Juillet-septembre 2023

n° 168

FORÊT •NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part du Forêt.Nature n° 168, p. 49-58

UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR DES PRATIQUES SYLVICOLES DURABLES. IDENTIFIER LES ZONES À RISQUE NUTRITIONNEL EN FORÊT WALLONNE

François Joussemet, Hugues Titeux, Quentin Ponette (ELIe- UCLouvain)

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70. **Dessin de couverture** : Julien Englebert
La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction. **foretnature.be**

foretnature.be

Un outil d'aide à la décision pour des pratiques sylvicoles durables

Identifier les zones à risque nutritionnel en forêt wallonne

François Joussemet | Hugues Titeux | Quentin Ponette
Earth and Life Institute, UCLouvain

L'intérêt pour la biomasse ne doit pas faire oublier le besoin crucial de laisser en forêt brindilles et branches afin de nourrir les sols forestiers, généralement pauvres. Un outil permet au gestionnaire de mieux évaluer les besoins en fonction des risques.

La bioénergie forestière suscite un intérêt croissant en raison de la volatilité des prix de l'énergie, de la nécessaire diminution des importations d'énergie ainsi que des objectifs de réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre[6]. Cette augmentation de la demande en biomasse peut entraîner une récolte accrue de branches de petite taille, habituellement laissées sur le sol en forêt. Ces branches représentent une faible proportion de la biomasse totale de l'arbre mais sont très riches en éléments minéraux. Une légère augmentation de la quantité de biomasse récoltée induit donc une perte importante d'éléments minéraux pour l'écosystème. Des récoltes excessives peuvent affecter négativement la disponibilité en éléments minéraux pour les arbres se développant sur les sols les plus pauvres[10].

La plupart des sols forestiers de Wallonie sont relativement acides et pauvres. Il est donc important de connaître leur susceptibilité par rapport à une exportation d'éléments nutritifs liée à la récolte de biomasse, afin de pouvoir limiter celle-ci dans les situations les plus problématiques.

Nous présentons ici la mise au point d'un outil, fruit de plusieurs années de recherche, qui permet d'estimer les niveaux de risque des sols forestiers wallons par rapport à une perte de fertilité liée aux exportations de biomasse, et de formuler des recommandations pour adapter les exportations selon le niveau de risque et le scénario sylvicole (peuplement, traitement) en vigueur (figure 1).

Établissement d'un indicateur de la fertilité chimique des sols forestiers wallons

L'évaluation de la susceptibilité des sols aux exportations minérales implique la prise en compte des composantes responsables de la fertilité chimique à court, moyen et long termes. La démarche générale consiste à estimer la disponibilité des ressources en considérant la taille des réservoirs, leur dynamique de réapprovisionnement ainsi que l'aptitude de la plante à mobiliser ces ressources dans les conditions du milieu en cours[8].

Identification des éléments nutritifs les plus limitants pour la productivité forestière en Wallonie

Sur base d'une étude de la composition des feuilles de hêtres et d'aiguilles d'épicéas récoltées sur plus de 60 placettes en Wallonie, nous avons observé que le magnésium (Mg), le phosphore (P), le calcium (Ca) et le zinc (Zn) présentent fréquemment des niveaux faibles, inférieurs aux valeurs considérées comme optimales. Toutefois, seules les teneurs en magnésium et en phosphore montrent des corrélations significatives avec l'indice de fertilité des épicéas (basé sur leur hauteur à 50 ans, données fournies par l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie - IPRFW). Nous avons dès lors décidé de nous focaliser sur ces deux éléments, en émettant l'hypothèse que de telles corrélations existaient également pour d'autres essences que l'épicéa.

RÉSUMÉ

La biomasse forestière, source d'énergie renouvelable et facilement accessible, éveille un intérêt grandissant dans un contexte marqué par la volatilité des prix de l'énergie et par la volonté de la Wallonie de réduire ses émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le dérèglement climatique. Pour répondre à cette demande croissante de produits forestiers ligneux, les pratiques de gestion des exportations lors des coupes sont amenées à s'adapter. Cependant, une récolte de biomasse non raisonnée peut s'avérer préjudiciable à l'écosystème forestier et notamment à son sol. Les sols forestiers de Wallonie étant relativement acides et pauvres en éléments minéraux, l'exportation d'éléments habituellement laissés sur place en forêt pourrait avoir des conséquences négatives, à plus ou moins long terme, sur sa fertilité chimique et de ce fait impacter *in fine* les filières de transformation du bois. Afin d'éviter cette situation, il est nécessaire d'identifier les zones les plus sensibles sur le plan nutritionnel et d'adapter les prélèvements en fonction des peuplements et des contraintes des stations.

Dans ce cadre, nous avons quantifié les exportations minérales pour différentes combinaisons de peuplements, tant feuillus (hêtre et chênes indigènes) que résineux (épicéa, douglas et pin sylvestre), d'itinéraires sylvicoles et de scénarios de récolte[1]. D'autre part, nous avons caractérisé les sols forestiers de Wallonie afin de bien cerner leurs particularités et définir les susceptibilités nutritionnelles associées à chacun d'eux. Avec toutes ces clefs en main, nous avons élaboré un outil de recommandations de gestion proposant des taux de prélèvement de biomasse admissibles, adaptés au type de peuplement, à la sylviculture et au sol afin de garantir une gestion durable de la forêt.

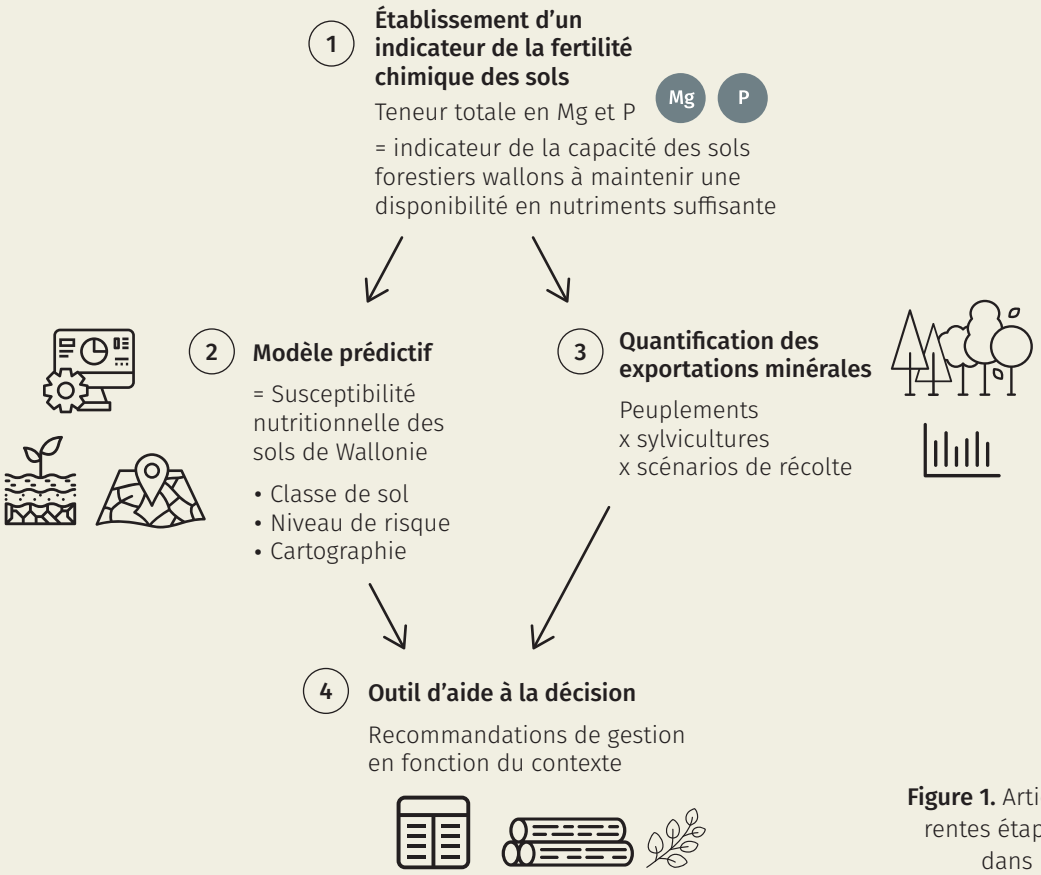

Figure 1. Articulation des différentes étapes mises en place dans le cadre du projet.

Évaluation de la disponibilité du magnésium et du phosphore

Des sondages de sols sur une profondeur de 1 mètre, ont été réalisés sur les points ayant fait l'objet d'analyses foliaires, et des analyses chimiques ont été effectuées afin de mettre en relation les teneurs foliaires en Mg et P avec les caractéristiques des sols. Pour le magnésium, nous n'avons pas observé de corrélation significative avec les teneurs échangeables, mais bien avec les teneurs totales, surtout dans les couches les plus profondes. Pour le phosphore, les meilleures corrélations ont également été observées avec les teneurs totales.

Ces corrélations entre teneurs totales en nutriments dans le sol et nutrition foliaire, qui peuvent paraître surprenantes, s'expliquent en réalité par le rôle prépondérant de l'altération des minéraux dans les sols forestiers en rapport avec la nutrition des arbres. Classiquement, la disponibilité des éléments nutritifs est estimée par la teneur en éléments « échangeables » (ou disponibles dans le cas du phosphore). Cette approche a été mise au point pour mieux doser les apports d'engrais en grandes cultures, où l'altération des minéraux est négligeable étant donné le chaulage dont ils font l'objet. Dans les sols forestiers, le complexe d'échange ne se comporte pas comme un réservoir qui se remplit puis se vide alternativement, car il est réapprovisionné en continu, principalement par le recyclage interne (encart 1) et l'altération des minéraux du sol. De plus, l'apport en Mg par altération dépendrait plus de la quantité de minéraux porteurs de Mg que de leur réactivité (qui est probablement assez homogène dans le contexte wallon) ; le recyclage interne, en absence de perturbation majeure, serait proportionnel aux teneurs foliaires et donc indirectement corrélé à l'altération.

Suite à ces observations et ces réflexions, nous avons choisi de considérer les teneurs totales en Mg et P comme des indicateurs de la capacité du sol à maintenir une disponibilité en nutriments suffisante, même en cas de perturbation du flux par recyclage (par exemple en cas d'exportation massive de biomasse).

Définition de niveaux de susceptibilité des sols forestiers de Wallonie

Prédiction de la disponibilité en Mg et P

Étant donné qu'il n'est pas envisageable de mesurer les teneurs totales en Mg et P dans les horizons pro-

Encart 1. **Les flux de Mg et P dans les écosystèmes forestiers**

Les principales réserves en Mg et P sont situées dans les minéraux. En s'altérant (fragmentation physique et dissolution par les acides du sol), ces éléments sont libérés très lentement, mais de façon continue. La réserve disponible est constituée de nutriments fixés de façon temporaire par les composants du sol (minéraux et matières organiques). C'est principalement à partir de cette réserve que les racines absorbent le Mg et le P, bien que grâce aux mycorhizes, elles soient capables d'aller les chercher directement dans les minéraux ou l'humus. Une importante partie des éléments nutritifs prélevés par les arbres retourne au sol via les retombées de litières (feuilles, aiguilles, branches mortes). Leur décomposition permet de recharger le pool disponible. La récolte des arbres constitue une perte d'éléments pour le système. Les apports atmosphériques (pluie, poussière, fixation directe) sont des sources importantes pour certains éléments, mais ils sont faibles pour Mg dans le contexte wallon et sont négligeables pour P. En situation d'équilibre, les pertes par drainage sont normalement très faibles, mais peuvent devenir importantes pour Mg en cas de pic de production de nitrate (en particulier après une coupe à blanc sans végétation pré-établie). Pour le P, aucune perte par drainage n'est possible car cet élément est très peu mobile dans le sol.

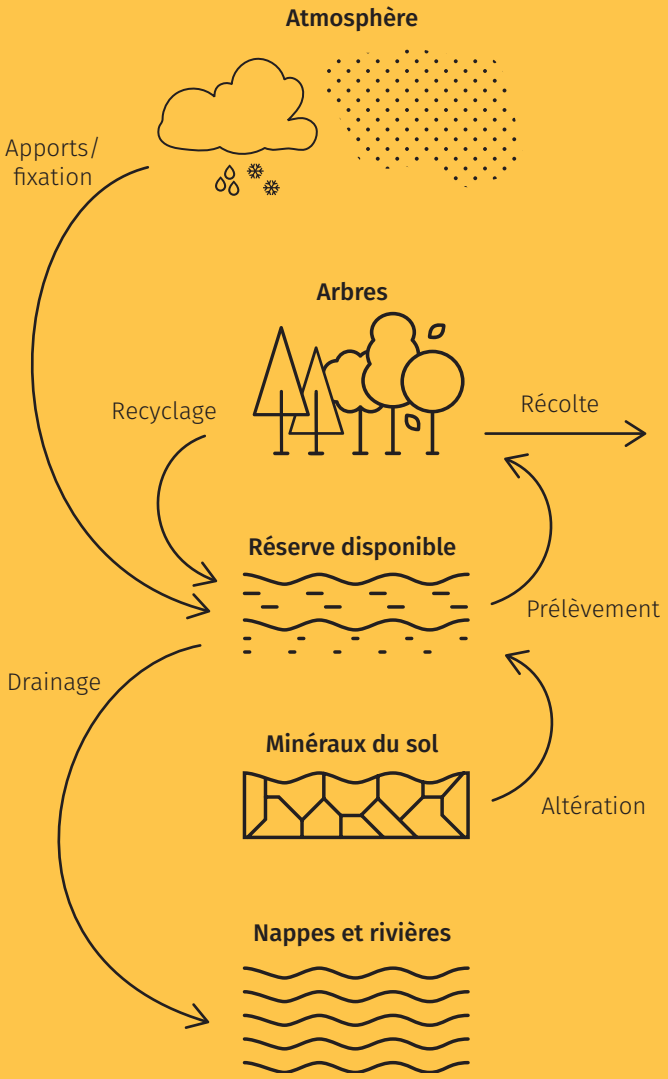

Figure 2. Sondage pédologique effectué à la tarière dans un sol limoneux avec engorgement temporaire en surface. Le caractère hydromorphe du sol provoque l'alternance de tâches de couleur rouille et de tâches bleu-gris correspondant à l'oxydo-réduction du fer.

fonds de chaque parcelle à évaluer, nous avons mis au point un modèle prédictif basé sur des critères déjà cartographiés, sur les teneurs mesurées dans les horizons de surface (0-20 cm) sur plus de 800 points de l'IPRFW[2] et sur des sondages « profonds » (0-100 cm) et analyses complémentaires effectués dans le cadre de ce projet sur 72 points représentatifs des différentes combinaisons géo-pédologiques (figure 2).

Nous avons commencé par identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur les teneurs totales en Mg et P dans les horizons de surface : la texture, la nature de la charge caillouteuse, l'étage stratigraphique* (qui caractérise l'époque à laquelle le sédiment à l'origine de la roche s'est déposé), la présence de colluvions et d'alluvions, la présence de certains substrats en profondeur et la présence d'une nappe temporaire à proximité de la surface.

* Information dérivée d'une version provisoire de la carte CNSW-stratigraphie transmise par le groupe de travail « stratigraphie » de ULiège-GxABT, ainsi que d'une carte géologique du Service Géologique de Belgique pour les cantons de Malmedy et Saint-Vith.

Tableau 1. Description synthétique des 22 classes de sols, avec les teneurs totales médianes et les niveaux de risque nutritionnel associés (échelle de 1 à 5, respectivement de risque très faible à très fort) pour le Mg et le P. Les sols tourbeux et tourbières sont considérés à part dans l'outil et correspondent par défaut à des sols sensibles.

Classe de sols	Description	Teneur totale (mg/100g)		Niveau de risque	
		Mg	P	Mg	P
1	Sols tourbeux et tourbières				
2	Sols sableux à substrat « riche »	104	42	3	2
3	Sols sableux sans substrat « riche »	46	27	5	3
4	Sols sablo-limoneux sur sous-sol primaire et secondaire (sauf crétacé)	86	37	4	2
5	Sols dérivés d'alluvions ou de colluvions	306	54	1	1
6	Sols limoneux avec engorgement temporaire en surface	132	33	2	3
7	Sols limoneux, limono-sableux et limono-caillouteux sur sous-sol tertiaire et crétacé	155	34	2	3
8	Sols limoneux et argileux sur sous-sol primaire et secondaire (sauf crétacé)	226	42	2	2
9	Sols limono-caillouteux à charge « schisteuse » et sols limoneux sur substrat « schisteux »*	232	42	1	2
10		531	48	1	2
11		181	60	1	1
12		285	61	1	1
13		307	52	1	1
14		122	40	3	3
15	Sols limono-caillouteux à charge « gréseuse » avec engorgement temporaire en surface	96	38	4	3
16	Sols limono-caillouteux à charge « gréseuse »*	133	34	3	3
17		237	39	2	3
18		133	47	3	2
19		84	37	4	3
20		133	40	3	3
21		108	41	3	2
22	Sols à argiles lourdes et sols limono-caillouteux dérivés de calcaire	420	42	1	2

* Les classes de sol correspondantes se distinguent par leur étage stratigraphique.

Ces paramètres ont été regroupés et combinés afin d'obtenir un nombre limité de classes homogènes du point de vue des concentrations totales en Mg et P (tableau 1). Ces groupes, appelés « classes de sols », présentent quelques similitudes avec les « principaux types de sols » de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW), mais sont moins détaillés sur certains aspects (texture, hydromorphie) et plus précis pour d'autres (nature de la charge, substrats…).

Les distributions des teneurs en Mg et P en surface ont été calculées pour chacune de ces classes en nous appuyant sur les données de l'IPRFW, et la présence potentielle d'horizons plus riches en profondeur a été évaluée sur base des sondages « profonds » complémentaires.

Avec ces informations, nous avons défini ensuite des niveaux de risque de déficience en Mg et en P, lors d'exportation massive de biomasse (tableau 1). Nous sommes partis du principe que les sols présentant des teneurs totales faibles, et donc de faibles apports par altération, présentent les risques de déficience nutritionnelle les plus élevés en cas de perturbation du

recyclage interne. Ce risque est évalué, séparément pour Mg et P, sur une échelle de 1 (risque très faible) à 5 (risque très fort), en considérant à la fois les teneurs médianes par classes et la possibilité d'enrichissement en profondeur.

Cartographie des risques de déficience nutritionnelle en Mg et P

À partir du sigle pédologique et des informations stratigraphiques associées (carte CNSW-stratigraphie), nous avons pu identifier la classe de sols pour la plupart des polygones de la carte des sols et leur attribuer des teneurs en Mg et P et des niveaux de risque de déficience nutritionnelle. En cas d'incertitude sur la couche stratigraphique (zones de contacts entre différents étages), les niveaux de risque les plus sévères ont été retenus.

Les cartographies réalisées permettent de se rendre compte des zones et des superficies où les risques sont les plus élevés et où les exportations minérales sont d'autant plus à surveiller. Pour le phosphore, les risques nutritionnels en forêt wallonne ne sont pas alarmants et ne concernent que les niveaux « très faible » à « modéré » sur notre échelle à 5 niveaux (figure 3). Concernant le magnésium, le risque de déficience est maximal pour les sols sableux sur substrat « pauvre » que l'on retrouve au Nord-Ouest ainsi qu'au Sud de la Wallonie (figure 4). L'approche adoptée pour la définition des risques nutritionnels

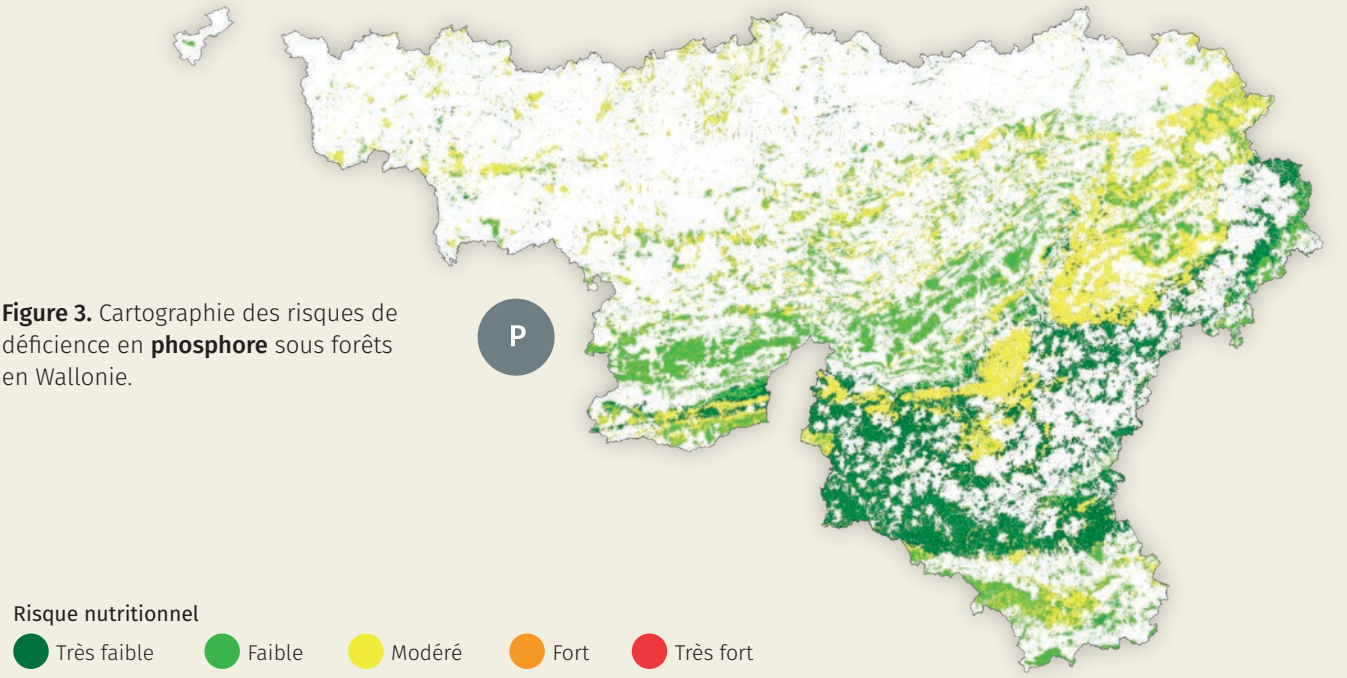

Figure 3. Cartographie des risques de déficience en **phosphore** sous forêts en Wallonie.

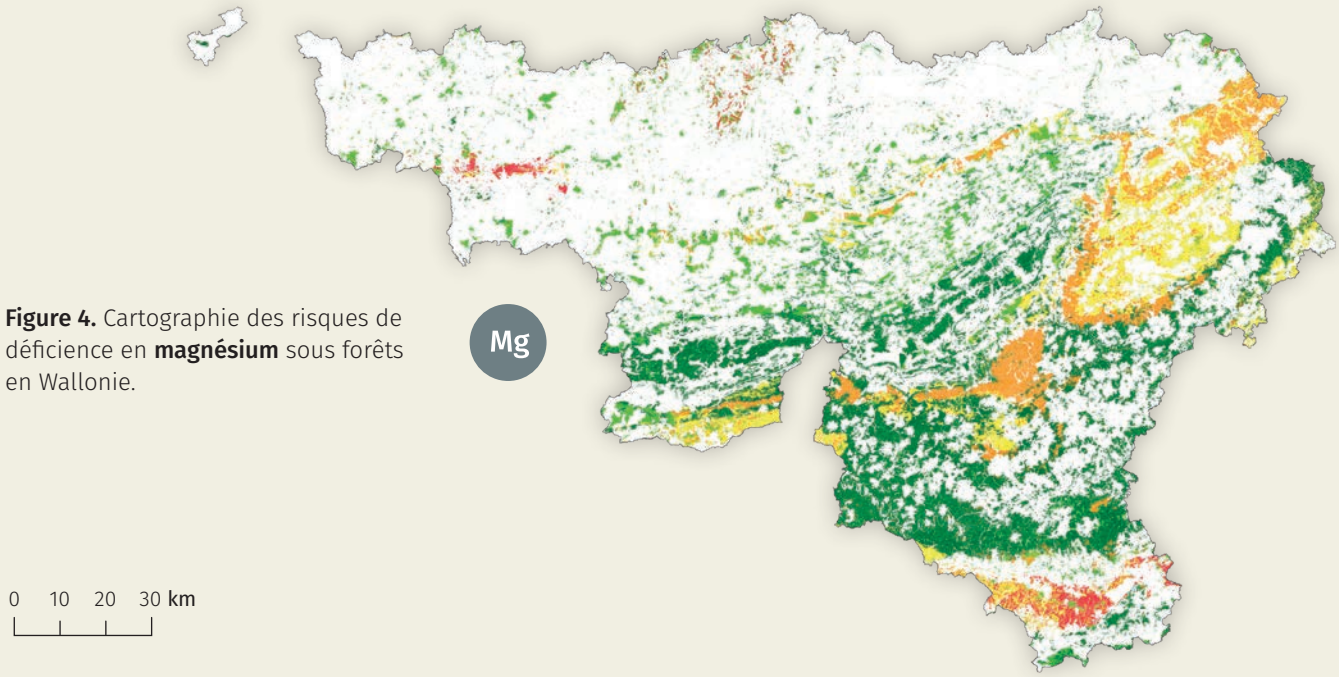

Figure 4. Cartographie des risques de déficience en **magnésium** sous forêts en Wallonie.

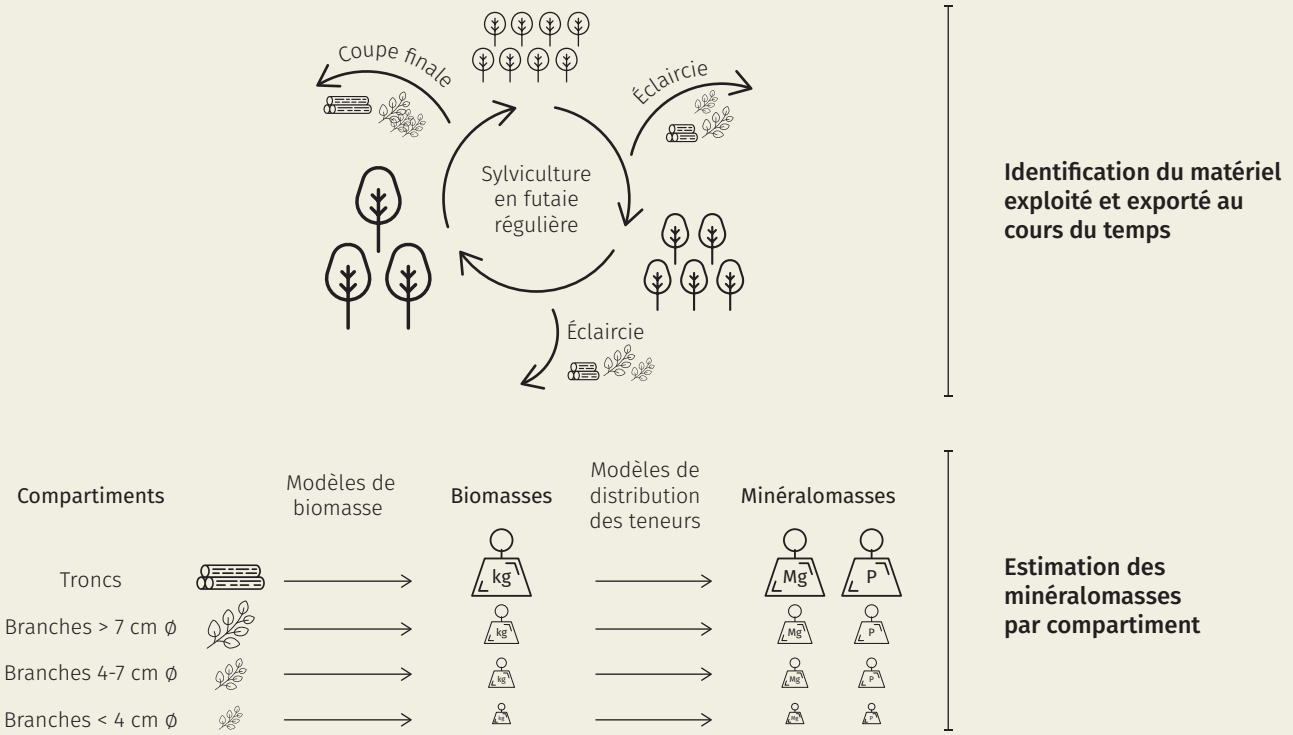

Figure 5. Schéma simplifié de la méthode d'estimation des quantités d'éléments minéraux exportées lors d'un cycle sylvicole en futaie régulière feuillue.

se veut non spécifique et n'est donc pas dépendante des exigences propres à chaque essence forestière.

Quantification des exportations minérales au cours du cycle sylvicole

La récolte de troncs et de branches lors des interventions sylvicoles soustrait une certaine quantité de nutriments à l'écosystème forestier. Une exportation trop importante risque d'entraîner un déséquilibre nutritionnel, néfaste pour la durabilité du système. C'est pourquoi il est essentiel de quantifier ces flux afin d'ajuster les prélèvements en fonction de l'essence, de son type de gestion et du potentiel du sol. Dans cette optique, connaître la composition minérale des différents compartiments de l'arbre est impératif. Ces quantités d'éléments minéraux, dénommées minéralomasses, sont variables d'une essence et d'un compartiment de l'arbre à l'autre. Leur détermination nécessite l'estimation des biomasses pour chaque compartiment d'intérêt et la connaissance des teneurs en éléments minéraux associées. Le produit de ces deux composantes détermine les minéralomasses. L'estimation des exportations minérales implique donc l'analyse des itinéraires sylvicoles, afin d'identifier le matériel exploité et exporté au cours du temps, ainsi que la définition de compartiments de l'arbre, qui permet de simuler des scénarios de récolte (figure 5). Dans la présente étude, nous nous sommes focalisés sur les peuplements feuillus dominés par le hêtre et les chênes indigènes, ainsi que sur les futaies régulières d'épicéa, de douglas et de pin sylvestre. En 2017, ces peuplements constituaient plus de 65 % des forêts productives en Wallonie selon l'IPRFW.

Pour les feuillus, six filières sylvicoles ont été considérées : la futaie régulière de chêne, les futaies régulière et irrégulière de hêtre et trois filières de conversion de taillis sous futaie vers respectivement la futaie régulière de hêtre ou de chêne ou la futaie irrégulière de hêtres. Pour les résineux, seules les futaies régulières, très largement majoritaires en Wallonie, ont été analysées. De manière à évaluer les prélèvements minéraux en fonction de l'intensité d'exportation des produits ligneux, divers compartiments ont été individualisés. Ils diffèrent légèrement en fonction du type de peuplement, feuillu ou résineux, afin de correspondre au mieux à la réalité de terrain : le tronc et les branches vivantes, toutes dimensions confondues pour les résineux et divisées en trois catégories pour les feuillus

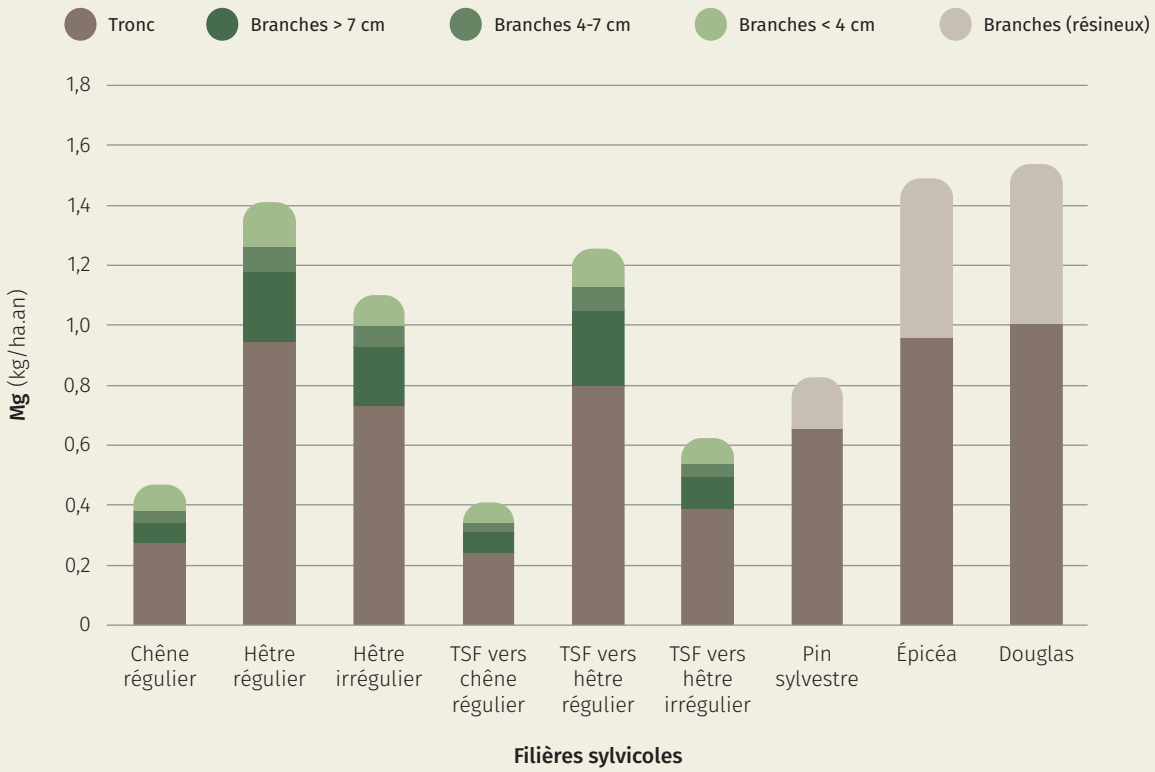

Figure 6. Comparaison des exportations potentielles annuelles en magnésium associées aux filières sylvicoles.

(diamètre inférieur à 4 cm, diamètre compris entre 4 et 7 cm et diamètre supérieur à 7 cm).

La méthodologie suivie pour la quantification des prélèvements se distingue également entre feuillus et résineux. Une analyse fine des données de l'IPRFW a été effectuée pour déterminer le matériel prélevé lors des interventions en chênaies et hêtraies. Pour les résineux, les mêmes informations sont estimées à partir de tables de production existantes, sélectionnées en considérant la classe de fertilité moyenne en Wallonie et la proximité aux itinéraires sylvicoles[3, 7, 9]. La quantité de bois exploitée est ensuite convertie en biomasse puis en minéralomasse à l'aide de modèles pour les peuplements feuillus (figure 5). Ceux-ci ont été calibrés à partir de données belges et françaises couvrant une large gamme de dimensions dendrométriques et d'âges, ainsi que de stations[4, 5, 11]. Pour les résineux, les modèles de biomasse et les concentrations moyennes en éléments par compartiment sont issus d'une synthèse de la littérature.

Les résultats obtenus montrent des variations importantes des minéralomasses exploitées d'un élément à un autre et d'une filière sylvicole à l'autre. En considérant le cas du magnésium et la récolte des troncs et des branches de toutes dimensions, une chênaie régulière est exportatrice de l'ordre de 0,5 kg/ha/an. Pour une futaie régulière de douglas ou d'épicéas ce chiffre monte à 1,5 kg/ha/an, soit 3 fois plus (figure 6). Ces grandes disparités s'expliquent par des différences de productivité mais également par des concentrations en magnésium contrastées dans le bois de ces essences : le douglas est plus productif que l'épicéa lui-même, plus productif que le chêne mais le tronc de l'épicéa est plus concentré en magnésium que celui du douglas. Les organes de petite dimension se révèlent être les plus concentrés en éléments minéraux. Aiguilles exclues, les branches du douglas contiennent ainsi près d'un tiers du magnésium de l'arbre pour une biomasse correspondante de moins de 10 % en moyenne. Par unité de biomasse, l'exportation de ces éléments est ainsi nettement plus impactante pour le maintien de la fertilité de l'écosystème par rapport à celle des troncs.

Outil d'aide à la décision : adapter les exportations minérales en fonction du peuplement, du type de gestion et des caractéristiques du sol

L'outil développé vise à adapter les prélèvements en forêt pour que la récolte de bois n'affecte pas la fertilité chimique du sol. Même si les teneurs totales en éléments minéraux se sont avérées être un bon indicateur de la fertilité chimique du sol, nous ne pouvions pas comparer quantitativement les expor-

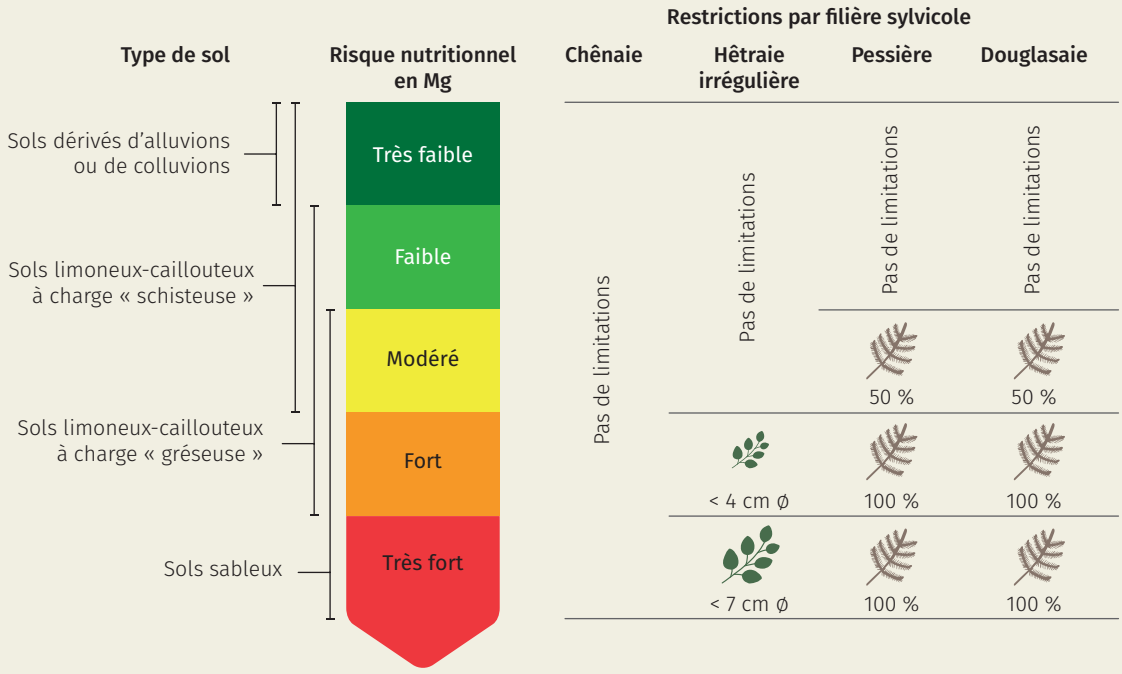

Figure 7. Schéma simplifié montrant le principe de l'outil d'aide à la décision pour quelques filières sylvicoles. Dans cette illustration, les types de sols regroupent plusieurs classes du tableau 1, ce qui explique l'amplitude de risque rencontrée pour certains types de sol.

tations estimées précédemment avec les réserves du sol, ni nous appuyer sur des valeurs seuils issues de la littérature (inexistantes) pour construire l'outil ; les exportations sont en effet très faibles comparativement aux stocks totaux.

Nous sommes donc plutôt partis du constat que dans les sols où la disponibilité en magnésium et en phosphore est réduite, le recyclage de la matière organique constitue le flux prépondérant pour le maintien de la fertilité du sol. Afin de privilégier ce recyclage, il est nécessaire de réduire en conséquence les exportations. Les propositions de gestion sont ainsi formulées suivant ces principes : un risque nutritionnel très faible ne nécessite pas de restriction particulière alors qu'un risque très élevé doit faire l'objet des restrictions les plus fortes tout en permettant l'exportation des troncs. Entre ces deux extrêmes les restrictions sont modulées et adaptées aux filières sylvicoles. Dans un premier temps, elles sont établies pour le magnésium et le phosphore séparément puis combinées par type de sol en conservant les plus sévères.

Globalement, trois niveaux de recommandations de gestion sont formulés. Pour les filières feuillues, ils correspondent à : « pas de limitation » ; « branches de diamètre inférieur à 4 cm non exportées » ; « branches de diamètre inférieur à 7 cm non exportées ». Pour les filières résineuses, les niveaux sont : « pas de limitation » ; « 50 % des branches non exportées » ; « branches non exportées ». Ces conseils sont associés à un niveau de risque nutritionnel et à un itinéraire sylvicole (figure 7). Par exemple, les chênaies ne font l'objet d'aucune recommandation particulière alors que nous conseillons de ne pas exporter les branches en futaie régulière de douglas dès un risque nutritionnel modéré. Concrètement, la démarche de l'utilisateur consiste donc d'abord à déterminer la classe de sol associée à sa parcelle sur base de la cartographie, et à se reporter ensuite à la grille qui précise les niveaux de risques en P et en Mg correspondants, et les restrictions éventuelles à appliquer selon la filière sylvicole considérée.

Conclusion

En raison du caractère acide et pauvre d'une grande majorité de sols forestiers en Wallonie, il est important que le gestionnaire puisse s'appuyer sur un outil permettant d'estimer les risques nutritionnels à l'échelle de la parcelle et de moduler les choix sylvicoles en conséquence.

C'est dans ce cadre, qu'une approche a été développée pour l'identification des zones à risque nutritionnel en Wallonie. Celle-ci se focalise sur le magnésium et le phosphore, deux éléments identifiés comme étant les plus à risque dans le contexte régional. En raison de leur relation avec les teneurs foliaires, les teneurs

POINTS-CLEFS

- Le magnésium et le phosphore sont, *a priori*, les éléments les plus limitants pour le développement des arbres dans les sols forestiers de Wallonie.
- Dans le contexte régional, la disponibilité des éléments nutritifs est bien corrélée à leur teneur totale dans le sol.
- Les risques nutritionnels sont définis de manière relative entre tous les sols forestiers de Wallonie sur base d'analyses de surface mais prennent en compte la présence potentielle d'horizons plus riches en profondeur.
- Les exportations minérales sont très variables entre filières sylvicoles et dépendent de la productivité et des concentrations dans les différents compartiments de l'arbre.
- Adapter les récoltes au type de sol, au peuplement et à son type de gestion participe au maintien de la fertilité du sol à long terme.

totales en ces deux éléments dans la couche de sol 0-20 cm ont été considérées comme un indicateur pertinent de la nutrition. Sur cette base, nous avons établi une typologie des sols forestiers de Wallonie en veillant, dans le même temps, à ce qu'elle puisse être potentiellement utile pour d'autres applications (phyto-sociologie, productivité…). À ces classes de sol, sont associés des niveaux de risque, qui mis en relation avec les exportations potentielles liées à différentes filières sylvicoles feuillues ou résineuses (hêtres et chênes indigènes ou épicéa, douglas et pin sylvestre), permettent la formulation de conseils adaptés pour la gestion des exploitations.

Les outils proposés se veulent très accessibles pour les gestionnaires forestiers. Leur utilisation ne nécessite aucun diagnostic de terrain, hormis pour des vérifications éventuelles de la pédologie d'une station. Les types de sols ainsi que les niveaux de risque nutritionnel sont cartographiés à l'échelle des forêts de Wallonie et un tableau associé permet de faire le lien facilement avec les recommandations proposées selon la filière. ■

Bibliographie

1 **André** F, **Werndörfer** H., **Hounzandji** I. (2019). Un outil pour estimer les exportations d'éléments nutritifs lors de la récolte du bois. *Forêt.Nature*, hors-série n° 1 « La science au service de la forêt de demain », p. 18-19. W

2 **Colinet** G., **Weissen** F., **Bock** L. (2016). *Suivi pédologique de l'inventaire permanent des ressources ligneuses. Bilan des analyses à la fin de la campagne T14*. Rapport de convention RW-GxABT, 24 p.

3 **Dagnelie** P., **Palm** R., **Rondeux** J., **Thill** A. (1988). *Tables de production relatives à l'épicéa commun* (Picea abies *KARST.)*. Presses Agronomiques de Gembloux, 123 p.

4 **Genet** A., **Wernsdörfer** H., **Jonard** M., **Pretzsch** H., **Rauch** M., **Ponette** Q., **Nys** C., **Legout** A., **Ranger** J., **Vallet** P., **Saint-André** L. (2011). Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. *Forest Ecology and Management* 261(7) : 1188-1202.

5 **Hounzandji** A.P.I., **Jonard** M., **Nys** C., **Saint-André** L., **Ponette** Q. (2015). Improving the robustness of biomass functions: from empirical to functional approaches. *Annals of Forest Science* 72 : 795-810. W

6 **Malmsheimer** R.W., **Heffernan** P., **Brink** S., **Crandall** D., **Deneke** F., **Galik** C.S., **Gee** E., **Helms** J.A., **McClure** N., **Mortimer** N., **Ruddell** S., **Smith** M., **Stewart** J. (2008). Forest management solutions for mitigating climate change in the United States. *Journal of Forestry* 106 : 115-171. W

7 **Perin** J., **Hébert** J., **Lejeune** P., **Claessens** H. (2016). De nouvelles normes sylvicoles pour les futaies pures équiennes d'épicéa et de douglas en appui à la gestion de la forêt publique en Wallonie. *Forêt.Nature* 139 : 57-67. W

8 **Ponette** Q., **Bispo** A., **Brêthes** A., **Dupouey** J.-L., **Feix** I., **Gégout** J.-C., **Jabiol** B., **Pousse** N., **Ranger** J. (2014). Indicateurs de fertilité des sols forestiers tempérés : enjeux, approches et perspectives. *Revue Forestière Française* 66(4) : 501-515.

9 **Schober** R. (1975). *Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung*. Sauerländer, 154 p.

10 **Thiffault** E., **Paré** D., **Brais** S., **Titus** B.D. (2010). Intensive biomass removals and site productivity in Canada: A review of relevant issues. *The Forestry Chronicle*, 86 : 36-42. W

11 **Wernsdörfer** H., **Jonard** M., **Genet** A., **Legout** A., **Nys** C., **Saint-André** L., **Ponette** Q. (2014). Modelling of nutrient concentrations in roundwood based on diameter and tissue proportion: Evidence for an additional site-age effect in the case of *Fagus sylvatica*. *Forest Ecology and Management* 330 : 192-204.

Crédit photo. Adobe Stock (p. 49), F. Joussemet (p. 52).

François Joussemet
Hugues Titeux
Quentin Ponette
francois.joussemet@uclouvain.be

Earth and Life Institute, UCLouvain
uclouvain.be/eli