

Tiré à part article Forêt.Nature

Merci pour votre participation à ce numéro de Forêt.Nature.

La version électronique de votre article est fournie uniquement à usage personnel et ne peut être diffusé largement sans l'autorisation préalable de la rédaction.

En cas d'archivage sur serveur informatique, merci d'indiquer la source originale de la publication comme ceci : « Article paru dans Forêt.Nature : www.foretwallonne.be ».

Abonnez-vous gratuitement au **Forêt-MAIL** sur notre site
www.foretwallonne.be

Bénéficiez d'une réduction sur votre abonnement à **Forêt.Nature**
pour la première année

et abonnez vos **étudiants** au tarif spécial qui leur est réservé



Cartographie de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs des stations forestières de Wallonie

Florent Wampach | Jonathan Lisein | Sophie Cordier | François Ridremont | Hugues Claessens
Gestion des ressources forestières (Ulg, GxABT)

Grâce aux données cartographiques de plus en plus nombreuses et disponibles, il est maintenant possible d'analyser l'adéquation essence-station à l'échelle d'un massif ou d'un cantonnement. À échelle plus locale, cette nouvelle cartographie constitue un outil d'aide à l'interprétation des stations pour les gestionnaires, forestiers ou naturalistes.

Depuis

quelques années, la gestion des territoires bénéficie d'outils cartographiques de plus en plus performants. En effet, la quantité d'informations numériques disponibles augmente sans cesse, tandis que la précision de cette information est en constante amélioration. Pour n'en citer que quelques-unes, le Modèle Numérique de Terrain LiDAR, l'Atlas du karst wallon ou encore la nouvelle carte géologique de Wallonie, constituent autant de sources d'informations récentes permettant une caractérisation de plus en plus fine du territoire : risque d'érosion, aléa d'inondation, délimitation des zones karstiques, cartographie des stations forestières, etc.

Prenant acte de ces évolutions, le développement de la nouvelle édition du Fichier écologique des essences^{8,9} s'est accompagné de la spatialisation, à l'échelle de la Wallonie, des principaux facteurs écologiques pris en compte par l'outil dans le choix des essences adaptées à la station. Il s'agit du bioclimat, du niveau hydrique et du niveau trophique de la station.

Faisant suite à un premier article concernant l'élaboration de la carte bioclimatique de Wallonie⁷, les lignes qui suivent présentent la démarche de spatialisation des niveaux hydrique et trophique à l'échelle régionale, ainsi que des couches d'informations intermédiaires nécessaires à leur élaboration que sont les cartes des apports d'eau et des sous-secteurs radiatifs.

Spatialisation des niveaux hydriques et trophiques, une démarche automatisée et évolutive

La démarche générale a consisté en une transposition des clés de détermination des niveaux hydrique et trophique proposées par le Fichier écologique des essences, initialement développées pour une utilisation sur le terrain, à une utilisation sous Système d'Informations Géographiques (SIG).

La démarche du calcul des niveaux hydriques et des niveaux trophiques sous SIG a été automatisée et mise en place à l'aide de scripts (des listes de commandes) dans l'environnement de programmation R. Cette manière d'opérer offre la possibilité de donner un caractère évolutif aux cartes qui en résultent. En effet, il est évident que chaque fois que l'occasion se présente, il faut améliorer les informations écologiques cartographiées, et les opportunités sont multiples :

- Les informations spatiales disponibles ne cessent de se développer (cartes lithologiques, améliorations de la carte des sols, du réseau hydrologique, etc.).
- L'augmentation des connaissances relatives au sol, au régime hydrique et au trophisme des sols, à l'autécologie des essences, etc. permettra des améliorations de la précision de l'estimation des niveaux hydrique et trophique et de l'adéquation essence-station.
- Enfin la validation de la démarche par les utilisateurs de l'outil devrait assurer des retours du terrain sous la forme d'améliorations à apporter.

Cartographie du niveau hydrique

Le niveau hydrique d'une station évalue la disponibilité en eau du sol pour assurer les fonctions métaboliques de la plante. La clé de détermination des niveaux hydriques fait appel aux paramètres suivants (figure 1) :

1. Le matériau (minéral ou organique).
2. La classe de drainage naturel (indiquée par l'hydromorphie du sol).
3. La texture du sol.
4. La profondeur du sol.
5. Le microclimat topographique (sous-secteurs radiatifs).
6. L'apport d'eau par les écoulements topographiques et phréatiques.

Les quatre premiers paramètres sont directement déductibles de la Carte numérique des sols de Wal-

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, les outils cartographiques sont de plus en plus performants. En combinant diverses sources de données écologiques (Modèle Numérique de Terrain, Atlas du karst wallon, Carte numérique des sols de Wallonie, données de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie), il a été possible d'automatiser la cartographie des niveaux hydrique et trophique des stations forestières de Wallonie selon les clés de détermination du Fichier écologique des essences. Le bien-fondé de ces nouvelles cartes a été évalué à partir de différents jeux de données biologiques

(hauteur des arbres, indices de productivité, indicateurs floristiques). Ces cartes ouvrent la voie aux analyses écologiques, et en particulier à l'évaluation de l'aptitude des essences forestières aux stations. Leur utilisation doit toutefois être prudente. À l'échelle locale, les cartes des niveaux hydrique et trophique doivent être considérées comme des outils d'aide à la démarche de terrain. À plus large échelle, elles permettent toutefois une analyse plus globale du territoire (aptitude des essences, évaluation des zones à risque de sécheresse, etc.). Leur validité est limitée aux zones forestières.

A Apports d'eau par les précipitations uniquement (versants, plateaux)

B Apports d'eau variables par écoulements topographiques

C Alimentation en eau constante

A B C

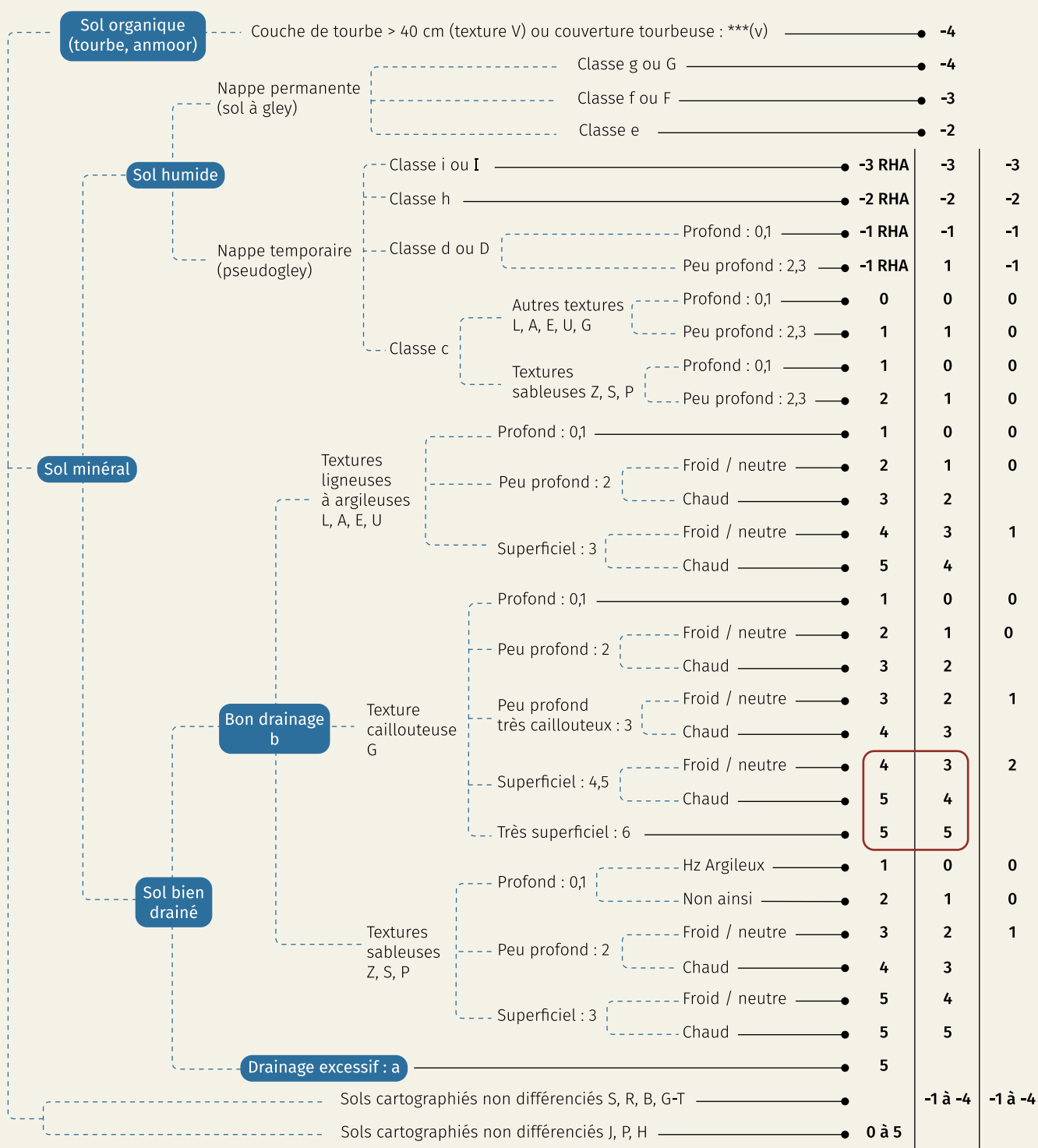


Figure 1. Clé de détermination du niveau hydrique des sols (nouvelle version du Fichier écologique des essences prenant en compte les retours d'expérience de deux décennies d'utilisation sur le terrain). Les sigles et chiffres de la clé font référence à la codification de la carte des sols. Les niveaux entourés en rouge sont accompagnés d'une incertitude (plus ou moins un niveau hydrique) dépendant de la capacité d'enracinement des arbres selon la fissuration, le pendage et l'irrégularité de la roche-mère.

Le niveau hydrique « 0 » désigne la disponibilité optimale en eau, constante et sans excès. Les niveaux négatifs traduisent des déficits croissants en oxygène (hypoxie) suite à un excès d'eau ; les niveaux positifs à une sécheresse croissante. Les niveaux notés « RHA » indiquent un régime hydrique alternatif qui se manifeste par une hypoxie lors des périodes pluvieuses (généralement lors du repos de la végétation) mais un déficit en eau lors des périodes sèches de la saison de végétation.

lonie (CNSW) (encart 1). Tandis que les deux derniers – sous-secteur radiatif et zone d'apport d'eau – ont par contre nécessité des développements cartographiques, détaillés dans la suite du texte.

Développement de la carte des sous-secteurs radiatifs

La position topographique d'une station dans le relief détermine la quantité d'énergie solaire (énergie thermique et lumineuse) qu'elle capte. Cette énergie influencera l'intensité de l'évapotranspiration et donc le régime hydrique des stations. C'est sur ce principe

que Delvaux et Galoux⁵ ont défini trois sous-secteurs radiatifs. La seconde version du Fichier écologique des essences propose une adaptation des valeurs seuils de la définition de Delvaux et Galoux. Par convention :

1. Le sous-secteur **chaud** correspond aux pentes dont l'inclinaison est supérieure à 8,5° (15 %) (situation de versant) qui sont exposées au soleil (orientation de la pente comprise entre 140° et 270°).
2. Le sous-secteur **froid** comprend les pentes de plus de 8,5° et dont l'orientation est comprise entre

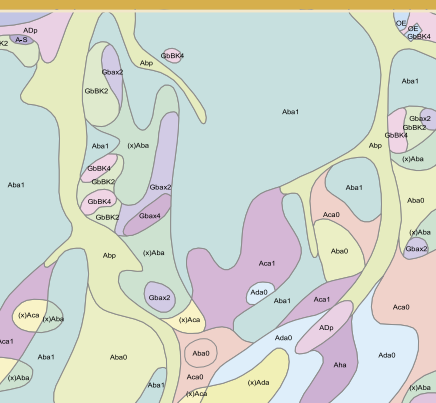
Encart 1. La Carte numérique des sols de Wallonie

La Carte des sols de la Belgique a été réalisée entre 1947 et 1991 par l'IRSIA (Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture)¹. Des sondages à la tarière pédologique ont été effectués tous les 75 mètres de distance à travers toute la Wallonie (environ deux sondages par hectare) pour évaluer une série de critères relatifs au sol (texture, profondeur, couleur, reconnaissance de certains horizons, etc.). À partir de ces informations et de la topographie locale, le cartographe a pu délimiter des plages de sols homogènes pour lever progressivement la Carte des sols de la Belgique. Le Projet de cartographie numérique des sols de Wallonie (PCNSW) a ensuite numérisé et géoréférencé les planchettes de la Carte des sols de la Belgique pour tout le territoire wallon.

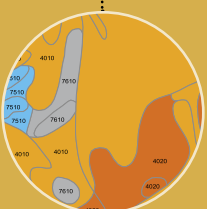
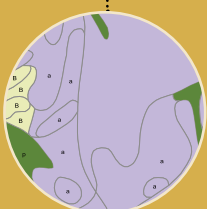
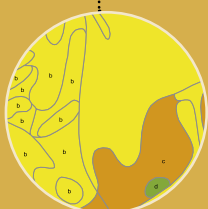
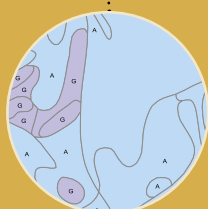
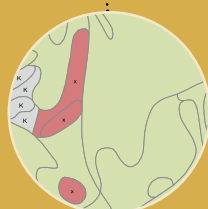
Cette source de données cartographiques découpe la Wallonie en plus de 500 000 plages de sols ou poly-

gones. Plus de 6 000 unités de sols y sont représentés par des sigles rassemblant plusieurs symboles. Les trois ou quatre premiers symboles spécifient la série principale de l'unité de sol. Il s'agit de la texture, du type de drainage, du développement de profil et de la nature de la charge dans le cas des sols caillouteux. Des symboles complémentaires sont également disponibles en préfixe ou suffixe de la série principale, comme la profondeur de sol, la nature de la charge caillouteuse ou du substrat sous-jacent, etc.

La CNSW a permis le découpage de la Wallonie en vingt-trois principaux types de sols (PTS). Les PTS sont des regroupements logiques de sols similaires de par leur texture, classe de drainage et charge caillouteuse. La carte des PTS constitue un support de stratification adapté pour avoir une vision d'ensemble de la diversité des sols à l'échelle de la Wallonie.



N° polygone	Sigle	Substrat	Texture	Drainage	Profil	Charge	Profondeur	...	PTS
1	GbBK4		G	b	B	K	4	...	7510
2	Gbax2		G	b	a	x	2	...	7610
3	Gbax2		G	b	a	x	2	...	7610
4	Ada0		A	d	a		0	...	4020
5	(x)Aba	(x)	A	b	a			...	4010
6	GbBK4		G	b	B	K	4	...	7510
7	GbBK2		G	b	B	K	2	...	7510
...



300° et 110° (versants orientés vers le nord) mais aussi les zones constamment ombragées par le relief avoisinant (par exemple les bas des grands versants exposés vers le sud mais projetés dans l'ombre par les versants opposés), ainsi que les endroits où le froid et le brouillard stagnent (les fonds de vallées encaissées).

3. Le sous-secteur **neutre** correspond aux pentes ayant une inclinaison inférieure à 8,5°, à savoir les plateaux, les larges vallées et les plaines. Le sous-secteur neutre prend également en compte les versants (pente supérieure à 8,5°) ni vraiment chauds, ni vraiment froids, soit en situation intermédiaire entre les deux sous-secteurs précités en termes d'apports thermique et radiatif (orientation entre 110° et 140° ou entre 270° et 300°).

Les sous-secteurs ont pu être discriminés grâce au Modèle numérique de terrain (MNT) (encart 2) dont il existe depuis peu une acquisition par laser aérien (LiDAR). Cette technologie a permis la création d'un MNT de très bonne résolution couvrant l'ensemble du territoire wallon. Il s'agit d'une « couche raster » qui, pour chaque localisation (pixel) de 1 x 1 mètre, renvoie une valeur d'altitude en mètre.

Une réflexion préliminaire nous a amené à générer les cartes avec une résolution de 10 mètres. En effet, une résolution de 10 mètres permet à la fois une bonne caractérisation de la station à l'échelle de l'arbre, mais représente également un bon compromis en termes de temps de calcul et de volume de données. En effet, des cartes plus « résolues » (par exemple d'une résolution de 5 mètres) auraient nécessité plus de temps de calcul et la précision de ces cartes n'aurait pas été améliorée, étant donné que la précision absolue de la CNSW est de l'ordre quelques dizaines de mètres.

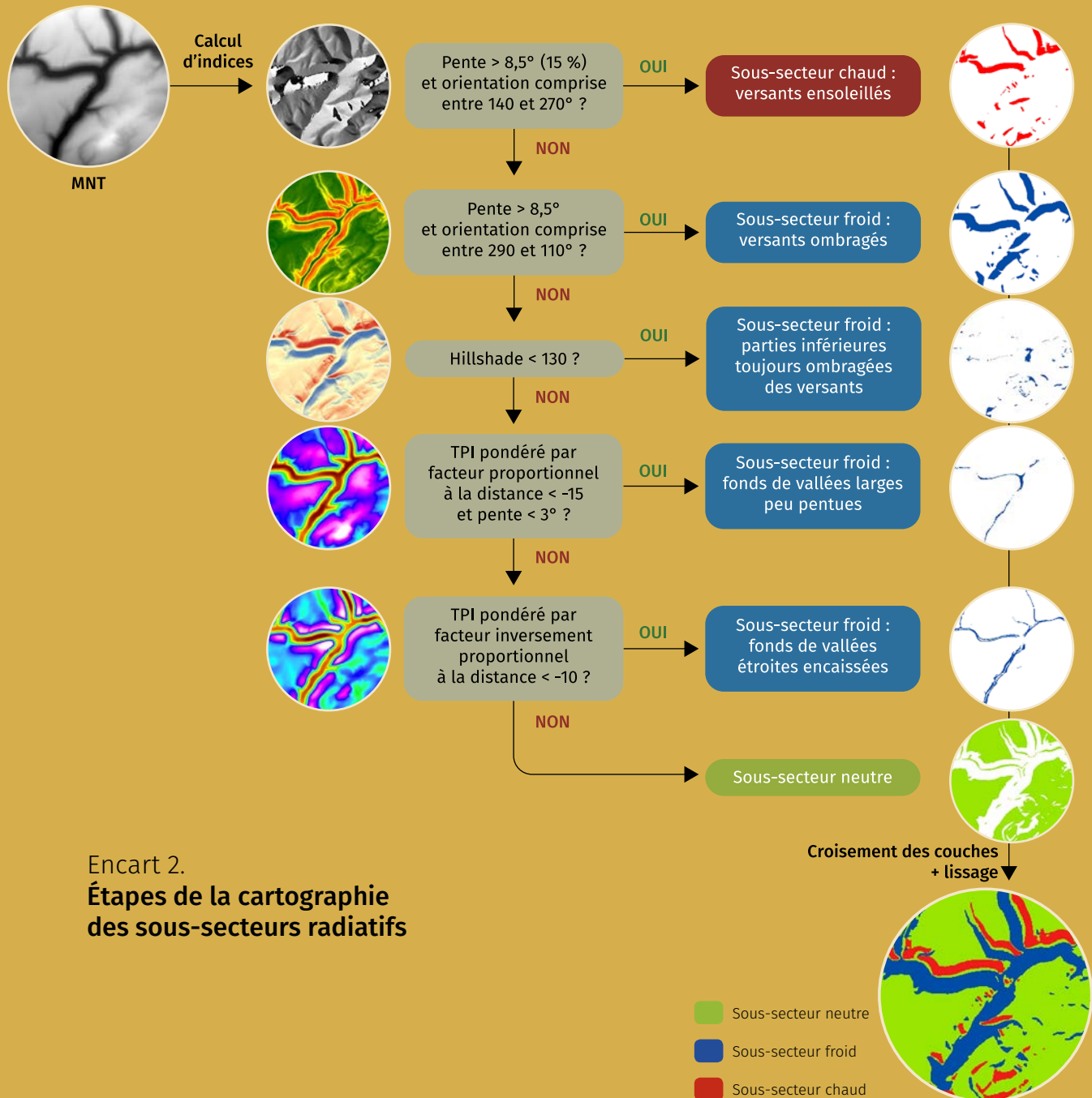
Dans un second temps, la pente et l'exposition pour chaque localisation ont pu être calculées rapidement à partir de ce MNT. Finalement l'application de la typologie de Delvaux et Galoux a permis de déterminer, en chaque lieu, le sous-secteur radiatif.

Cependant, la définition du sous-secteur froid implique la détection de situations topographiques particulières que les valeurs de pente et d'exposition ne permettent pas de distinguer à elles seules. En effet, d'une part, les parties inférieures constamment ombragées des grands versants sont détectés comme appartenant au sous-secteur chaud lorsque l'exposition est comprise entre 140° et 270° et au sous-secteur neutre lorsque la pente est inférieure à 8,5°. D'autre part, les fonds de vallées encaissées larges ou étroites sont repris en situation neutre si l'on ne se base que

sur les valeurs de pente. C'est pourquoi, afin de détecter sous SIG ces situations problématiques, deux indices topographiques ont été générés dans un troisième temps :

1. Les parties inférieures toujours ombragées des grands versants (quelle que soit leur exposition) ont été mises en évidence à l'aide d'un indice d'ombrage (*Hillshade*). Cet indice dérivé du MNT se base sur un algorithme de calcul prenant en compte l'exposition, la pente, ainsi que les mouvements quotidiens du soleil. La valeur prise par l'indice varie entre 0 et 255. Une valeur proche de 0 indique une situation ombragée tandis qu'une valeur proche de 255, une situation ensoleillée. L'exposition moyenne durant une période de végétation est calculée comme étant la moyenne des expositions durant les solstices d'été et d'hiver. Ainsi les zones constamment ombragées mais non identifiées au départ des valeurs seuils de pente et d'exposition de la définition des sous-secteurs, c'est-à-dire les bas des grands versants constamment ombragés, ont pu être détectés à l'aide de cet indice.
2. Les fonds de vallées encaissées ont été révélés en utilisant un indice de position topographique (TPI : *Topographic Position Index*). Il permet de déterminer si la localisation considérée est en position dominée ou dominante vis-à-vis du relief avoisinant. Son calcul se base sur la différence entre l'altitude du pixel en question et la moyenne de l'altitude des pixels situés dans un rayon fixé par l'opérateur. Il est également possible de pondérer l'indice en accordant, lors de son calcul, plus ou moins d'importance aux pixels les plus proches de celui considéré. Pour distinguer les pixels en fonds de vallées larges, un grand rayon de calcul a été utilisé et l'altitude des pixels pris dans ce rayon a été pondérée par un facteur proportionnel à la distance avec le centre du rayon de calcul. Les pixels en fonds de vallées étroites ont été identifiés à l'aide d'un TPI calculé sur un petit rayon et dont les valeurs altimétriques des pixels pris en compte lors du calcul ont été pondérées par un facteur inversement proportionnel à la distance au centre du rayon. Les valeurs des grand et petit rayons ont été définies par essais-erreurs et fixées à 200 et 75 mètres. Pour distinguer les zones d'intérêt, un seuil est ensuite fixé sur les valeurs prises par les deux TPI.

Il est très difficile de fixer très précisément la valeur correcte d'un seuil et aussi, dans le cas du TPI, un rayon de calcul adéquat. On veut en effet passer d'une variable continue (valeur prise par l'indice) à une valeur catégorielle (par exemple « zone ombragée » ou « zone ensoleillée » dans le cas de l'*Hillshade*). Ces valeurs doivent être fixées par l'opérateur sur base de son expertise et d'un processus itératif d'es-



Encart 2.
**Étapes de la cartographie
des sous-secteurs radiatifs**

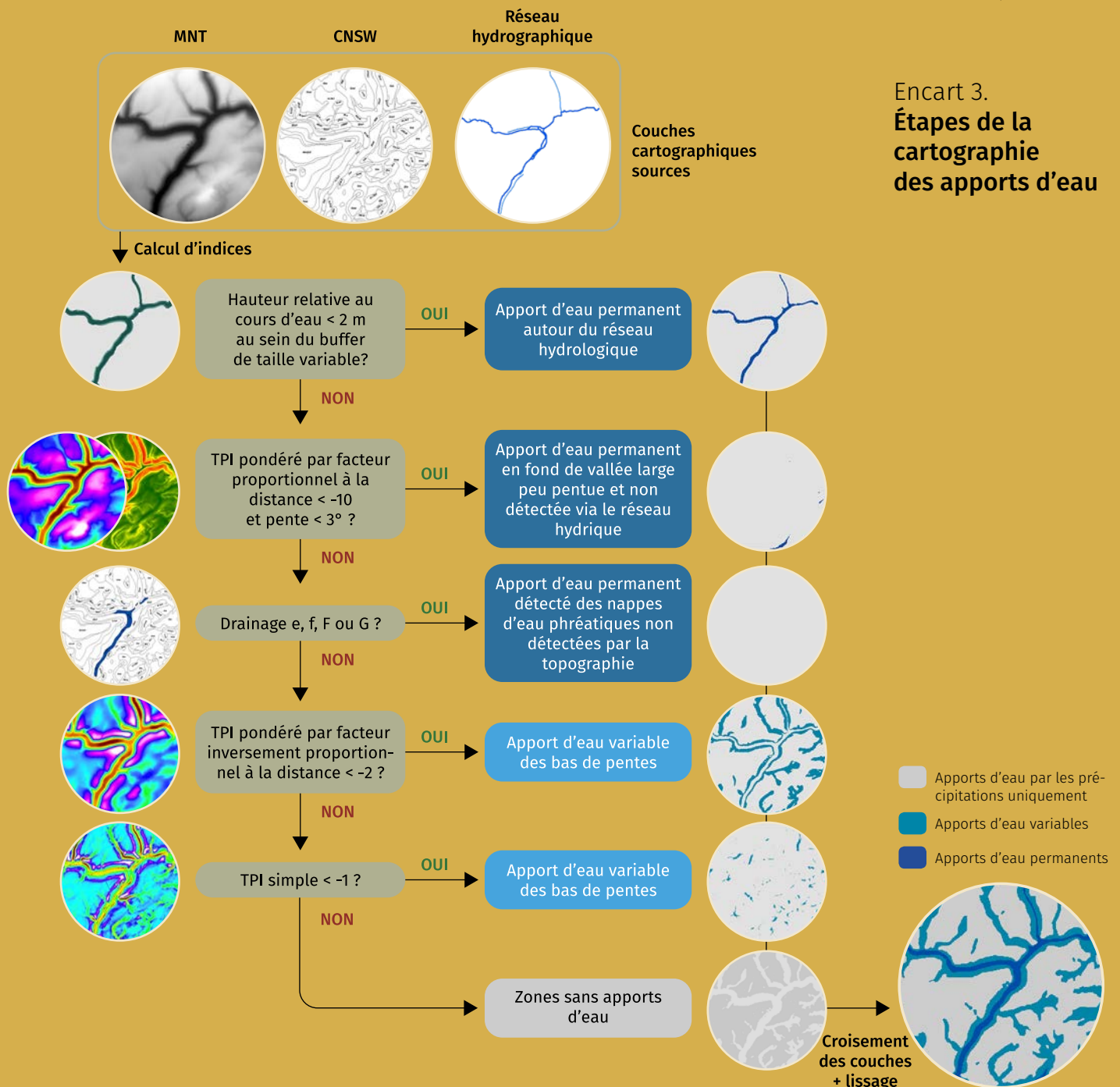
sais-erreurs afin de pouvoir bien mettre en évidence les zones d'intérêt (ici les situations topographiques ombragées non détectées par la pente et l'orientation). En l'occurrence, les valeurs des seuils et des rayons ont fait l'objet de nombreux tests sur trois zones pilotes représentatives de la Wallonie (aux alentours de Neupont, en Ardenne ; Florenville, en Lorraine ; Tournai, plaine de l'Escaut) afin de rencontrer une certaine complémentarité entre les indices.

Développement de la carte des apports d'eau latéraux

Avec les précipitations, la position topographique d'une station dans le paysage conditionne son approvisionnement en eau. Les apports venant du haut de la pente et les pertes par drainage seront plus ou moins forts selon le type de relief. Sur base de la to-

pographie, trois zones d'apports d'eau latéraux ont été définies, indiquant autant de régimes d'approvisionnement en eau différents et intervenant dans la détermination du niveau hydrique :

1. La zone d'apports d'eau permanents correspond aux situations topographiques continuellement approvisionnées en eau (zone « C » de la clé hydrique). Il s'agit de zones de sources ou de sols proches du réseau hydrographique en fond de vallée.
2. La zone d'apports d'eau variables se rencontre en situations topographiques dominées où les sols se rechargent en eau provenant des versants lors des périodes pluvieuses (zone « B » de la clé hydrique). C'est pourquoi, ces conditions topographiques sont favorables en termes d'alimentation en eau. Il s'agit de bas de versants, replats, concavités et vallons.



Encart 3. Étapes de la cartographie des apports d'eau

3. La zone sans apports d'eau latéraux comprend les positions topographiques où les pertes par drainage sont au moins aussi rapides que les apports par écoulement (zone « A » de la clé hydrique). Dans ces situations, ce sont les précipitations, la capacité de rétention et de percolation des sols qui contribuent principalement à l'humidité du sol. Les zones sans apports d'eau sont retrouvées en situation de haut de pente, de pleine pente, de convexité ou de plateau (ou très faible pente).

Les zones d'apports d'eau permanents ont pu être localisées à l'aide de la carte du réseau hydrographique et du MNT (encart 3). La majorité de ces zones a pu être détectée en calculant une hauteur relative par rapport au niveau des cours d'eau et perpendiculairement à

ceux-ci. Ainsi, elles ont été identifiées comme étant les localisations à la fois proches du réseau hydrographique (si la localisation est trop éloignée du cours d'eau, elle est exclue de la détection des apports d'eau permanents) et dont la surface du sol est au plus à 2 mètres au-dessus de la surface du cours d'eau le plus proche. Enfin, les zones d'apports d'eau permanents, dont les apports sont liés à la présence d'une nappe d'eau proche de la surface mais pas à proximité d'un cours d'eau (marais, zones de sources et plaines alluviales), sont identifiées au départ de la CNSW (tourbières ou drainage naturel, à horizon de sol réduit).

La localisation des zones d'apports d'eau variable se base sur le calcul de TPI avec différentes valeurs de rayon de calcul et différents facteurs de pondération.

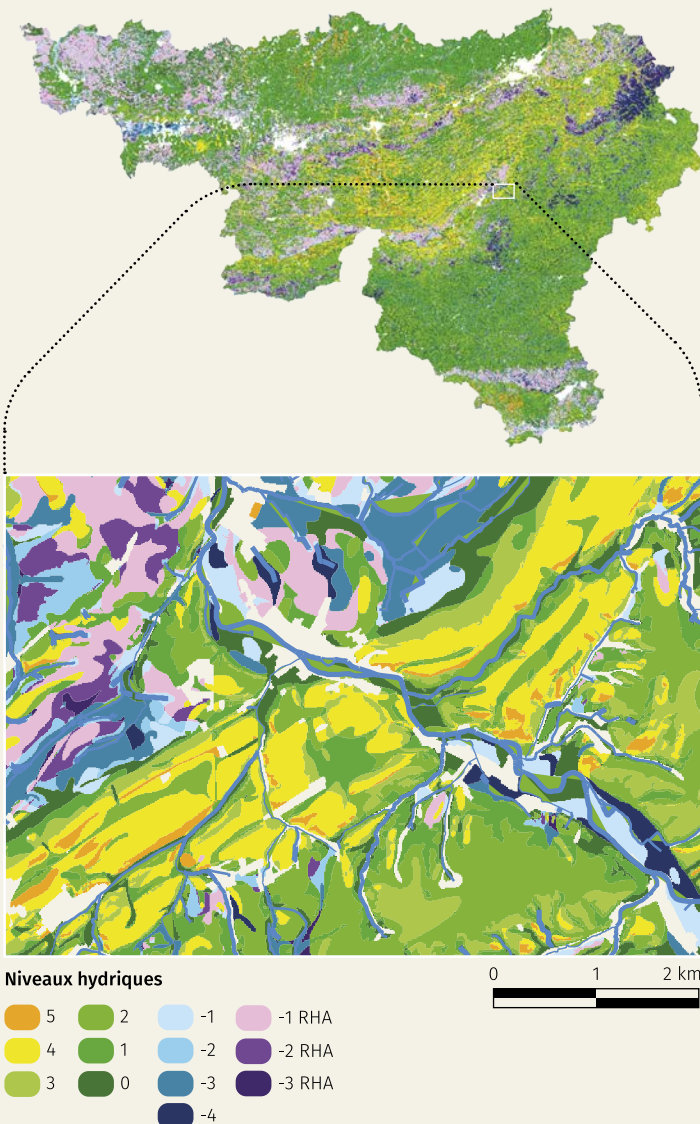
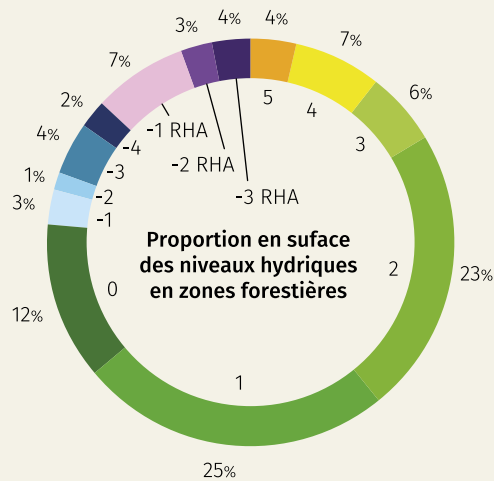


Figure 2. Carte des niveaux hydriques de Wallonie avec zoom sur la région d'Hotton. La carte est visualisée à l'échelle régionale pour mieux apprécier la tendance générale de la répartition des niveaux hydriques en Wallonie. Malgré sa représentation en plein, elle n'est valable qu'en zones forestières.

Cette méthode a permis de déterminer aussi bien les vallons étroits et fortement encaissés que les bas de versants et les larges plaines encaissées.

Finalement, les zones sans apports d'eau latéraux constituent les zones non identifiées comme étant des zones d'apports d'eau variables ou permanents.

Il aurait été logique d'identifier aussi des zones de pertes d'eau (lignes de crête, dômes, etc.) mais cette option n'a pas été retenue afin de respecter les classes d'apport d'eau considérées par le Fichier écologique des essences.

Calcul des niveaux hydriques sous SIG

À l'issue des deux pré-traitements présentés, la carte des niveaux hydriques a finalement été générée (figure 2) en suivant le cheminement proposé par la clé de détermination du Fichier écologique des essences, au départ de trois sources d'information cartographiques :

- la carte numérique des sols de Wallonie,
- la carte des sous-secteurs,
- la carte des apports d'eau.

Cartographie du niveau trophique

Le niveau trophique d'une station informe sur la disponibilité du sol en éléments minéraux nécessaires à la nutrition des plantes.

La clé de détermination des niveaux trophiques proposée par le Fichier écologique des essences s'articule autour de cinq paramètres de nature géopédologique (figure 3) :

1. La nature de la charge caillouteuse.
2. La nature de la roche-mère ou du substrat.
3. Le développement de profil.
4. Le pH-eau.
5. La présence de calcaire actif dans la terre fine.

Les différentes variables relatives aux trois premiers paramètres sont explicitement cartographiées au sein de la CNSW. L'Atlas du karst wallon constitue une source d'information cartographique complémentaire à la CNSW concernant la nature du substrat (calcaire ou non).

En revanche, le pH-eau et la présence de calcaire actif sont deux paramètres qui ne sont actuellement pas disponibles sous forme cartographique.

Les données pH du suivi pédologique de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW) ont cependant permis de générer

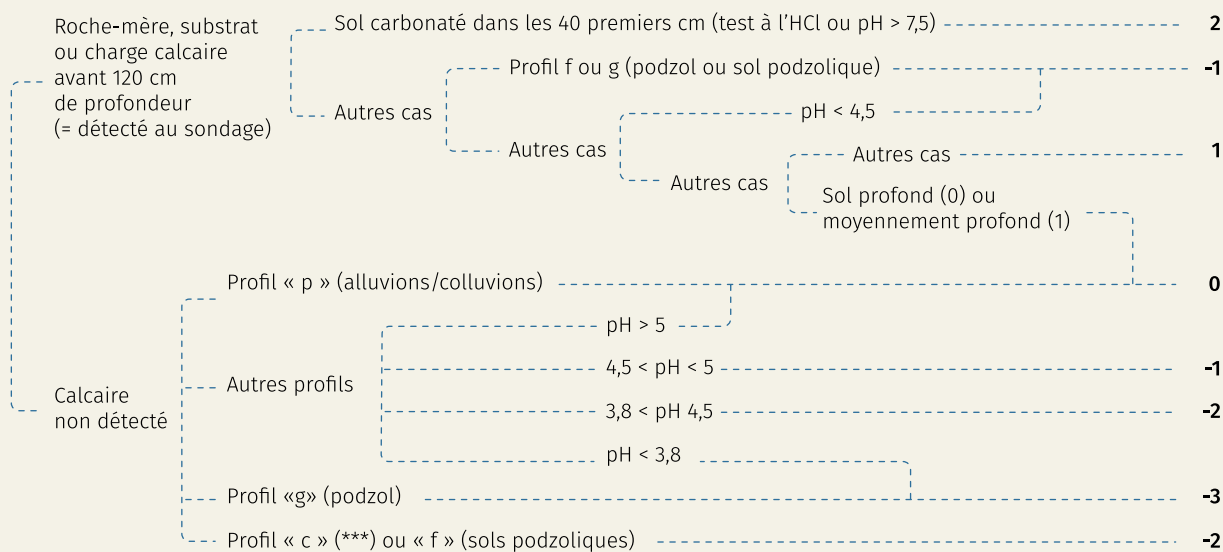


Figure 3. Clé de détermination du niveau trophique des sols (nouvelle version du Fichier écologique des essences). Les sigles et chiffres font référence à la codification de la carte des sols.

Le niveau trophique « 0 » désigne les sols parfaitement pourvus en éléments minéraux, de manière équilibrée et disponible pour les plantes. Les niveaux négatifs indiquent une disponibilité décroissante de minéraux, en relation avec l'acidité croissante des sols. Le niveau -3 indique des risques élevés de carence ou d'indisponibilité des éléments nutritifs. À l'inverse, les niveaux positifs sont caractérisés par une teneur en carbonates croissante, jusqu'à provoquer des problèmes d'alimentation minérale des plantes dans les sols carbonatés dans le niveau trophique +2.

une carte des pH (figure 4) appropriée au niveau de précision recherché pour la cartographie des niveaux trophiques. Elle mériterait toutefois d'être améliorée.

Spatialisation des données ponctuelles de pH-eau

Dans le cadre du suivi pédologique de l'IPRFW, 775 échantillons de sols forestiers répartis sur tout le territoire wallon ont fait l'objet de mesures analytiques en laboratoire pour évaluer divers paramètres, parmi lesquels le pH-eau.

Pour un même principal type de sol (PTS) de la CNSW, le pH moyen peut varier d'un contexte géologique à l'autre. Par exemple, les sols schisteux (PTS « Gbbf » de la carte des sols) de Famenne (sur assises géologiques du Famennien) sont d'un niveau trophique supérieur à ceux d'Ardenne (étage géologique du Siegenien). C'est pourquoi la carte des PTS a d'abord été croisée avec la carte des régions naturelles pour définir des unités cartographiques régionales de PTS. Pour chacune de ces unités cartographiques, un pH moyen a été calculé à partir des données brutes du suivi pédologique de l'IPRFW. Une carte des pH-eau a été générée en couplant les résultats de ces calculs avec les unités cartographiques régionales de PTS correspondantes.

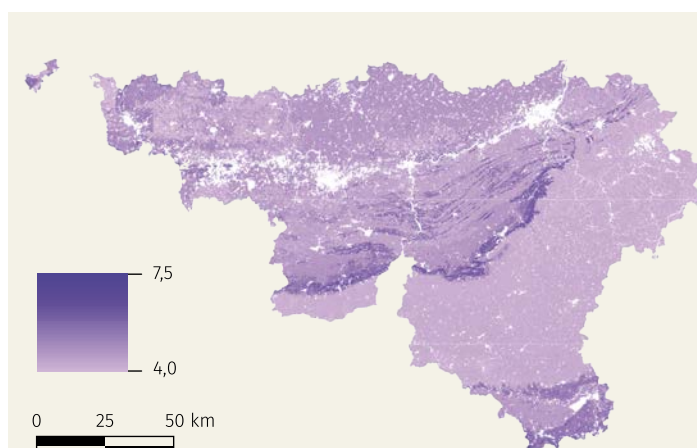


Figure 4. Carte du pH moyen. La carte est visualisée à l'échelle régionale pour mieux apprécier la tendance générale des valeurs prise par le pH en Wallonie. Malgré sa représentation en plein, elle n'est valable qu'en zones forestières.

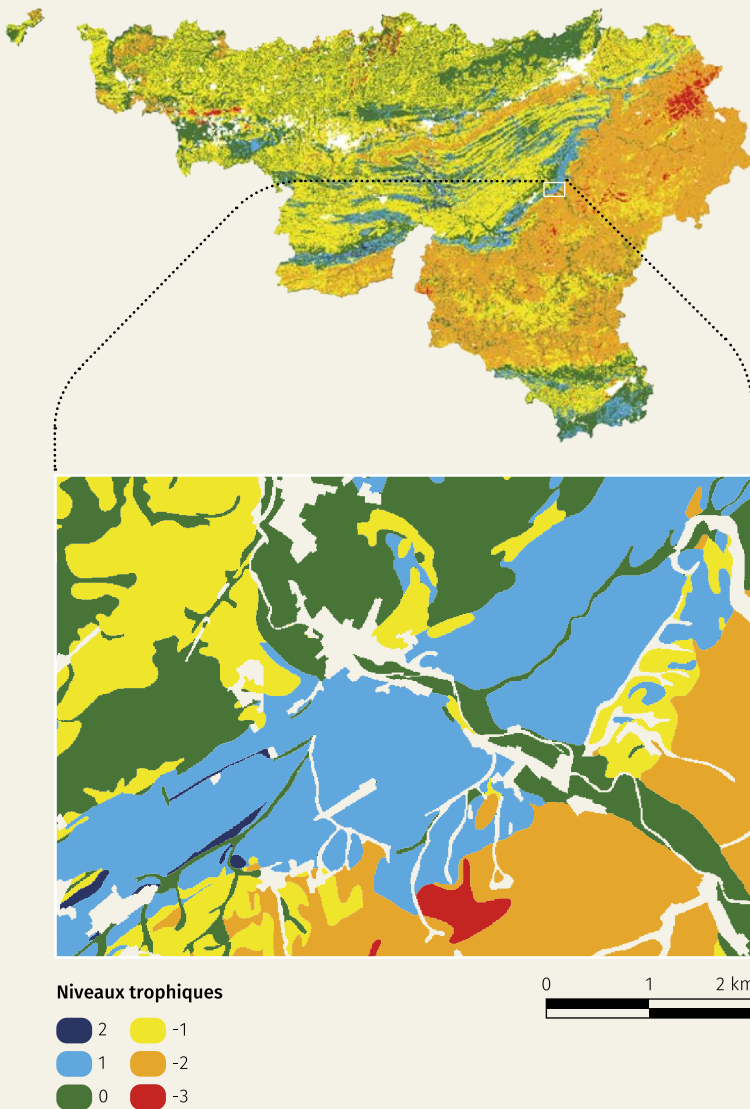
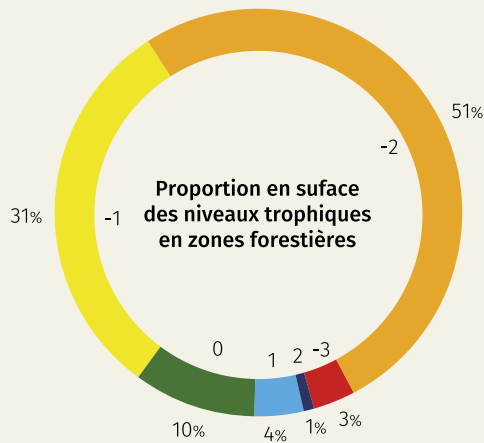


Figure 5. Carte des niveaux trophiques de Wallonie avec zoom sur la région d'Hotton. La carte est visualisée à l'échelle régionale pour mieux apprécier la tendance générale de la répartition des niveaux trophiques en Wallonie. Elle n'est valable qu'en zones forestières.

Cependant, pour certaines unités cartographiques régionales de PTS, le nombre de données brutes est insuffisant pour calculer une valeur représentative. Ainsi, certaines plages de sols ne présentent aucune donnée de pH. C'est notamment le cas des sols tourbeux ou para-tourbeux. Les complexes de sols, quant à eux, ont été assimilés aux sols les plus proches spatialement. La carte des pH forestiers est loin d'être parfaite. Elle ne peut pas être utilisée pour une étude stationnelle fine, mais elle reste adaptée au niveau de précision attendu pour renseigner sur l'état de fertilité général d'un massif forestier. Dès lors, une mesure terrain du pH est toujours nécessaire (via les kits colorimétriques, voire des analyses de laboratoire) pour une caractérisation stationnelle précise.

Calcul des niveaux trophiques sous SIG

Les informations contenues dans l'Atlas du karst wallon, la CNSW et la carte des pH forestiers ont permis le calcul des niveaux trophiques sous SIG selon la clé de détermination du Fichier écologique des essences (figure 5). Il n'est actuellement pas possible de spatialiser le paramètre de présence de calcaire actif dans la terre fine, critère menant au niveau trophique +2 (sols carbonatés). Cependant, à partir de diverses études qui ont été consacrées aux potentialités des sols calcaires, il a été possible d'identifier les types de sols pour lesquels la probabilité de présence de carbonates dans les horizons superficiels dépasse 50 % (sols Gbbk6 et Gbbkf6). Un niveau trophique de +2 leur a dès lors été affecté.

Pour corriger les approximations parfois grossières de la carte des pH, l'approche d'automatisation de la clé trophique a été combinée avec une approche dite d'expert. Par exemple, en raison du manque de données, les sols tourbeux ardennais n'ont pas de valeur sur la carte des pH, ce qui empêche l'attribution automatique d'un niveau trophique. En revanche, sur base de l'expertise, ils ont pu être classés comme appartenant au niveau trophique -3 (sols les plus pauvres).

Validation des cartes

Afin de tester le bien-fondé des cartes générées, celles-ci ont été confrontées à divers jeux de données indépendants. Il s'avère que si les cartes ont été globalement bien réalisées, les plantes, réputées sensibles à de fines variations écologiques du milieu, devraient présenter une réponse propre face aux différents niveaux hydriques et trophiques³. Est-ce que la productivité des pessières diffère d'un niveau hydrique à l'autre et est-ce que cela correspond aux connaissances autécologiques de l'espèce ?

Est-ce que le cortège floristique d'un relevé indique le niveau trophique qui lui est attribué par voie cartographique ? C'est en répondant à ces questions que le degré de recevabilité des cartes a pu être évalué. Il ne s'agit donc pas d'une validation proprement dite mais cet exercice permet de considérer si l'on peut utiliser l'information de ces cartes avec une certaine confiance.

Confrontation de la carte des apports d'eau avec la variation de hauteur dominante au sein d'une chênaie

À une échelle locale (25 hectares) qui permet de limiter les facteurs de variation non contrôlés, les variations de hauteur au sein d'un peuplement de chênes âgés de 100 à 125 ans ont été mises en relation avec la situation d'apport d'eau. Le peuplement, majoritairement en sous-secteur chaud, présente de nombreuses variations topographiques (figure 6) qui ont une nette répercussion sur la hauteur des arbres. Les hauteurs de 410 chênes dominants ont été estimées par détection automatique des maximums locaux au départ du modèle numérique de hauteur LiDAR. Une inspection visuelle de chacun des arbres sur des prises de vues aériennes effectuées par drone dans cet objectif a permis de retirer du jeu de données quelques arbres n'étant pas des chênes (hêtres et pins). Ces hauteurs, que l'on peut assimiler à un indice de productivité dans ce contexte quasi équienne, ont été confrontées à la situation d'apport d'eau (figure 7).

Par ailleurs, dans ce versant sud inadéquat au hêtre, les quelques hêtres détectés dans la chênaie à partir de l'image drone étaient cantonnés à la zone d'apport d'eau permanent. D'une certaine manière, cela constitue aussi un bon signal quant à la recevabilité de la carte des apports en eau.

L'analyse démontre donc la capacité de la carte à distinguer des zones d'apports d'eau différentes. D'autres analyses concluantes ont été menées sur l'indice de productivité du frêne et de l'épicéa à des échelles plus globales.

Confrontation des niveaux hydriques avec la productivité des pessières ardennaises

Un jeu de 1095 pessières d'Ardenne réparties sur l'éventail des treize niveaux hydriques et dont l'indice de productivité a pu être déterminé à partir du couple hauteur dominante-âge¹⁰, ont permis de dresser un aperçu de la recevabilité de la carte des niveaux hydriques (figure 8). Une analyse visuelle montre que la gradation de l'indice de productivité le long du gradient de sécheresse est tout à fait conforme à nos connaissances concernant l'autécologie de cette essence. On remarque également que la productivité

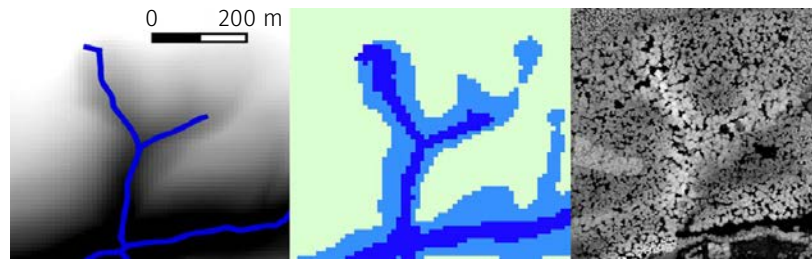


Figure 6. Topographie et réseau hydrographique (à gauche), carte d'apport d'eau (au milieu) et le Modèle numérique de hauteur pour le peuplement du Lairi, à Resteigne (à droite). L'altitude y varie de 270 à 370 mètres ; la hauteur des arbres dominants de 15 à 29 mètres.

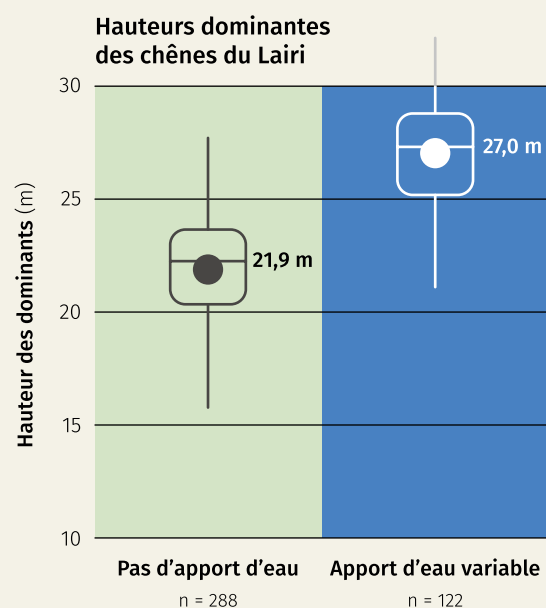


Figure 7. Confrontation de la carte des apports en eau à la hauteur dominante des chênes indigènes. Les couleurs correspondent à celles de la légende de la carte des apports d'eau (trop peu de chênes étaient présents en zone d'apport d'eau permanent pour établir une hauteur moyenne des dominants).

des pessières sur sol à régime hydrique alternatif (RHA) est plutôt à rapprocher des situations de sécheresse (niveaux hydriques positifs) que d'anaérobiose (niveaux hydriques négatifs). Le gradient d'anaérobiose ne révèle pas une tendance aussi nette, ce qui s'explique par un trop faible nombre d'observations pour le niveau hydrique -2 et par les interactions avec les autres facteurs écologiques. Pour le niveau hydrique -4, par exemple, la variabilité des productivités observées s'explique par la combinaison de deux groupes de stations : celles en tourbières, de faible richesse chimique et de faible productivité, et celle des gley en fond de vallée, de bonne productivité car

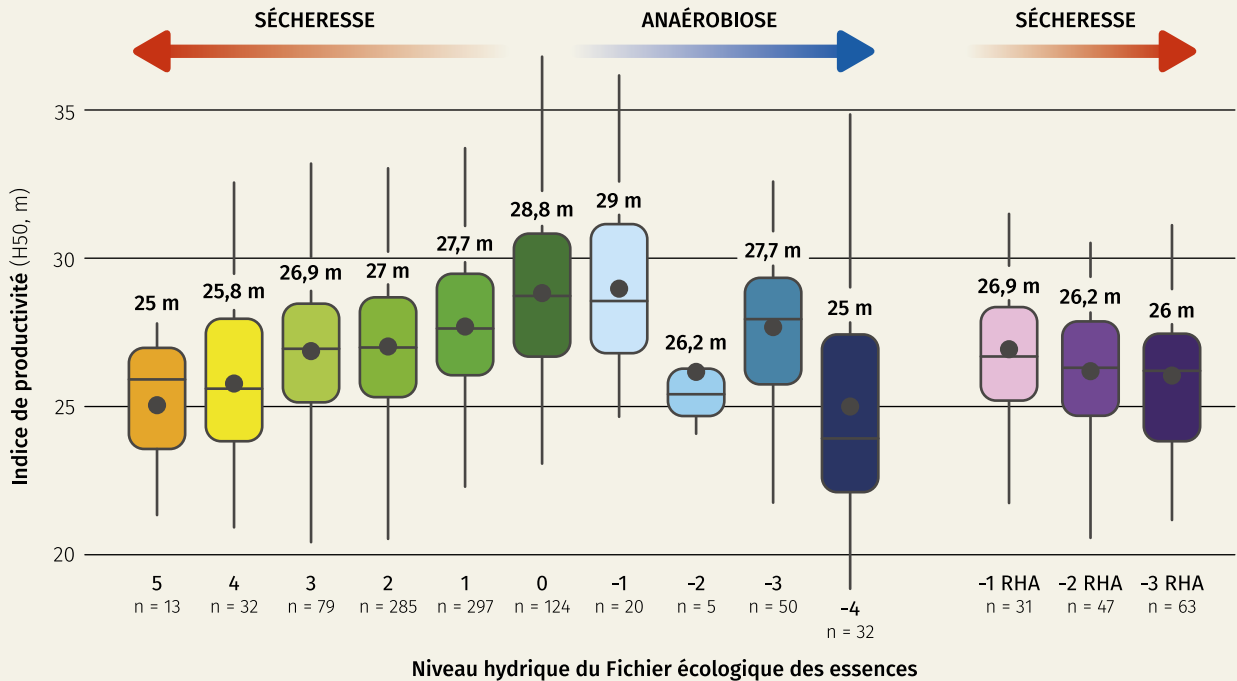


Figure 8. Indice de productivité des pessières ardennaises selon les niveaux hydriques issus de la carte développée en plein sous SIG. Les couleurs correspondent à la légende de la carte des niveaux hydriques.

présentant une richesse chimique et un microclimat optimaux.

Confrontation des niveaux trophiques déterminés sous SIG avec les niveaux trophiques bioindiqués

Une première validation de la carte des niveaux trophiques a été basée sur les valeurs indicatrices de la flore. Cette méthode octroie une valeur indicatrice à une espèce à partir de sa position sur le gradient de valeurs que peut prendre un descripteur abiotique (pH, niveau trophique, réaction à la lumière, besoin en eau, réaction face à la salinité, etc.). En Wallonie, sur base de son expertise, Noirfalise⁶ a attribué un niveau trophique à chaque espèce forestière des groupes écologiques qu'il a définis. Une valeur numérique allant de 1 à 7 a été attribuée à chaque niveau trophique (figure 9).

Pour plus de 15 000 relevés floristiques géolocalisés*, un niveau trophique moyen a été calculé sur base des valeurs indicatrices de Noirfalise, et pondéré par les coefficients d'abondance des espèces du relevé. Il s'agit du niveau trophique bioindiqué par le relevé. Parallèlement, le niveau trophique de chacun de ces relevés a été extrait à partir de la carte des niveaux trophiques.

La comparaison entre le niveau trophique déterminé par SIG et le niveau trophique bioindiqué ou floris-

tique montre un évident parallélisme entre les deux indicateurs (figure 9). Le coefficient de détermination (R^2) de la relation indique que 40 % de la variabilité du niveau trophique floristique est expliqué par le niveau trophique déterminé sous SIG. En écologie, cette valeur est considérée comme satisfaisante car il est évident que de nombreuses autres variables abiotiques entrent en jeu pour expliquer la composition d'un relevé (lumière, alimentation en eau, degré de tassement du sol, etc.).

Ce résultat constitue une première évaluation encourageante du degré de validité de la carte à l'échelle de la Wallonie.

Limites de validité et usage des cartographies écologiques

Comme pour tous les modèles, les cartographies prédictives de paramètres écologiques constitueront toujours des représentations imparfaites des réalités qu'elles tentent de décrire.

* Issus des bases de données phytosociologiques du Centre de cartographie phytosociologique, de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie, du DEMNA et de Gembloux Agro-Bio Tech.

Les cartes des niveaux hydrique et trophique n'échappent pas à la règle, pour différentes raisons :

- La disponibilité en éléments minéraux pour les plantes n'est pas un paramètre facilement mesurable ni aisément déductible des informations cartographiques existantes. En particulier, la relation entre le pH et la disponibilité des sols en éléments minéraux n'est pas directe, tandis que la mesure du pH n'est pas simple : quelle est la profondeur de sol à considérer ? À quelle saison faut-il estimer le pH ? De plus, le pH change en fonction du peuplement en place et de son évolution (apports de lumière dus à une ouverture du peuplement, etc.). Face à ces incertitudes, la carte des pH est largement imparfaite.
- La disponibilité en eau, et surtout sa dynamique saisonnière, est, quant à elle, définie à la fois par la profondeur des sols, mais également par d'autres paramètres plus difficiles à évaluer comme les possibilités d'enracinement, le drainage latéral, la porosité, ou encore le pendage (orientation) de la roche-mère.
- Plus techniquement, la précision de la cartographie des sols, ainsi que la qualité du géoréférencement de la CNSW présentent quelques imperfections qui sont autant de sources d'erreurs.
- Par ailleurs, les échelles hydrique et trophique du Fichier écologique des essences ont été conçues par rapport à certaines contraintes qui ne répondent pas systématiquement à une logique de gradient mais à plutôt de seuils de risques : risque d'intoxication par l'aluminium dans les sols très acides (niveau trophique -3) ou par les carbonates dans les sols calcaires (niveau trophique +2), par exemple. On pourrait envisager de les adapter aux informations numériques désormais disponibles.

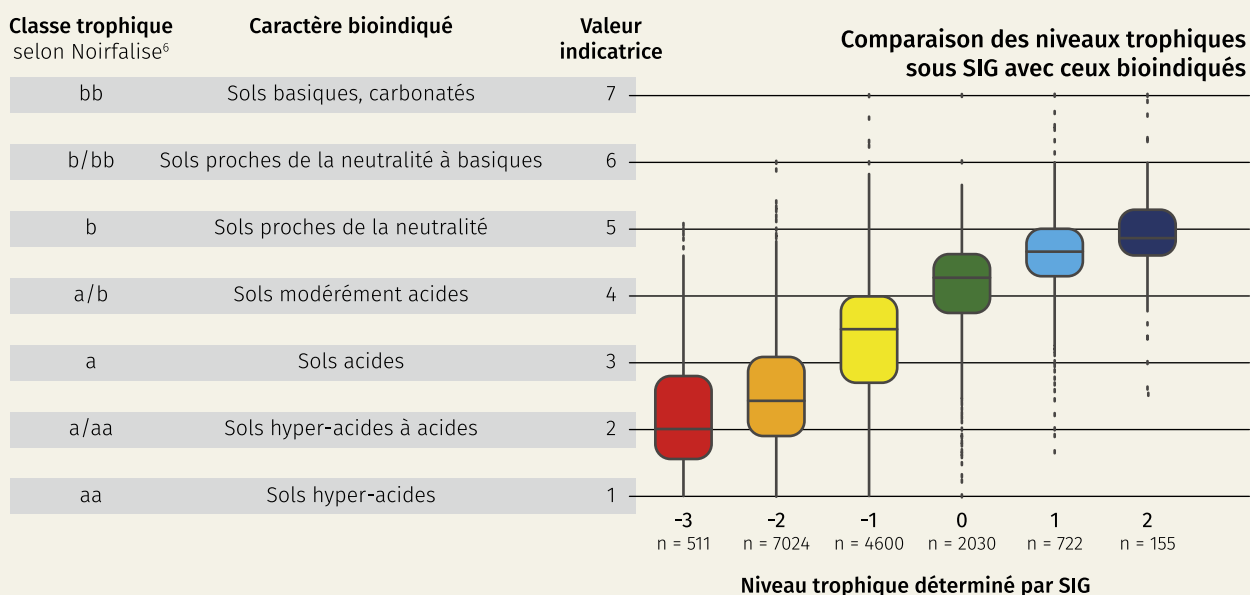
Pour ces différentes raisons, la détermination des niveaux hydrique et trophique par voie cartographique comporte une incertitude non négligeable qui doit être prise en compte lors de l'utilisation de l'outil cartographique. En ce sens, il est recommandé de les utiliser de manière prudente et adaptée au contexte, et en particulier à l'échelle de travail considérée.

À l'échelle locale, lorsque le sylviculteur réalise son choix d'essences pour une plantation, les niveaux hydrique et trophique renseignés par l'approche cartographique et le niveau d'aptitude des essences qui peut en être déduit doivent toujours être considérés comme des indications et une aide à la décision. Il s'agit d'une base de réflexion sur laquelle le forestier pourra s'appuyer, au même titre que sur son expérience lors de son analyse de terrain à l'aide des outils classiques. Par exemple, des mesures de pH ou le recours au test à l'acide pour détecter la présence de calcaire actif dans la terre fine restent nécessaires afin de déterminer précisément le niveau trophique d'une station forestière.

Par contre, **à une échelle plus large**, ces outils cartographiques sont satisfaisants pour évaluer le potentiel de plantation des différentes essences forestières à l'échelle régionale, ou encore de planifier dans les grandes lignes les aménagements au niveau de la propriété forestière.

Enfin, **ces cartes ne sont valables qu'en zone forestière**. En effet, en zone agricole, les amendements et fertilisations ont totalement modifié le niveau trophique des principaux types de sols et le drainage a souvent découplé le fonctionnement hydrique des sols de leurs traces d'hydromorphie désormais fossiles.

Figure 9. Relation entre le niveau trophique bioindiqué par le relevé floristique et le niveau trophique déterminé sous SIG. Le code couleur correspond à celui employé pour la cartographie des niveaux trophiques.



POINTS-CLEFS

- ▶ La cartographie des niveaux hydrique et trophique des stations forestières a été réalisée grâce à l'abondance de données cartographiques numériques.
- ▶ Ces cartes ouvrent des perspectives d'analyse, notamment pour l'évaluation de l'aptitude stationnelle des essences forestières.
- ▶ Ces cartes sont surtout valides à large échelle, pour l'analyse de massifs forestiers par exemple. Plus localement, elles doivent être considérées comme des outils d'aide à la décision ; elles ne sont valides qu'en zone forestière.

Perspectives

Conçues pour la seconde version du Fichier écologique des essences, ces cartes des niveaux hydriques et trophiques viennent compléter la carte bioclimatique déjà publiée. Ensemble, elles constituent un outil d'aide à l'évaluation du niveau d'aptitude des essences de la forêt wallonne.

Par ailleurs, ces cartes, désormais disponibles sur le portail cartographique du Service Public de Wallonie, sont le point de départ d'un nouveau mode d'utilisation des variables écologiques dans les études autécologiques et la gestion des territoires. Nul doute que leur utilisation sera la source de nombreuses améliorations à venir. Le format numérique de ces cartes permettra de périodiquement les mettre à jour pour une efficacité toujours grandissante de la gestion forestière. ■

Bibliographie

- ¹ Bah B., Legrain X., Engels P., Colinet G., Bock L. (2007). *Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (version 2)*. Unité de Science du Sol, GxABT, Ulg, Gembloux, 54 p. + annexes. 
- ² Brusten T., Gonin P. (2016). Décrire les stations forestières pour veiller à satisfaire les besoins des arbres. *Forêt-Entreprise* 228 : 28-33.
- ³ Claessens H. (2003). *Observer la végétation pour choisir une essence adaptée au milieu*. Note technique forestière de Gembloux (FUSAGx) n° 9, 17 p. 
- ⁴ Claessens H., Bifulchi E., Bhythell S., Cordier S., De Bont A., Desjonqueres 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. 

- ⁵ Delvaux J., Galoux A. (1962). *Les territoires écologiques du Sud-Est Belge*. ULB-Centre d'écologie générale. Travaux hors-série, 331 p.
- ⁶ Noïrfalise A. (1984). *Forêts et stations forestières de Belgique*. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 235 p.
- ⁷ Van der Perre R., Bythell S., Bogaert P., Claessens H., Ridremont F., Tricot C., Vincke C., Ponette Q. (2015). La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt.Nature* 135 : 47-58. 
- ⁸ Weissen F. (1991). *Le fichier écologique des essences*. MRW, DGRNE, DNF, Jambes, 45 p. (T1), 190 p. (T2) et 205 p. (T3). 
- ⁹ Weissen F., Bronchart L., Piret A. (1994). *Le guide de boisement des stations forestières de Wallonie*. MRW, DGRNE, DNF, Jambes, 175 p. 
- ¹⁰ Perin J., De Thier O., Claessens H., Lejeune P., Hébert J. (2014). Nouvelles courbes de productivité harmonisées pour le douglas, l'épicéa et les mélèzes en Wallonie. *Forêt Wallonne* 129 : 26-47. 

Les auteurs remercient Franz Weissen, concepteur du Fichier écologique des essences, et Xavier Legrain, du Projet de cartographie numérique des sols de Wallonie pour leurs conseils quant à la révision des clés de détermination des niveaux hydriques et trophiques, ainsi que l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (DNF, DGO3) et le DEMNA (DGO3) pour la mise à disposition de leurs données. La recherche a pu être menée grâce au financement de l'Accord-cadre de recherches et de vulgarisation forestières.

Crédits photos. H. Claessens (p. 47).

Florent Wampach
Jonathan Lisein
Sophie Cordier
François Ridremont
Hugues Claessens
 fwampach@ulg.ac.be

Gestion des ressources forestières (ULg, GxABT)
 Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux



RECHERCHEFORESTIERE.BE
 ACCORD-CADRE RECHERCHES ET VULGARISATION FORESTIÈRES

