994). *Le guide de boisement des stations forestières de Wallonie.* MRW, DGRNE, DNF, Jambes, 175 p.

Nous remercions vivement les membres du groupe de travail formé pour la révision du Fichier écologique des essences forestières²⁴ et du Guide de boisement²⁵, dont l'expertise fut primordiale pour la finalisation de la carte bioclimatique. Ces recherches ont été financées par l'Accord-cadre de recherches et vulgarisation forestières (Département de la Nature et des Forêts (DGO3-SPW), Département de l'Étude du Milieu naturel et agricole (DGO3-SPW), ELIe-UCL, GxABT-ULg, Forêt Wallonne asbl).

Crédits photos. M. Dellicour (p. 47).

Raphaèle Van der Perre*

Stephen Bythell*

Patrick Bogaert*

Hugues Claessens*

François Ridremont*


Christian Tricot*


Caroline Vincke*

Quentin Ponette*

Quentin.Ponette@uclouvain.be

* UCL, Earth & Life Institute, Environmental Sciences
Croix du Sud 2, L7.05.09 | B-1348 Louvain-la-Neuve

 ULg, Gembloux Agro-Bio Tech,
Gestion des Ressources Forestières
Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux

 IRM, Service scientifique « Renseignements
météorologiques et climatologiques »
Avenue Circulaire 3 | B-1180 Bruxelles