



Convention AFN-UCL

Estimation des risques nutritionnels liés à l'exportation accrue de biomasse en forêt grand-ducale

Rapport final

Responsable scientifique : Q. Ponette

Réalisation : I. Caignet

Décembre 2010

Table des matières

1. Introduction	2
1.1. Contexte et objectif de l'étude	2
1.2. Définition	3
2. Sensibilité des sols à l'exportation accrue de biomasse	5
2.1. Introduction à l'approche « fertilité du sol »	5
2.2. Aperçu synthétique des données disponibles	5
2.3. Diagnostic de fertilité	8
2.3.1. pH	8
2.3.2. Développement de profil	10
2.3.3. Texture	11
2.3.4. Roche-mère	11
2.3.5. Conclusion de la partie sol	19
3. Estimation des minéralomasses exportées	21
3.1. Estimation des concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments	21
3.2. Estimation de la biomasse des branches	35
3.2.1. Facteurs d'expansion de la biomasse (BEFs)	36
3.2.2. Equations de biomasse	39
3.2.3. Limites des deux méthodes indirectes d'estimation de la biomasse des branches	46
3.2.4. Cas particulier des taillis	48
3.3. Minéralomasses exportées pour différents scénarios	49
3.3.1. Minéralomasses « bois fort »	49
3.3.2. Minéralomasses additionnelles	54
3.3.3. Limites des estimations	59
4. Exportation des rémanents : au-delà des seuls aspects quantitatifs	61
4.1.1. Réflexions systémiques	61
4.1.2. Conseils techniques	63
4.1.3. Autres éléments de décision	64
5. Conclusion et perspectives	66
6. Références	68
7. Index des Tableaux	83
8. Index des Figures	85

1. Introduction

1.1. Contexte et objectif de l'étude

Si l'exploitation des bois de faible dimension à des fins énergétiques est de brûlante actualité, comme le signale à juste titre l'Office National des Forêts français (Nicolas *et al.*, 2007), elle n'est cependant pas neuve (Pardé, 1977 ; Ranger et Bonneau, 1984) : il suffit, pour s'en convaincre, de se rappeler le temps des forges, hauts fourneaux ou des décennies d'utilisation de bois dans le chauffage domestique. Cette exploitation revêt néanmoins une dimension tout à fait inédite dans le contexte actuel de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère et de la nécessaire diversification des sources d'énergie. En effet, compte tenu d'un bilan de carbone considéré comme neutre (AFOCEL, 2004 ; Valbiom, 2004) – la quantité émise lors de la combustion étant considérée comme équivalente à la quantité fixée au cours de la croissance – l'exploitation forestière intéresse. On constate dès lors une valorisation énergétique accrue de bois jusqu'alors négligés par l'exploitation forestière traditionnelle et ce, dans des proportions inégalées dans le passé (IFN, 2005 et 2010; Ponette *et al.*, 2007 ; Vallet *et al.*, 2007 ; Landmann *et al.*, 2009).

L'inquiétude de certains scientifiques par rapport à l'impact d'une exploitation forestière intensifiée s'égrène depuis de nombreuses années, comme en témoigne une série de documents, principalement d'origine anglo-saxonne ou nordique (e.g. Krumlik, 1974 ; Staebler, 1979 ; Moffat, 1991 ; Stokes, 1992 ; Zabowski *et al.*, 1992 ; Stevens *et al.*, 1995 ; Olsson *et al.*, 1996, Grigal and Bates, 1997 ; Knoepp and Swank 1997 ; Nisbet *et al.*, 1997 ; Grigal, 2000 ; Hesselinck, 2010 ; Thiffault *et al.*, 2010). A long terme, la fertilité chimique des écosystèmes forestiers risque d'être sérieusement affectée (Dyck and Bow, 1992 ; Burger 2002 ; Blanco *et al.*, 2005 ; Cacot *et al.*, 2006 ; Nicolas *et al.*, 2007 ; Raulund-Rasmussen *et al.*, 2008 ; Ranger *et al.*, 2009). D'autant plus que les petites branches, brindilles, feuilles et écorce ont une teneur en éléments nutritifs plus élevée que le tronc (Cacot *et al.*, 2006). Certains articles attestent déjà de l'impact de leur exportation sur la productivité ultérieure (Walmsley *et al.*, 2009). Il est dès lors indispensable de préciser les taux de récolte admissibles pour pouvoir les moduler en fonction de la potentialité des stations. Le service forestier canadien a d'ailleurs lancé un appel pour impliquer un maximum d'intervenants dans l'élaboration d'indicateurs à cet effet (Paré, 2008).

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent projet. Plus précisément, ce dernier vise à déterminer le niveau d'exploitation des ressources ligneuses compatible avec le maintien à long terme de la fertilité des écosystèmes forestiers, pour les essences principales (hêtre, chêne, épicéa et douglas) et les différents types de sols du Grand Duché de Luxembourg.

Cet objectif se décline via :

- L'élaboration de plusieurs classes de sols différant sous l'angle de leur « richesse chimique » ;
- le diagnostic de susceptibilité à l'exportation de rémanents sensu stricto sur base des critères communément employés en la matière (voir revue bibliographique des méthodologies d'évaluation de la sensibilité des sites à l'exportation des rémanents à l'Annexe I) et en tenant compte de l'approche « fertilité » préalablement établie ;
- l'influence des principales essences retrouvées dans les forêts grand-ducales sur les minéralomasses potentiellement exportables ;
- l'élaboration de recommandations appropriées en fonction des résultats des approches « sol » et « minéralomasse » et des conseils émis par d'autres organismes compétents.

La démarche développée ci-dessous tient compte de différentes contraintes initiales :

- utilisation des données stationnelles et/ou physico-chimiques disponibles, avec les limites méthodologiques que cela peut comporter ;
- prise en compte des outils typologiques préexistants (ADN, 1999 ; 2002 ; 2009) autant que faire se peut ;
- souci d'uniformité de l'étude à l'échelle du Grand-Duché de Luxembourg.

1.2. Définition

Rémanent vient du latin « *remanere* », signifiant « qui subsiste, demeure ».

Dans le contexte forestier, la définition est loin de faire l'objet d'un consensus. Les rémanents désignent, suivant les sources :

- les résidus végétaux d'arbres et arbustes abandonnés sur le parterre d'une coupe après une exploitation, une opération sylvicole ou des travaux (République Française, arrêté n° 2004.01.907 du 13 avril 2004) ;
- l'ensemble des parties de l'arbre restant sur l'exploitation après des opérations de coupe ou des opérations sylvicoles (houppier, souche, branches, feuillage et racines). Dans le cadre de l'évaluation des potentiels de biomasse exploitable, le terme rémanent est limité aux houppiers et branches (EEA, 2007) ;
- les bois qui, lors de l'exploitation forestière, n'ont pas d'utilisation dans l'industrie et sont généralement laissés en forêt. Ils sont constitués essentiellement des cimes des arbres et des branches de diamètre inférieur à 8 cm (Schenkel *et al.*, 2005) ;
- l'ensemble du bois non exploité à des usages dits nobles/de haute valeur ajoutée ;
- les produits compris entre une découpe bois fort (diamètre de 7 cm) et une découpe fin bout (ONF) ;
- l'écorce et des produits d'un diamètre inférieur ou égal à 7 cm (« Cahier des Clauses Générales des ventes de coupes en bloc et sur pied » de l'ONF, article 31.1) ;
- le menu bois et branches (volume de la tige au delà de la découpe bois fort (7 cm) et volume des branches) ainsi que les petit bois (volume de la tige comprise entre la découpe commerciale -dont les diamètres de référence sont de 7, 14 et 20 cm pour les taillis, les résineux et les feuillus respectivement- et la découpe bois fort) (IFN-SOLAGRO) ;
- les branches et feuillages restant sur coupe après abattage et façonnage (ADEME).

On trouve également, des définitions spartiates telles que « rebus d'exploitation », « branchages et petits bois », « Branches ou bois mort qui restent sur le sol après une exploitation », etc.

En anglais, suivant les pays et les auteurs, on parlera de « *biomass* », « *woody biomass* », « *forest residues* », « *slash* » ou encore « *brash* ».

Une des difficultés sera donc de vérifier la définition à laquelle se réfère chaque auteur des différents documents consultés avant toute comparaison d'études.

Dans le cadre de ce travail, les rémanents seront définis comme l'ensemble du bois hors bois fort.

2. Sensibilité des sols à l'exportation accrue de biomasse

2.1. Introduction à l'approche « fertilité du sol »

La fertilité d'un sol fait référence aux propriétés physiques et chimiques influant sur la production (Larrieu et Jabiol, 2001). Cette notion est relative puisqu'elle dépend de l'essence et des conditions éco-climatiques d'une région donnée (Lévy, 1988).

Sur le plan chimique, la fertilité s'envisage en termes de disponibilité des éléments dans le sol pour la nutrition. Ces éléments sont présents en quantité finie (stock), susceptible de varier en fonction des flux entrant et sortant de l'écosystème forestier (Augusto *et al.* 2000.). La richesse chimique d'un sol donné est maintenue lorsque les entrées (apports atmosphériques et /ou altération des minéraux) et sorties (exportation d'éléments lors des récoltes et pertes par drainage) du cycle biogéochimique des éléments sont à l'équilibre.

L'évaluation de ces différents termes étant relativement lourde et imprécise (Turpault *et al.*, 1999), ces différents flux ne sont pas considérés dans ce travail. Ceci constitue une limite méthodologique puisque, comme le signale Ranger et Bonneau (1984), raisonner l'évolution de la fertilité des sols en ne prenant en considération que les éléments stockés dans le bois est insuffisant. Toutefois, notre réflexion s'envisage davantage en termes d'exportation accrue par rapport à un système actuel, présumé proche de l'équilibre, ce qui limite l'impact de cette omission.

2.2. Aperçu synthétique des données disponibles

Les données mises à disposition et les périodes d'acquisition de celles-ci sont présentées au Tableau 1. Elles proviennent soit de travaux d'un bureau d'études Ingénieurs-Conseils (EFOR-ERSA) ayant travaillé au développement d'une typologie des stations forestières du Gutland (ADN, 2009), soit d'une administration grand-ducale :

- Administration des Eaux et Forêts pour les données de l'Inventaire Forestier national permanent du Grand-Duché de Luxembourg (IFL) ;
- Administration des services techniques de l'agriculture pour les données relatives à la cartographie des sols (ASTA) ;
- Administration de l'Environnement enfin pour les données récoltées dans le cadre du suivi des pollutions en métaux lourds dans les sols (BodenMonitoring).

En raison de leur finalité propre différente du présent cadre d'étude, les données ont d'abord été ré-agencées. Certaines ont, par ailleurs, également dû faire l'objet d'une vérification (données manquantes, erreurs d'encodage, doublons, valeurs aberrantes, etc.), ce qui réduit le nombre effectif rentrant en ligne de compte pour les traitements ultérieurs.

Il est également à noter que l'utilisation de méthodes d'analyses différentes rend les comparaisons entre les sources difficiles voire hasardeuses. Le traitement des données a donc été effectué en parallèle avant d'évaluer ce qui pouvait être éventuellement mis en commun pour retirer un maximum d'information de chacune des sources.

Enfin, certaines méthodes sont issues du domaine agronomique et n'ont pas de véritable signification dans le contexte forestier. Ceci est assez limitant étant donné que la fertilité des sols

forestiers est appréciée par référence à des teneurs seuils exprimant un risque de carence ou de toxicité (Genot *et al.*, 2007). Il est donc apparu opportun d'anticiper et/ou de compléter l'analyse des données grand-ducales, par celle des données acquises lors du suivi pédologique réalisé dans le cadre de l'Inventaire Permanent des ressources ligneuses en Région Wallonne (Colinet *et al.*, 2008) pour les deux régions forestières considérées comme semblables, à savoir, l'Ardenne (supposée comparable à l'Oesling) et la Région jurassique (supposée équivalente à une partie du Gutland). L'échantillon transmis comprend 321 points, avec une large majorité provenant de la première. Celui-ci a alors été réduit à 236 points sur base de la carte géologique schématique de l'Ardenne et du Luxembourg (Waterlot *et al.*, 1973) et de la proximité géographique avec le Grand-Duché de Luxembourg. Les informations stationnelles fournies sont identiques à celles de l'IFL (voir

Tableau 1). Les analyses physico-chimiques disponibles sont, quant à elles, plus diversifiées : pH_{eau} , pH_{KCl} , acidité et aluminium extractibles au KCl, Ca, Mg, K, P, Fe, Mn et Zn « biodisponibles » (extraction au NH_4Cl 1%), CEC (Metson), C (Springler-Klee modifiée) et N (Kjeldhal), teneurs pseudo-totales en éléments (extraction à l'eau régale), P total ($HClO_4$), minéral (H_2SO_4), organique (par différence) et disponible (extrait à l'acide citrique).

Tableau 1. Aperçu général des données mises à disposition dans le cadre de l'étude par les différentes sources.

	IFL	ASTA	Typologie Gutland (EFOR/ERSA)	Boden Monitoring
Période de récolte des données	1998-2001	Années 1660-1970	1992 à 2009	2002-2008
Echelle	nationale	nationale	Domaine écologique du Gutland	nationale
Unité(s) d'échantillonnage	Point matérialisé 2 profondeurs d'échantillonnage fixées (0-20, 20-40 cm)	Profil Échantillonnage par horizons	Profil et points 2 profondeurs d'échantillonnage variables pour les profils	Profil Échantillonnage par horizons
Nombre max. d'unités d'échantillonnage*	1663 points	309 profils	106 profils + 3286 points de relevés	66 profils
Informations stationnelles				
	Oui (domaine écologique, topographie générale, type d'humus, substrat, nature et abondance de la charge, classes texturales et de drainage, développement et profondeur de profil ...)	Partielles (occupation du sol, domaine écologique)	Oui (topographie générale, type d'humus, substrat, nature et abondance de la charge, classes texturales et de drainage, développement et profondeur de profil ...)	Partielles (développement de profil, type d'humus, essences forestières)
Analyses physico-chimiques (extractif entre parenthèses)				
<i>(presque) toujours disponibles</i>	pH _{CaCl2} P ₂ O ₅ « assimilable » (CAL) ** K ₂ O « assimilable » (CAL) Mg, Na « biodisponible » (CaCl ₂)	pH _{eau} , pH _{CaCl2} , Granulométrie en 3 classes + % graviers	pH _{eau} , pH _{KCl} Ca, Mg, K, P, Mn « biodisponibles » (NH ₄ Cl)	pH _{CaCl2} P ₂ O ₅ « assimilable » (CAL) K ₂ O « assimilable » (CAL) Mg, Na « biodisponible » (CaCl ₂)
<i>Souvent disponibles</i>		pH _{KCl} C, N P ₂ O ₅ « assimilable » (CAL) K ₂ O « assimilable » (CAL) MgO « assimilable » (acétate)	C, N Granulométrie en 3 classes	C, N
<i>Parfois disponibles</i>		CaCO ₃ , CEC, Fe libre		

* nombre d'unités d'échantillonnage uniquement sous occupation du sol de type forêt ou connexe (plantation, friche,...)

** CAL : extraction au Calcium-Acétate-Lactate

2.3. Diagnostic de fertilité

L'appréciation de la fertilité nécessite le recours à des indicateurs. Il s'agit d'une mesure (qualitative ou quantitative) d'un critère donné. Si l'on s'intéresse au maintien de la fertilité chimique, le diagnostic s'appuie généralement sur :

- la classification pédogénétique (types de sol), laquelle donne généralement une bonne appréciation globale de la fertilité du sol (*e.g.* dans le domaine forestier Badeau, 1995 ; Legout *et al.*, 2007) ;
- des paramètres physico-chimiques permettant d'estimer :
 - o soit le statut acido-basique (pH) et la qualité du complexe adsorbant (CEC, cations échangeables, taux de saturation, nature des constituants organiques et minéraux...) de manière à appréhender le potentiel nutritif à court terme (fertilité « actuelle ») ;
 - o soit les réserves minérales du sol (TRB ; Herbillon, 1986) et leur capacité à neutraliser l'acidité (ANC ; Van Breemen *et al.*, 1983) dans le cadre d'un maintien à long terme de la fertilité chimique des sols.

En raison de l'absence de telles informations (exception faite du pH) dans les sources disponibles à l'échelle du pays, nous nous sommes orientés vers un diagnostic indirect de la fertilité des sols. Il s'agit donc d'une déduction de celle-ci sur base d'hypothèses de travail. Celles-ci sont développées succinctement ci-dessous. Nous verrons cependant qu'un « diagnostic direct partiel » (quantification de la richesse chimique pour certains paramètres) peut être proposé après un premier agencement des données grâce aux données d'EFOR/ERSA et de l'Inventaire Permanent de la Région wallonne.

2.3.1. pH

Le pH est un indicateur des conditions écologiques et physico-chimiques qui président aux principaux processus en matière de nutrition végétale (Genot *et al.*, 2007). Il est d'ailleurs souvent utilisé pour estimer le niveau trophique des sols (de Tillesse et Devillez, 1995 ; Härdtle *et al.*, 2004). Bien documentée en raison de sa longue utilisation, sa mesure est, par ailleurs, à la fois utile, peu coûteuse et facile à réaliser (Baize, 2000).

Cet indicateur n'est cependant pas sans inconvénients :

- fortes variations spatio-temporelles (Riha *et al.*, 1986 ; de Tillesse et Devillez, 1995) ;
- relation avec la production moins évidente dans le domaine forestier qu'en agriculture (Moffat *et al.*, 1997 ; Moffat, 2003) ;
- faible corrélation entre le pH et d'autres paramètres nutritionnels pour des pH_{eau} inférieurs à 4 (Härdtle *et al.*, 2004) ;
- acidification possible sans modification du pH en raison du pouvoir tampon (Van Breemen *et al.*, 1983).

La mesure disponible dans l'échantillonnage de l'IFL est le pH_{CaCl_2} . Si elle a l'avantage d'être un bon reflet de la solution du sol (laquelle conditionne la nutrition végétale), elle est plus difficile à interpréter (Badeau, 1998). L'absence de références en termes de valeurs seuils nécessite une conversion pH_{CaCl_2} - pH_{eau} . Ahern *et al.* (1995) présentent une série de relations à cet égard. Le Joint Research Centre (JRC) de la Commission Européenne propose également une fonction linéaire (Equation 1), générée à partir d'un grand nombre de données de pH de surface au niveau européen (Reuter *et al.*, 2008). Il a été jugé préférable de se baser sur la relation obtenue par cette dernière source en raison de sa plus grande proximité géographique.

$$\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0.9761 * \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - 0.427 \quad (R^2 = 0.92, n = 1997) \quad (\text{Equation 1})$$

Par ailleurs, deux autres relations ont pu être obtenues pour les sols du Grand-Duché de Luxembourg :

- la première l'a été via les données des horizons de surface des profils de l'ASTA (Equation 2), étant donné les mesures conjointes des deux types de pH (Figure 4 à l'Annexe II) ;

$$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.9076 * \text{pH}_{\text{CaCl}_2} + 0.9016 \quad (R^2 = 0.91, n = 469) \quad (\text{Equation 2})$$

- la seconde a pu être établie suite à l'acquisition des premiers résultats de mesure du pH_{eau} réalisée sur les échantillons de l'IFL en juillet-août par le service pédologique (Equations et graphes voir Figures 5 et 6 à Annexe II). Toutefois, comme les classifications des sols étaient déjà en cours de réalisation et que ces dernières relations sont différentes des précédentes, elles n'ont pas été considérées lors du calcul des valeurs seuils.

Les distributions de fréquences du pH (données IFL) aux deux profondeurs d'échantillonnage montrent une forte asymétrie gauche (pH acides). 80 et 76 % des sites présentent un $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ inférieur à 4,6 (équivalent $\text{pH}_{\text{eau}}=5$) entre 0-20 et 20-40 cm respectivement (voir Figures 7 et 8 à l'Annexe II).

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur l'échantillon IFL aux deux profondeurs montre que 55 % de la variance s'explique par le pH et les teneurs en K, Mg et Na (composante 1). Il en a été déduit que seule une de ces grandeurs était suffisante pour établir un diagnostic, le pH en l'occurrence (Figure 9 à l'Annexe II).

Les unités d'échantillonnage ont alors été regroupées en quatre groupes, suivant les valeurs seuils fournies par la clé de détermination du niveau trophique (groupe a : $\text{pH} < 3.8$; groupe b : $3.8 \leq \text{pH} < 4.2$; groupe c : $4.2 \leq \text{pH} < 5$; groupe d : ≥ 5) afin de comparer les résultats d'analyses des autres paramètres physico-chimiques mesurés (Figure 10 à l'Annexe II).

Seul le groupe des placettes IFL de $\text{pH}_{\text{eau}} \geq 5$ ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} \geq 4.6$) présentent des teneurs en P_2O_5 , K_2O , Mg et Na significativement différentes des autres groupes. D'autre part, l'ADEME (2009) signale la nécessité de définir des classes de pH plus réduites entre 4,5 et 5,5 en raison de la présence d'un gradient de fertilité dans cette catégorie. Peut-être devons-nous envisager une subdivision du groupe d en un ensemble où $5 \leq \text{pH}_{\text{eau}} < 5.5$ et une autre où $\text{pH}_{\text{eau}} \geq 5.5$.

D'autres études proposent des valeurs de pH pour classer les sols :

- Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) suggèrent de prendre la valeur de $\text{pH}=4.8$ comme limite entre les sols sensibles ou résistants ;
- Blaser *et al.* (2008) établissent cinq classes d'acidité définies correspondant à un pouvoir tampon particulier. Cette étude est intéressante parce qu'elle se base sur des valeurs de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 0.01M et parce qu'elle met en relation la classe de fertilité avec le taux de saturation en base du complexe. Par contre, elle est établie pour des sols suisses et rien ne permet de prédire sa validité au Grand-Duché de Luxembourg, en raison de matériaux parentaux différents (Tertiaire et Quaternaire en grande majorité).

Il semble donc que, si le pH est effectivement un indicateur incontournable, il serait néanmoins judicieux de l'employer en conjonction avec un/d'autres paramètres.

Remarque : Mg et P₂O₅ comme indicateur ? Ces deux paramètres ont également été testés en raison de leur intérêt potentiel. Ils ont néanmoins été écartés. Les motifs de ces choix sont repris dans le tableau ci-après (Tableau 2).

Tableau 2. Arguments concernant l'utilisation de Mg et P₂O₅ comme indicateur du statut nutritif.

	Avantage(s)/raison(s) du choix comme indicateur potentiel	Inconvénient(s)/Motif(s) d'écartement
Mg	<ol style="list-style-type: none"> 1) Généralement un bon indicateur de l'état nutritionnel (Lambert <i>et al.</i>, 1990) ; 2) Nombreuses observations de carences en Mg dans les forêts européennes (Armbruster <i>et al.</i>, 2002) et en particulier dans les Ardennes belges (Colinet <i>et al.</i>, 2007) 	<ol style="list-style-type: none"> 1) La méthode d'analyse n'est pas celle considérée par Lambert <i>et al.</i> (1990), il faut déterminer d'autres seuils et s'assurer de leur pertinence ; 2) Quels que soient les groupes (pH, géologie, substrat), les moyennes sont différentes mais il existe une forte variabilité au sein de ceux-ci.
P ₂ O ₅	<ol style="list-style-type: none"> 1) P₂O₅ explique 20 % de la variabilité suivant l'analyse en composante principale réalisée sur l'échantillonnage IFL ; 2) Le phosphore peut être un élément limitant, en particulier sur certains substrats (Prietzl et Stetter, 2010) ; 3) Le cycle du P dans les écosystèmes forestiers est quasi fermé (Croisé et Jonard, 2008). Un appauvrissement en P pourrait être mis en relation directe avec une exportation excessive. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 2/3 de l'échantillonnage IFL possède une teneur en P₂O₅ ≤ 2 mg*100g⁻¹ (0.9 mg*100g⁻¹ P). La précision de la mesure étant au mg*100g⁻¹, il s'avère difficile d'établir des groupes plus précis ; 2) La méthode CAL a une portée agronomique et les valeurs seuils sont établies sur cette base. Elles n'ont pas que peu d'utilité pour les écosystèmes forestiers (systématiquement pauvres en P) ; 3) Les teneurs foliaires en P sont un meilleur indicateur nutritionnel que celles du sol en raison de la diversité des formes de P et des méthodes d'extraction.

2.3.2. Développement de profil

La connaissance du développement de profil est utile à divers égards : signification pédologique, variable d'entrée de la clé de détermination du niveau trophique du guide de boisement, acquisition possible via la lecture de la carte des sols.

Le traitement de l'échantillonnage transmis par l'IFL a mis en exergue la présence d'une large majorité de sols (86%) de développement de profil « a », associé aux « bruns décarbonatés » (IFL, EFOR/ERSA) ou bruns lessivés (ASTA, PCNSW¹). Le développement de profil n'est donc pas un indicateur suffisant pour l'établissement de groupes de sols. Il possède néanmoins un intérêt certain s'il est considéré avec d'autres paramètres. Les sols les plus dégradés (développement de profil de type ocreux, podzolique ou en voie de podzolisation) sont d'ailleurs très majoritairement retrouvés dans les groupes de richesse chimique faible dans les différentes classifications testées et décrites plus loin.

Il nous semble important de noter que l'examen des données de l'inventaire permanent wallon met, par contre, en évidence une très large dominance de type « sols bruns » (développement de profil

¹ Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie

« b »). De même, les planches cartographiques de l'Oesling montre que les sols sont presque exclusivement de ce même type « b » avec un sigle de charge différent de « k ». Or, selon les informations transmises, c'est une effervescence au test HCl en surface qui amène à définir ce développement de profil « b ». Ceci ne nous semble pas en adéquation avec notre connaissance des sols forestiers wallons et de l'Oesling. Nous tenons donc à attirer l'attention sur l'incertitude subsistant, à notre avis, sur le diagnostic du développement de profil.

2.3.3. Texture

La texture est considérée comme un paramètre clé de la connaissance des propriétés physiques et chimiques d'un sol en raison des caractéristiques propres à chaque type de particules (minéralogie, CEC, surface spécifique) (Vanmechelen *et al.*, 1997 ; Richer de Forges *et al.*, 2008). Sur le plan chimique, Callesen et Raulund-Rasmussen (2004) ont testé l'hypothèse avec succès au Danemark, expliquant, grâce aux classes texturales, environ 80 et 40-50% de la variation totale de la disponibilité en cations et phosphore respectivement. L'expérience s'est par contre avérée nettement moins concluante lors de la généralisation au pourtour de la mer Baltique (Callesen *et al.*, 2005), suggérant que la libération des éléments nutritifs ne pouvait être prédite sur la seule base d'indicateurs simples tels que la texture, la CEC et le pH.

La relation entre pH et classe texturale a été testée lorsque les deux informations étaient disponibles (Figures 11 à 13 à l'Annexe III). Il apparaît que les classes sableuses (Z et S) sont invariablement acides tandis que les classes limoneuses et argileuses (L, E, A, U) présentent une variabilité de pH intra-classes masquant les différences inter-classes. Ceci est probablement dû non seulement aux différences d'origine géologique des unités d'échantillonnage au sein d'une classe texturale donnée (*p. ex.* argile issue de l'altération de marnes ou de roches calcaire) mais également aux stades d'altération du substrat plus ou moins avancés (*p. ex.* décalcification des marnes).

Enfin, en raison de la présence de nombreux sols caillouteux (près de 40% des placettes de l'IFL relèvent de la texture G), particulièrement dans l'Oesling, une classification des sols seulement basée sur la texture n'est pas discriminante.

2.3.4. Roche-mère

Le choix de ce paramètre pour aborder la richesse chimique des sols se fonde sur les hypothèses suivantes :

- le type de matériau parental conditionne fortement le type de sol (Bergeron *et al.*, 1982 ; Kooijman, 2010) ;
- Les propriétés chimiques des sols et les quantités d'éléments nutritifs potentiellement disponibles dépendent de la nature du matériau parental et de son altérabilité (Vanmechelen *et al.*, 1997, Leuchner *et al.*, 2006).

Le problème essentiel est de pouvoir classer les substrats². Les différentes catégories relèvent souvent de l'arbitraire et dépendent du but recherché (Dewolf, 1965). On distingue globalement deux approches : géologique et géo-pédologique.

² Terme pris ici au sens large : « ce qui sert de base ». La définition proposée par Dewolf (1965) est la suivante : matériau rocheux, meuble ou cohérent, qui supporte les formations superficielles, soit que celles-ci en dérivent directement, soit qu'elles aient été épandues à sa surface par les agents de transport.

Dans le cadre de cette étude, le substrat désigne, suivant les sources :

- élément apparaissant à moins d'un mètre de profondeur et de nature lithologique différente de celles des couches superficielles composant le sol (IFL) ;
- matériau parental à la base du développement de profil (EFOR-ERSA).

Approche géologique

Suite à la lecture des travaux d'Arendt et Wagner (1997) d'une part et du Bodenmonitoring (ADE, 2006) d'autre part, le travail a d'abord été envisagé à partir de la géologie. Les unités d'échantillonnage ont été regroupées sur base d'hypothèses d'altérabilité des roches présentes au sein des différentes formations géologiques. Quatorze ensembles ont été constitués au total (Tableau 14 à l'Annexe IV), lesquels ont alors été comparés entre eux. La comparaison multiple a permis de réduire le nombre de groupes à quatre, significativement différents en moyenne (test HSD de Tukey-Kramer, valable pour les échantillons de n différents) pour les paramètres physico-chimiques disponibles entre 0-20 cm (Tableau 3). Entre 20-40 cm, les différences restent significatives, sauf pour les deux groupes considérés comme les plus pauvres (groupes 1 et 2). Le résultat du test de Tukey-Kramer se trouve à l'Annexe IV (Tableaux 15 et 16).

Tableau 3. Groupes réalisés sur base de la géologie du Grand-Duché de Luxembourg.

Groupes	Formation(s) géologique(s)	Commentaire général	Nombre d'unités d'échantillonnage ³
1	li2	Très pauvre	325
2	Sg1, Sg2, Sg3, Sg3a, Sg3s, E1a, E1b, E2, q, E3, so	Pauvre	524
3	ko, li1, li3-4, lm,	Favorable Mg, K	204
4	mu, mm, mo, ku, km, km2s, lo1-5, dou, do	Favorable pour les différents paramètres	350

Une analyse plus approfondie de cette classification a pu mettre en évidence sa cohérence par rapport à d'autres informations disponibles : forte proportion des sols de texture Z et S et des sols dégradés (type f, g, r) dans les groupes les plus pauvres, présence des sols sur substrat ou à charge dolomitique, calcaire ou macigno dans le groupe le plus riche. Malheureusement, elle comporte également une série de défauts :

- l'analyse se base sur la carte géologique d'échelle plus petite que celle des différentes sources d'échantillons, ce qui équivaut à une perte d'information et/ou un risque d'erreur dans les zones de transition ;
- l'interaction géologie-pédologie peut être variable d'un endroit à l'autre en fonction de la profondeur d'apparition des différentes formations géologiques ;
- bien que les groupes soient significativement différents en moyenne, la plupart des unités d'échantillonnage ne peut pas être classée de manière catégorique dans l'un ou l'autre groupe, en raison de la variabilité des résultats analytiques au sein d'un même groupe (exception faite, bien entendu, des extrêmes).

Approche géo-pédologique

La seconde approche a été envisagée sur base du substrat. Deux classifications sont proposées ci-après:

³ Nombre total pour cette analyse : 1403 (échantillon IFL avec données stationnelles, analyses chimiques entre 0-20 cm et 20-20-40 cm après éliminations des points aberrants.

A. Classification « pédochimique »

La première classification a été réalisée en appliquant la même démarche que dans l'approche géologique (regroupement des unités d'échantillonnage, ici par type de substrat⁴ ; test statistique des ensemble ainsi construits). Elle comporte cinq groupes (Tableau 4), de taille très différente⁵.

Tableau 4. Classification des substrats sur base de leur richesse chimique présumée.

Groupes	Type(s) de substrats	Commentaires	Nombre d'unité d'échantillonnage ⁶
a	calcaire, dolomie, macigno et dérivés	Groupe des matériaux « riches »	36
b	marnes et altération de la marne	Groupe intermédiaire	446
c	schiste-altération du schiste-schisto-gréseux et gréseux (calcaire)	Groupe des matériaux pauvres ou appauvris	847
d	conglomérat	Considéré à part en première approche. Statistiquement proche du groupe c pour pH et Mg	13
e	Non classés	Unités d'échantillonnage présentant un code substrat ne permettant pas de les rattacher à l'un ou l'autre groupe	22

Après analyse de chacun des groupes, quelques aménagements peuvent être proposés :

- le groupe b pourrait être scindé sur base d'un pH_{eau} seuil de 5 par exemple. Si l'on se base sur les valeurs de pH des échantillons de profondeur 0-20 cm, on obtient ainsi deux groupes : b_1 : $\text{pH}_{\text{équivalentEau}} \leq 5$ (251 unités) et b_2 : $\text{pH} > 5$ (195 unités), présentant des teneurs en P_2O_5 , K_2O et Mg significativement différentes en moyenne (t-test de Student avec l'hypothèse de variance inégales)⁷ ;
- le groupe c, reprenant les substrats de fertilité faible, devrait être scindé :
 - o soit sur base du pH_{eau} seuil de 5, par cohérence par rapport au groupe b. Dans ce cas, on obtient un ensemble de 802 unités avec $\text{pH}_{\text{équivalentEau}} \leq 5$ et de 45 unités avec $\text{pH}_{\text{équivalentEau}} > 5$. Le caractère acide est clairement mis en lumière avec quelques exceptions (quelques grès calcaires peu décarbonatés) ;
 - o soit de manière à pouvoir prendre en compte ultérieurement de risques propres à l'un ou l'autre substrat :
 - bio-disponibilité d' Al^{3+} (Merino *et al.*, 2000) ou faible volume de sol prospectable dans les substrats schisteux ;
 - podzolisation ou lixiviation des éléments en solution vers les eaux souterraines dans le grès du Luxembourg (critère développement de profil à prendre en compte prioritairement dans ce cas).

⁴ La nature du substrat est un des éléments de la fiche pédologique de l'IFL (20 codes).

⁵ Les résultats des tests de comparaison multiple (test HSD de Tukey-Kramer) concernant ces différents ensembles se trouvent aux Tableaux 17 et 18 (Annexe IV).

⁶ 39 unités d'échantillonnage ne disposent pas de l'information substrat.

⁷ La même analyse mais sur base des valeurs de pH des échantillons de la profondeur 20-40 cm donne 2 groupes sensiblement différents : b_1 : 232 unités, b_2 : 214 unités, présentant des teneurs significativement différentes en moyenne pour K_2O et Mg mais pas pour P_2O_5

Une telle distinction revient, à peu de chose près à distinguer les substrats majeurs de l'Oesling (482 unités) de ceux du Gutland (365 unités).

- le groupe d n'existe pas réellement en cartographie des sols (seule existe la charge conglomératique). Compte tenu des remarques du service pédologique à ce sujet⁸ (ASTA, 2010), il peut être reclassé avec le groupe des substrats pauvres et/ou appauvris.

Cette classification comporte deux avantages majeurs :

- le grand type de substrat peut être identifié sur le terrain ou à l'aide de la carte des sols (quand elle est disponible) puisque qu'il s'agit d'une information figurant dans sa légende (préfixe) ou sur laquelle on peut émettre des hypothèses (en fonction des connaissances géologiques et l'appréciation de la texture);
- elle peut être mise en relation possible avec les deux typologies existantes puisque tant la clé de l'Oesling que celle du Gutland font intervenir le matériau comme critère dichotomique⁹, bien que certaines améliorations doivent encore être apportées.

Pour l'Oesling, il n'est pas possible, sur base des informations actuelles, de subdiviser les sols sous l'angle de la fertilité. L'étude stationnelle forestière de 1992, ayant conduit à la réalisation de la clé de détermination de l'Oesling semble cependant attester de l'existence d'une grande diversité de profils de sol (Beaufils, 1992). Faute de renseignements supplémentaires, il est difficile pour nous de déterminer si cette diversité morphologique se traduit en différences physico-chimiques significatives. D'autre part, la comparaison des paramètres physico-chimiques « de base » (pH, CEC, teneur en Al, ...) des sols ardennais belges (données de l'inventaire permanent reprises en Annexe IV), équivalents à ceux de l'Oesling, sur base de la « nature de la charge », ne met pas non plus en lumière de différenciation possible. Par contre, tout comme la « profondeur » et l'« abondance de la charge caillouteuse » interviennent dans cette clé de détermination, nous suggérons de prendre en compte les critères « profondeur » et « abondance de la charge caillouteuse » pour réaliser une classification *relative* des sols de l'Oesling, le cas échéant.

Pour le Gutland, une discussion a été menée avec le bureau d'études EFOR/ERSA pour essayer de convertir les classes de sols proposées dans ce travail en « types stationnels Gutland ». Les points suivants ont été mis en exergue :

- le travail de « mise en relation » n'est applicable (et n'a été appliqué) qu'à une partie de l'échantillon IFL : sont bien évidemment exclues les placettes de l'Oesling, mais aussi celles de la Minette. Sont également absentes celles pour lesquelles le substrat n'est pas précisé ou difficilement classifiable sur base de la clé dichotomique des types stationnels (substrats d'altération du Buntsandstein notamment). En outre, les « sols de vallon » de la typologie (types 18 à 20) ne concernant, en fait, que les endroits où la présence d'une nappe (battante ou permanente) est établie, nous ne présentons la classification des placettes de « fonds de vallée, bas versant et cuvette » (suivant le critère « relief » de l'IFL) ;

⁸ « Il est sous-entendu qu'en cartographie pédologique, une charge conglomératique est composée de conglomérats démunis de leur ciment »

⁹ Signalons que les unités d'échantillonnage (36) de la Minette (Domaine 4) se trouvent dans les groupes a et b1 (pH>5). Elles ne sont donc pas soumises à un appauvrissement en élément nutritif à court terme. Par contre, d'autres risques peuvent subvenir (toxicité, ancrage difficile dû à la superficialité du sol,...)

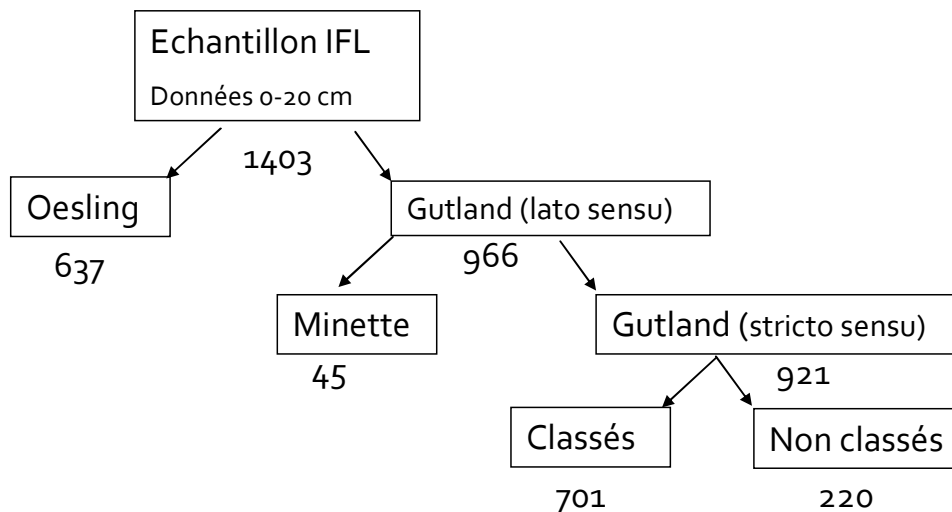


Figure 1. Organigramme présentant la proportion de placettes de l'échantillon IFL ayant été associées à un type stationnel de la typologie du Gutland (voir Tableau 5).

- la clé de détermination de la typologie a été réalisée, en premier lieu, sur base de critères topographiques et de facteurs physiques. Il en résulte qu'une classe de sensibilité des sols « chimiquement parlant » englobe différents types stationnels et que, au sein d'un même type, différentes sensibilités peuvent être envisagées (certains types stationnels peuvent avoir des « amplitudes de richesse chimique » assez larges)¹⁰. En première approche, nous présentons une subdivision sur base d'un $pH_{\text{équivEau}}$ au Tableau 5. Une réflexion plus approfondie devra néanmoins être menée pour affiner la correspondance, d'autant plus que les critères diagnostiques de sensibilité physique et chimique à l'exportation des rémanents sont souvent opposés¹¹;
- certains types stationnels (7 et 10 ; 8, 9, 11 et 12 par exemple) sont difficiles à classer par manque d'informations physico-chimiques (« profil type » notamment) ou parce que certains aspects favorables étaient neutralisés par d'autres défavorables (par ex. types stationnels 13 et 15 chimiquement bien pourvus mais de profondeur faible) et n'ont donc pu être envisagés qu'en relatif (voir Tableau 5) ;
- Eu égard à ce qui est présenté ci-dessus, certains types stationnels devraient peut-être être subdivisés et/ou (re)créés ;
- la typologie du Gutland a traité, autant que faire se peut, le cas complexe de sol présentant une couche superficielle d'épaisseur et de richesse variables sur un substrat de nature différente (par exemple couche limoneuse sur marnes). L'approche présentée ci-dessus ne permet pas vraiment de prendre en compte des recouvrements d'un substrat par un autre car nous ne disposons d'aucune information au-delà de 40 cm. Il risque donc d'y avoir une erreur de jugement dans les zones de transition, en particulier lorsqu'il s'agit de grès de Luxembourg altéré et de marnes non altérées¹². La prise en compte de la texture pourrait apporter une information supplémentaire et réduire le risque (paramètres physico-chimiques légèrement plus favorables en cas de texture autres que Z et S) ;

La synthèse de l'analyse et la classification de sensibilité des sols appliquée aux « types stationnels Gutland » se trouvent au Tableau 5.

¹⁰ Commentaire personnel de J.-C. Kieffer

¹¹ « Là où les conditions d'exploitation sont favorables, il y a peu ou pas de possibilités d'exportation de rémanents. Les zones où il serait possible d'envisager un passage dans la vie du peuplement présentent en général aussi une contrainte relative au tassement » (Commentaire ONF lors de la présentation du Programme Lorrain d'appui à la sylviculture 2008-2009-Projet PEFC Lorraine n°8 en décembre 2010).

¹² Ces cas de figures peuvent, d'ailleurs, être responsables du $pH_{\text{équivEau}} > 5$ pour les 45 unités du groupe c dont il a été question plus haut (substrat grès du Luxembourg)

Tableau 5. Classification et caractérisation des placettes IFL suivant les types stationnels du Gutland et essai de conversion en fonction de la sensibilité chimique (couleurs attribuées par ordre croissant de risques (relatif) : vert clair-vert foncé-beige-orange-rouge).

Type station	# unités d'éch.	Exposition # v. chaud	Relief	Texture*	Drainage*	Profil*	Pfdeur*	Charge*	Abondance*	pH**	P ₂ O ₅ ** (mg/100g)	K ₂ O ** (mg/100g)	Mg ** (mg/100g)
1	(149+12)***	51	milieu de versant, plateau, haut de versant (terrasse)	Z et S (G)	bon (qqes modérés)	a et f (b)	> 80 cm	Φ ou grès	surtout 0-5%	3.6-4.0	1.0-2.0	1.0-3.0	1.0-3.0
										4.9-5.6	1.0-2.0	3.0-5.5	3.0-5.5
2	(75+8)***	14	milieu de versant, plateau, haut de versant	Z, S et G	bon (qqes modérés)	a et f (b)	<80 cm	grès ou Φ	surtout <15 %	3.6-4.1	1.0-2.0	1.0-3.0	1.0-3.0
										4.7-5.3	1.0-3.0	2.0-8.0	3.0-6.0
3	(26+4)***	30	milieu et haut de versant	Z et S (G)	bon (qqes modérés)	a et f	<80 cm	grès ou Φ	surtout 0-5%	3.5-3.9	1.0-2.0	2.0-4.0	2.0-4.0
										4.8-5.7	1.0-3.0	4.5-6.0	6.0-7.0
4	(8+1)***	5	milieu et haut de versant	Z et S (G)	excessif ou bon	g et r	indifférent	Φ ou grès	surtout 0-5%	3.5-3.6	1.0-2.0	2.0-5.0	1.0-3.0
										4.7	2	3	2
5	(19+5)***	5	plateau et versant	L, A, E	modéré, imparfait ou pauvre	a (b et x)	indifférente	Φ ou grès	surtout 0-5%	3.8-4.5	1.0-2.0	2.5-6.0	2.5-5.0
										5.0-5.6	4.0-5.0	8	10.0-24.0
6	(12+2)***	1		L, A, E	bon	a	indifférente	Φ ou Δ _{texture}	surtout 0-5%	4.0-4.1	0.0-1.0	3.0-4.0	2.0-5.3
										5.2-6.3		11	5.0-8.0
7 et 10	136	42	milieu de versant, plateau, haut de versant	L, A, E (U, S, G)	de bon à pauvre (à nappe perm)	a, x (b, f)	> 40 cm	Φ ou Δ _{texture}	surtout 0-5% mais plusieurs > 15 %	3.9-4.3	1.0-2.0	4.0-8.0	4.0-9.0
14	65	30	milieu de versant, plateau, haut de versant	L, A, E	de bon à pauvre (à nappe temp)	a, x	< 40 cm	Φ	surtout 0-5% mais qqes > 15 %	4.0-4.3	1.0-2.0	4.0-9.0	6.0-17.0
8, 9, 11, 12	97	40	milieu de versant, plateau, haut de versant, plaine	A, E, U (G, S, L)	de bon à très pauvre	a, b (x)	> 40 cm	Δ _{texture} ou Φ		4.8-5.9	1.0-2.0	7.0-14.0	11.0-34.0
13 et 15	82	36	milieu de versant, haut de versant, plateau	L, A, E, U	de bon à pauvre (à nappe temp)	a, x, b	< 40 cm	Φ, quelques Δ _{texture} et calc.	surtout 0-5% mais qqes > 15 %	4.9-6.2	1.0-3.0	8.0-18.0	15.0-38.0

Φ : pas de charge ; * caractéristiques dominantes des sous-échantillons (secondaires entre parenthèses) ; **intervalle interquartile (Q1-Q3) à la profondeur 0-20 cm ; *** nombre d'unités pHeau<5 + pHeau≥5

Rappelons encore une fois que notre approche est exclusivement « chimique » Il faut donc être attentif au fait que :

- comme il a déjà été signalé, d'autres critères seraient prépondérants si l'on envisageait d'autres, en particulier les risques physiques (compaction, orniérage, érosion) et déboucheraient sur une classification des risques différentes ;
- la classification « telle quelle » ne tient pas compte de zones d'intérêt biologique et du degré de pente alors que ces deux éléments doivent être pris en compte dans le diagnostic général.

B. Clé de détermination du niveau trophique

La seconde classification a été établie en partant de la clé de détermination du niveau trophique du guide de boisement des stations forestières de Wallonie (Weissen *et al.*, 1994) légèrement modifiée (ajout des substrats et charges dolomitiques et macignos au substrat et à la charge calcaire). Nous n'avons pas pris celle du Grand-Duché de Luxembourg (Kieffer *et al.*, 2003) en raison de l'incertitude concernant le développement de profil de type « b ».

La clé distingue, en première entrée, les substrats calcaires (ou dolomitiques ou macignos) des substrats non calcaires (Figure 2) Dans le premier ensemble (partie supérieure), on retrouve l'équivalent du groupe a, présenté précédemment (Tableau 4). Dans le second, sont repris tous les autres substrats, c'est-à-dire :

- ceux qui sont toujours non calcaires et qui ne présentent pas de charge de nature calcaire, dolomitique et macigno (conglomérats, schistes, grès et dérivés) ;
- ceux qui, sur base de leur définition, contiennent des carbonates (grès calcaire, marnes et dérivés) mais peuvent également être décarbonatés. Un rapprochement de ceux-ci avec les substrats calcaire, dolomitique ou macigno aurait résulté en une perte d'information importante, en raison du nombre d'unité d'échantillonnage de charge non calcaire et de développement de profil de type « a, b ou x ».

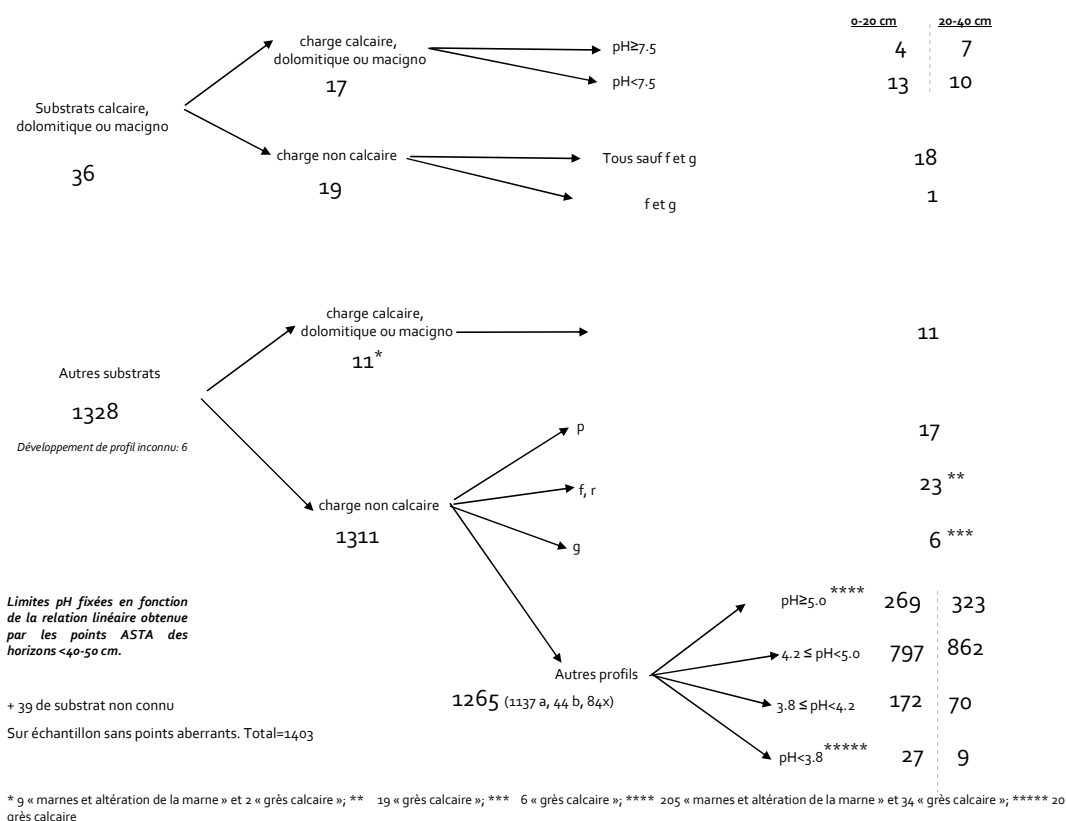


Figure 2. Répartition des placettes IFL sur base de la clé de détermination du niveau trophique.

On remarque à partir de la Figure 2 que 95% des placettes restent inclassées en ne prenant que la dichotomie de « nature de la charge » proposée et le développement de profil. En tenant compte des commentaires associés aux différentes valeurs, on constate que les placettes sur grès de Luxembourg présentent des développements de profil de type podzolique (podzol « vrai » (symbole g) ou sols à tendance podzolique (symboles f, r) ou des pH faibles (sauf 34 d'entre elles). Les sols dérivés de marnes et altération de la marne constituent la majeure partie des sols de $\text{pH}_{\text{équivalent Eau}} \geq 5$. Le Tableau 6 reprend la classification des 1265 placettes distinguées les unes des autres sur base du pH :

Tableau 6. Tableau croisé de pH pour les placettes de l'IFL différenciées sur base du pH à la Figure 2.

		$\text{pH}_{0-20 \text{ cm}}$					TOTAL
		< 3,8	$3,8 \leq \text{pH} < 4,2$	$4,2 \leq \text{pH} < 5,0$	$5,0 \leq \text{pH} < 7,5$	$\geq 7,5$	
$\text{pH}_{20-40 \text{ cm}}$	< 3,8	6 (grès)	3 (grès)	/	/	/	9
	$3,8 \leq \text{pH} < 4,2$	13 (grès)	37 (32 grès)	18	2	/	70
	$4,2 \leq \text{pH} < 5,0$	8 (7 grès)	132 (119 grès)	691	31 (8 grès)	/	862
	$5,0 \leq \text{pH} < 7,5$	0	/	87	228 (55 grès)	1 (marnes)	323
	$\geq 7,5$	0	/	/	3 (marnes)	4 (marnes)	
TOTAL		27	172	796*	269		1265

* 1 échantillon sans donnée de $\text{pH}_{20-40 \text{ cm}}$

Le Tableau 6 confirme la large dominance des grès de Luxembourg parmi les sols de $\text{pH}_{\text{équivalent Eau}} < 5$ et la nécessité de prendre en compte de la nature du substrat dans la classification.

Un avantage de la clé du guide du boisement par rapport à l'approche précédente (classification « pédochimique ») est qu'elle facilite d'utilisation et en relation directe avec une échelle de potentialité (niveau trophique). Par contre, le lien avec la typologie du Gutland est moins évident puisqu'aucune distinction n'est établie entre les grès et les marnes.

Enfin, l'approche via le substrat permet également de pouvoir attribuer des valeurs moyennes ou des « gammes de valeurs probables » pour les principaux éléments nutritifs considérés dans cette étude (Ca, Mg, K, P et N). En effet, la nature du substrat est une donnée également répertoriée dans l'inventaire permanent wallon (Tableau 19 à l'Annexe IV) et dans l'étude d'EFOR/ERSA (Tableau 20 à l'Annexe IV). D'autre part, ces deux sources de données s'appuient sur les mêmes méthodes pour ce qui est du pH et des cations biodisponibles. Il est dès lors possible de vérifier les regroupements effectués sur une base quantitative. Les valeurs sont reprises au Tableau 7.

Tableau 7. Valeurs des premier et troisième quartiles (Q₁ et Q₃) de paramètres physico-chimiques d'intérêt en fonction des différents types de substrats considérés dans l'approche « roche-mère » (valeurs issues de l'inventaire permanent wallon (0-20 cm) et des analyses de profils de la typologie du Gutland (0 cm < P₁ < 22 cm)).

Type de substrat	Groupe pédochim. correspondant	pH _{eau}	pH _{KCl}	K (mg * 100g ⁻¹)	Mg (mg * 100g ⁻¹)	Ca (mg * 100g ⁻¹)	N (g * 100g ⁻¹)
Schiste	C Oesling	4.1-4.4	3.5-3.8	3.7-5.3	1.5-2.3	2.6-8.0	0.3-0.4
Schisto-gréseux/Grésoschisteux	C Oesling	4.0-4.3	3.4-3.7	3.8-5.5	1.2-2.3	2.3-5.9	0.2-0.4
Grès (Primaire)	C Oesling	4.1-4.3	3.3-3.7	3.9-5.8	1.4-3.3	3.3-12.0	0.2-0.3
Sable et grès (Secondaire)	C Gutland	4.3-4.8	3.4-4.1	2.7-4.4 (0.9-2.1) [#]	0.5-2.0	4.2-15.5	0.1-0.1
Marne	b	4.5-5.4	3.7-4.5	4.0-8.7	1.0-13.7	3.2-92.8	0.1-0.2
Calcaire (jurassique)	a	5.7-6.6	4.5-6.0	8.3-10.6	10.3-11.7	156.1-238.5	0.2-0.3

[#] Valeurs très différentes entre les résultats de l'inventaire permanent et ceux d'EFOR/ERSA

Un raisonnement sur base du taux de saturation (indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du milieu (Baize, 2000) n'est possible qu'à partir des résultats de l'inventaire permanent wallon puisque que l'acidité d'échange n'est pas mesurée au Grand-Duché de Luxembourg et ce, quel que soit le pH et/ou le substrat. Cet indicateur ne permet pas de différencier les substrats retrouvés dans l'Oesling en raison de valeurs équivalentes (3-5 %). En ce qui concerne les substrats équivalents à ceux du Gutland, les résultats du calcul de taux de saturation en base sont sujets à caution en raison du faible nombre d'unités d'échantillonnage (≤5 valeurs pour les marnes et les calcaires) et de la variation artificielle vers pH 4.5 (valeur de pH_{eau} arbitrairement fixée par l'inventaire permanent en deça de laquelle l'acidité d'échange est mesurée).

L'inventaire permanent wallon permet, en outre d'avoir une idée globale de la fertilité à long terme grâce aux teneurs pseudo-totales. Ces données sont utilisables pour les substrats retrouvés dans l'Oesling mais sont à prendre avec davantage de prudence dans le Gutland en raison du faible nombre de données disponibles.

2.3.5. Conclusion de la partie sol

L'objectif de cette première partie était d'élaborer différentes classes de sols en fonction de leur « richesse chimique » (Tableau 8). Nous attirons l'attention sur le fait que la classification serait modifiée si, notamment, la protection physique des sols était prise en compte.

La classification proposée n'est pas aussi précise que ce que nous avons préalablement espéré, en raison notamment d'un manque d'homogénéité des différentes sources de données et du manque de certains paramètres intéressants. Il serait donc intéressant de la retravailler dans le future, lorsque des informations supplémentaires seront disponibles.

Malgré cela, celle-ci met en évidence un certain nombre de points intéressants :

- Les mesures de pH, classes texturales et développements de profil ne sont pas des critères suffisants mais ils peuvent apporter, en compléments à un/d'autre(s), une information intéressante ;
- les sols de l'Oesling doivent être considérés comme acides et pauvres et de forte sensibilité. Des nuances supplémentaires sont à ajouter en fonction de la profondeur et de la pierrosité. En raison de la nature du substrat dominant (schistes), il serait, en outre, intéressant d'évaluer les concentrations en Al sur le complexe d'échange et/ou d'avoir une idée des déséquilibres entre cations (rapport Ca/Al notamment) ;
- les sols de la Minette sont classés parmi le groupe le plus riche (faible sensibilité). Cela ne veut pas forcément dire que tous sont favorables : en effet, d'autres contraintes, en particulier des déséquilibres entre éléments, ne sont pas à exclure et pourraient être renforcées par l'exportation différentielle des éléments lors de l'exploitation du bois ;
- les sols du Gutland sont plus diversifiés et peuvent être retrouvés dans plusieurs groupes et donc dans plusieurs classes de sensibilité. Les sols présentant un substrat calcaire ou dolomitique peuvent être considérés comme bien pourvus et de risque chimique faible. Leur caractère superficiel peut cependant minorer cet avantage. Les sols sur marnes ou altération de la marne sont variés : une partie n'est pas ou peu altérée et peut être assimilée à la classe de risque faible tandis que les marnes décalcifiées présentent un risque plus élevé (considéré comme « moyen » relativement à la sensibilité des autres groupes). Dans ces sols, la profondeur d'apparition du substrat non altéré joue probablement un rôle non négligeable. Les sols sur grès de Luxembourg sont acides et (très) pauvres à quelques exceptions près. Ils doivent être considérés comme très sensibles. En outre, la perturbation des équilibres physico-chimiques pourrait avoir des conséquences sur la qualité des eaux souterraines ;
- La typologie stationnelle du Gutland est un outil intéressant auquel pourrai(en)t être adjointe(s) une /plusieurs classe(s) de sensibilité chimique pour chaque station. Cela nécessiterait cependant un travail plus approfondi, notamment en termes de précision de « l'amplitude physico-chimique » au sein de chaque type stationnel. La caractérisation physico-chimique des types stationnels présentant peu (ou pas) de « profils-type » permettrait d'améliorer l'adéquation entre la typologie et les classes de sensibilité, en particulier pour certains types (voir Tableau 5). On pourrait également envisager de pouvoir attribuer une gamme (ou des valeurs seuils) de concentrations en cations échangeables « de référence » pour chaque groupe de substrat et/ou type stationnel et/ou classe de sensibilité ;
- Il serait sans doute utile de déterminer le pH à une profondeur supérieure à 40 cm lorsque c'est possible (proposition : 60 cm) afin de pouvoir mieux détecter une éventuelle modification de substrat ;

Tableau 8. Classification du risque d'appauvrissement chimique pour chacun des groupes définis par l'approche géo-pédologique.

Groupe	Composition du groupe	Sensibilité chimique
a	calcaire, dolomie, macignos	faible
b₁	marnes et altération de la marne de pH ≤5	moyenne
b₂	marnes et altération de la marne de pH >5	faible
c_{Oesling}	schistes ou grès primaires et dérivés	forte à très forte
c_{Gutland}	grès du Luxembourg et dérivés	très forte
c_{Gutland}	grès du Luxembourg et dérivés de pH >5	moyenne
e	divers	variable

+ ne pas exploiter les rémanents sur sols organiques (très forte sensibilité)

3. Estimation des minéralomasses exportées

Toute exploitation forestière se traduit par une exportation d'éléments minéraux hors de l'écosystème forestier, d'importance variable selon son intensité (AFOCEL, 2004).

La quantification de ces exportations est réalisée en estimant (ou mesurant) la biomasse et en la multipliant par des concentrations en éléments nutritifs d'un échantillon représentatif (Johnson, 1982 ; Ponette & Ranger, 2000). Pour ce faire, nous avons d'abord déterminé les concentrations en éléments nutritifs de différents compartiments de l'arbre, en particulier les branches. Ensuite, nous avons évalué la biomasse exportée lors des éclaircies en fonction de différents niveaux de fertilité, pour les 4 essences retenues dans le cadre de cette étude. Enfin, nous avons estimé les minéralomasses exportées pour différents scénarios d'exploitation.

Le schéma conceptuel général de la démarche est présenté ci-dessous (Figure 3). Pour pouvoir proposer des « tarifs d'exportations » pour les différents éléments, en fonction de l'essence et d'un scénario donné, nous avons collecté des données relatives aux concentrations en éléments dans différents compartiments. Ces données étant exprimées « par unité de biomasse » ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ biomasse), cette grandeur a également dû être estimée. Nous nous sommes servis des tables de production pour obtenir les renseignements nécessaires (volume ou paramètres dendrométriques tels que le diamètre) desquels découlent tous les calculs. Le « passage à la biomasse » est opéré par deux méthodes qui seront discutées ultérieurement (facteurs d'expansion et équations allométriques).

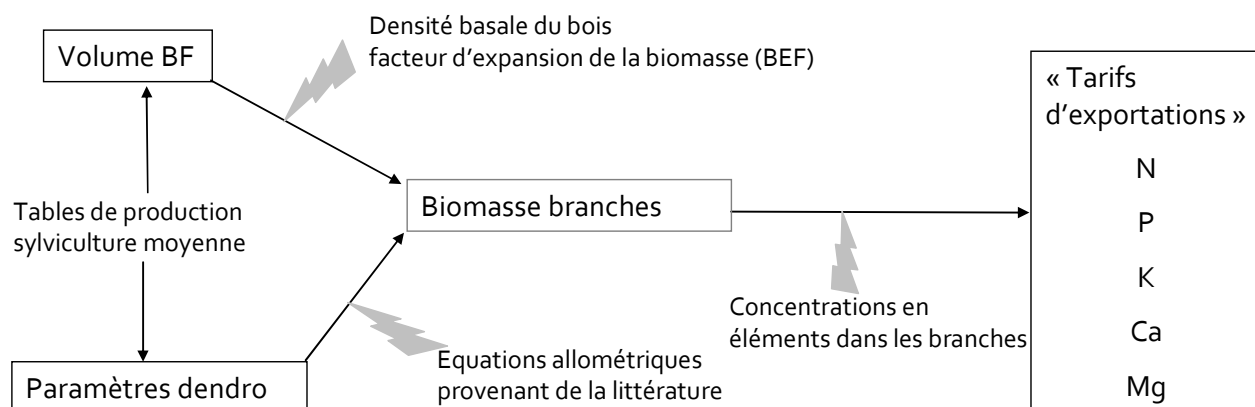


Figure 3. Schéma conceptuel de la démarche d'estimation des minéralomasses exportées par exploitation des rémanents.

3.1. Estimation des concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments

En l'absence de données spécifiques au Grand-Duché de Luxembourg, l'estimation des concentrations en éléments minéraux dans différents compartiments de l'arbre, en particulier les branches, a été réalisée sur base d'une revue bibliographique.

Les recherches ont d'abord été effectuées de manière générale afin de documenter au mieux la problématique de stocks, flux et bilans de minéraux dans les écosystèmes forestiers. Elles ont ensuite été ciblées sur les exportations minérales réalisées lors de l'exploitation forestière (conventionnelle et/ou avec exportation des rémanents) de quatre essences (chêne (*Quercus sp.*), hêtre (*Fagus sylvatica L.*), épicéa *Picea sp.*) et douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) en Europe.

Les méthodes physico-chimiques employées dans la détermination des éléments sont fort semblables voire identiques d'un article à l'autre (N : Kjeldhal ou analyseur total ; Ca, Mg, K et P : digestion acide), ce qui permet les comparaisons. Par contre, les méthodes de dosage varient (ICP, AAS ou, plus rarement colorimétrie). Les résultats sont exprimés soit sous forme de concentrations mesurées dans différents compartiments soit sous forme de stocks à l'hectare et ce, dans un contexte donné, soit encore sous forme d'équations allométriques.

Le Tableau 9 présente une vue synthétique des documents rassemblés. De plus amples informations concernant le milieu et/ou les peuplements sont reprises à l'Annexe V. Seules les données européennes ont été prises en compte dans les synthèses de Marrion (1979), Morrison & Foster (1979), Cole & Rapp (1981) et Freer-Smith & Kennedy (2002). D'autre part, certaines concentrations ont été écartées lors des calculs de concentrations moyennes³³ par compartiments :

- celles d'Alriksson & Eriksson (1998) en raison d'une température moyenne annuelle très inférieure à celle du Grand-Duché (2,9°C au lieu de 9°C) probablement à cause d'un climat boréal ;
- celles des stations du réseau européen CANIF (Scarascia-Mugnozza *et al.*, 2000) n'appartenant pas aux climats humides de type océanique ou continental ;
- celles qui, compte tenu de leur valeur par rapport aux autres données, semblaient erronées.

Le douglas est l'essence qui présente le moins de références. En outre, la plupart de celles-ci ne sont pas indépendantes les unes des autres puisqu'il s'agit des trois mêmes peuplements (Beaujolais, France). Pour le chêne, les articles portent généralement sur des futaies en mélange avec d'autres essences (hêtre, charme). Quelques-uns présentent des données de minéralomasse pour les taillis (Nys *et al.*, 1983 ; Bouchon *et al.*, 1985 ; Ranger & Bonneau, 1986 ; Ranger & Nys, 1996 ; Balboa-Murias *et al.*, 2006). Ils seront traités séparément.

Enfin, il existe peu d'études comparant plus de deux essences sur un même site. De même, rares sont les sources travaillant sur plusieurs sites pour une essence donnée.

³³ Il s'agira en fait de la médiane et non de la moyenne, la première étant moins sensible aux valeurs extrêmes.

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe.

Référence		Général		Essence					minéralomasse			article (s) apparenté(s)		
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/ Concentrations	# compartiments		types compartiments	
1	André et Ponette, 2003	Exp.	Belgique	sol brun acide (DystrochreptUSDA)	x					x	Equations	10	branches vivantes de ≠ diamètres, branches mortes, écorce, tronc (duramen/aubier)	
2	André et al., 2010	Exp.	Belgique	sol brun acide (Dystric Cambisol FAO/ Dystrochrept USDA)	x	x					Equations	10	branches vivantes de ≠ diamètres, branches mortes, écorce, tronc (duramen/aubier)	
3	Ranger et Bonneau, 1986	Synth.	France		(x)	x	x				Concentrations	variable		39
4	Balboa-Murias et al., 2006	Exp.	Espagne (NO)		x						Concentrations	8	tronc, écorce, branche (d>7cm), grosses branches, fines branches, rameaux, feuilles, racines	
5	Hagen-Thorn et al., 2004	Exp.	Suède, Danemark, Lituanie	Arénosol, Cambisol, Planosol, Alisol, Luvisol	x	x	x			x	Concentrations	2	feuillage, tronc (y compris écorce)	

Exp. : expérimental ; Synth. : synthèse

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (suite).

Référence		Général		Essence					minéralomasse			artic le(s) app aren té(s)	
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/ Concentrations	# compartiments		types compartiments
6	Ranger et al.1995	Exp.	France	Typic Dystrochrept				x		Equations	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	7, 9, 10,1 4, 15
7	Ranger et al. 1996	Exp.	France	sol brun acide				x		Concentrations	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	8, 9, 10, 14, 15
8	Ranger et al. 1997	Exp.	France	Alocrisol				x		(Equations)	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	7, 8, 10, 14, 15
9	Marques et al. 1997	Exp.	France	Typic Dystrochrept				x		Concentrations	3	branches, tronc, aiguilles	7, 8, 9, 14, 15
10	Ponette et Ranger 2000	Exp.	France	Brunisol-Podzols- Alocrisols				x		Equations	4	bois de tronc, écorce, bois des branches, aiguilles	13
11	Augusto et al., 2000	Synth.				x	x	x	x	Equations	1	tronc (avec écorce)	

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (suite).

Référence			Général		Essence					minéralomasse			article(s) apparenté(s)
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/Concentrations	# compartiments	types compartiments	
12	Ponette et al, 2001	Exp.	France	Cambisol-Podzols-Luvisol-Leptosol (WRB)				x		Equations	4	bois de tronc, écorce, bois des branches, aiguilles	11
13	Ranger et Gelhaye, 2001	Exp.	France	Typic Dystrochrept				x		Equations	8	aiguilles, branches, écorce, bois, souche, racines (3 classes)	7, 8, 9, 10, 15
14	Ranger et al., 2002	Synth.	France					x		Concentrations	5	feuilles, branche, tronc, écorce, racines	7, 8, 9, 10, 14
15	Sicard et al., 2006	Exp.	France	Alocrisols podzolisants			x	x		Equations	4	aiguilles, branches, tronc et écorce	
16	Alriksson et Eriksson, 1998	Exp.	Suède	Cambisol			x		x	Concentrations	4	feuillage, branches, tronc, racines	
17	Eriksson et Rosen, 1994	Exp.	Suède	Dystric Regosol/Typic Dystrochrept			x		x	Concentrations	2	feuillage, tronc (y compris écorce)	
18	Ingerslev et Hallbäck, 1999	Exp.	Danemark	Haplic Podzol			x			Equations	7	tronc, écorce, branches vivantes et mortes, aiguilles jeunes et vieilles, cônes	
19	Le Goaster et al., 1991	Exp.	France	sol brun ocreux (Dystrochrept)			x			Concentrations	3	tronc, branches, aiguilles	

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (suite).

Référence		Général		Essence						minéralomasse			article(s) apparenté(s)
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/ Concentrations	# compartiments	types compartiments	
20	Nihlgard, 1972	Exp.	Suède (S)	sol brun acide		x	x			Concentrations	7	tronc, écorce, branches, rameaux + 3 classes racines	
21	Oren et al., 1988	Exp.	Allemagne	Podzol et Cambisol podzolique			x			Concentrations	15	aiguilles (≠ âges), rameaux et écorce des rameaux (≠ âges), tronc, écorce, racines (2 classes)	
22	Ranger et al., 1992	Exp.	France	sol brun acide			x			Concentrations	9	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes et vieilles branches, écorce et bois du tronc + 3 classes racines	
23	Reynolds et al., 2000	Exp.	UK	podzol tourbeux			x			Concentrations	3	tronc, branches, aiguilles	
24	Scarascia-Mugnozza et al., 2000	Synth.	Europe	Cambisols (dystric) Podzols(haplic, cambic), Cryptopodzol, Regosol, Arenosol, Alisol (humic)			x			Concentrations	4	feuillage, tronc, branches, racines	29

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (suite).

Référence		Général			Essence					minéralomasse			article(s) apparenté (s)
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/Concentrations	#nts	types compartiments	
25	Svoboda et al., 2006	Exp.	République Tchèque	leptosols, podzols ou dystric cambisols			x			Concentrations	7	tronc, écorce, feuillage, branches, écorce branche, racines	
26	Nihlgard, & Lindgren, 1977	Exp.	Suède	Sol brun acide-podzol-sol brun gleyfié		x				Concentrations	4	tronc, écorce, branches, rameaux/feuillage	
27	Ranger et Bonneau, 1984	Synth.	Allemagne			x				Concentrations	5	feuilles, tronc, écorce, branches+rameaux, racines+souche	
28	Bauer et al., 2000	Synth.	Europe	Cambisols (dystric) Podzols(haplic, cambic), Cryptopodzol, Regosol, Arenosol, Alisol (humic)		x	x			Concentrations	7	feuillage,rameaux, branches, aubier; écorce, racines (grosses, fines)	29
29	Cole et Rapp, 1981	Synth.	Europe (et Am. du N)		(x)	x	x	(x)	x	Concentrations	4	feuillage, tronc, branches, racines	21, 42
30	Bouchon et al., 1985	Exp.	France	sols bruns acides (stagnogley podolique dans station C)	x				x	Equations (pour N)	9	feuilles, branches (écorce+bois), écorce du tronc (3 classes), bois du tronc (3 classes), branches mortes	
31	Free-Smith et Kennedy, 2002	Synth.	Europe et Am. du N confondus		x	x	x		x	Concentrations	2	tronc et écorce	

Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (fin)

Référence			Général		Essence					minéralomasse			article(s) apparenté(s)
n°	Auteurs	type de source	Pays	Type de sol	Chêne	Hêtre	Epicéa	Douglas	Autres	Equations/ Concentrations	# compartiments	types compartiments	
32	Penninckx et al., 1999	Exp.	Belgique	sols lessivés, lessivés hydromorphes		x				Concentrations	1	tronc	
33	Stupak et al, 2008	Exp.	Danemark				x			(Equation)	1	arbre entier	
34	Marion, 1979	Synth.	Europe (et Am. du N)		x	x	(x)	(x)	x	Concentrations		peuplements	
35	Morrison et Foster, 1979	Synth.	Monde				x		x	Concentrations		variable suivant les sources	21
36	Alban, 1979	Synth.	UK surtout			x	x	x		Concentrations		peuplements	27, 42
37	Belkacem et al., 1992	Exp.	France	sol brun acide			x			Equations (pour Ca, Mg)	3	aiguilles, branches, tronc	
39 et 39'	Nys et al. 1983	Exp.	France	sol brun acide	x		x			Concentrations		écorce tronc, bois tronc, branches mortes feuilles, bois de branches	
40 et 40'	Rennie, 1955	Synth.	Europe		x	x				Concentrations		racines, bois du tronc, écorce du tronc, aiguilles,	
41	Ranger et Nys, 1996	Synth.	France		x				x	Concentrations	3	d >7cm, d >4 cm, tige biomasse ligneuse aérienne totale	
42	Denaeyer-De Smet, 1971	Exp./ Synth.	Belgique	rendzine	x					Concentrations		feuilles, bourgeons, rameaux écorce des branches, bois des branches, écorce du tronc, bois du tronc, écorce des racines, bois des racines	

Les différents articles repris dans le Tableau 9 (et dans l'Annexe V) ne contiennent pas la même information, comme en témoignent le nombre et le type de compartiments étudiés notamment. Ceci nous a donc contraint, dans le cas particulier des branches, à ne considérer qu'un seul compartiment pour chaque source, alors que certains auteurs offraient la possibilité, en plus d'une concentration totale, de distinguer différentes catégories, tant en taille qu'en qualité (branches vivantes ou mortes). Cette perte d'information était malheureusement nécessaire pour pouvoir effectuer les comparaisons avec un nombre suffisant de données.

Les concentrations mesurées ou calculées dans les branches pour chaque essence sont reprises dans les Tableaux 10 à 14¹⁴. Lorsqu'un auteur est cité à plusieurs reprises, il s'agit, sauf indications supplémentaires, des concentrations pour différents peuplements étudiés (par ex. Cole & Rapp, 1981 dans le Tableau 10). Lorsqu'un écart-type est donné (par ex. Balboa-Murias *et al.*, 2006 dans le Tableau 11), il s'agit d'une information sur la variabilité de l'échantillon donnée par chacun des auteurs.

Tableau 10. Concentrations (mg* kg⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de chêne (futaie).

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André & Ponette, 2003 [*]	3481	303	1643	4068	248
André et al. 2010 [*]	2315	137	1840	4367	202
Cole & Rapp, 1981	3308	294	1775	4330	345
Cole & Rapp, 1981	8099	631	4502	21304	1977
Cole & Rapp, 1981	1748	110	1816	4084	238
Denayer-De Smet, 1971	4339	338	2289	7283	1207
Rademacher <i>et al.</i> , 2001 ^{**}	6242	528	1827	4847	496
Rademacher <i>et al.</i> , 2001 ^{***}	2640	236	1370	4955	246

^{*} Il s'agit du « total branches » donnés par les auteurs ; les concentrations pour différentes catégories de diamètres de branches peuvent être retrouvés dans ces articles ; ^{**} branches < 7 cm ; ^{***} branches > 7 cm

Tableau 11. Concentrations (mg* kg⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de chêne (taillis).

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006 [*]	2230±570	210±30	1370±250	1520±480	300±140
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006 ^{**}	3850±370	390±80	2370±920	4270±760	530±60
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	7510±730	680±20	2550±320	5590±2130	880±20
Nys <i>et al.</i> , 1983	9400	700	2700	2500	300
Bouchon et al. 1985	7400	500	2400	2500	400
Bouchon et al. 1985	7100	600	2700	2500	300
Bouchon et al. 1985	6500	700	3500	3200	400

^{*} Branches > 7 cm ; ^{**} Thick branches ; ^{***} Thin branches

La proportion de chacune de ces classes étant inconnue, les concentrations moyennes sont données séparément.

¹⁴ Afin de pouvoir comparer les différents articles, il a parfois été nécessaire de convertir les valeurs présentées (résultats exprimés en % de matière sèche, en mol* kg⁻¹ ou en kg ha⁻¹).

Tableau 12. Concentrations (mg* kg⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de hêtre.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André <i>et al.</i> , 2010	3406	218	1413	1591	269
Cole & Rapp, 1981	2530	330	735	2846	137
Cole & Rapp, 1981	3753	448	1446	2663	220
Cole & Rapp, 1981	3962	302	1315	2361	246
Cole & Rapp, 1981	6667	558	2303	3848	413
Denayer-De Smet, 1971	6600	610	3700	17000	320
Nilhgard & Lindgren, 1977	5156	416	2156	6016	534
Nilhgard & Lindgren, 1977	6667	558	2303	3848	413
Nilhgard & Lindgren, 1977	6250	639	1679	4607	480
Ranger & Bonneau, 1986	3000	500	1200	1900	200
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000*	2928	190	1768	2528	290
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	3965	478	2020	3493	234
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	6856	749	2299	3507	371
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	3965	478	2018	3495	233

* Il s'agit uniquement des sites du réseau CANIF situé dans un climat humide de type océanique ou continental.

Tableau 13. Concentrations (mg* kg⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Belkacem <i>et al.</i> , 1992	5003	556	2592	3196	290
Cole & Rapp, 1981	5307	1217	5974	1885	1132
Cole & Rapp, 1981	8603	613	6491	2652	698
Cole & Rapp, 1981	8607	613	6496	2651	698
Eriksson & Rosen, 1994	6403	769	2828	3937	930
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	5847	662	1826	3704	745
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	5789	737	1895	3895	684
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	6087	696	1739	3870	696
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991 [*]	8300	1330	4900	2900	600
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991 ^{**}	4900	590	2500	3200	400
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991 [*]	8900	1250	5000	2700	500
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991 ^{**}	4700	550	2300	2800	400
Morrison, 1979	10000	1357	5107	3286	750
Nys <i>et al.</i> , 1983	3928	464	1744	2387	362
Ranger <i>et al.</i> , 1992	8900±6300	1140±390	2700±900	3400±600	830±250
Ranger <i>et al.</i> , 1992	4921	1336	2500	3712	1340
Reynolds <i>et al.</i> , 2000			1844	1199	233
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	3097	400	1897	3697	297
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	4563	517	2123	3262	384
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	7611	803	3120	2893	620
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	4529	517	2123	3264	387
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	5077	541	2072	2806	599
Sicard <i>et al.</i> , 2006	3333	364	1879	2152	394
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	3866	243	1067	2326	363
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	3412	173	916	3505	334
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	3900	260	1023	2192	355
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	3491	184	1043	3123	362
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	4381	396	1430	1661	359
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	3619	248	1028	2202	337
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	3905	253	1000	2813	337
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	3350	182	887	3738	326
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	4286	304	1174	2155	360
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	3451	215	947	3698	340
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{***}	4628	415	1462	1860	422
Svoboda <i>et al.</i> , 2006 ^{****}	4107	335	1272	2290	381

* branches de 2 ans ; ** vieilles branches ; *** branches de 1-2 cm ; **** branches > 3 cm

La proportion de chacune de ces classes étant inconnue, les concentrations moyennes sont données séparément.

Tableau 14. Concentrations (mg* kg⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de douglas.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Ponette & Ranger, 2000	5160	540	2580	1720	620
Ponette & Ranger, 2000	5430	400	2210	2010	460
Ponette & Ranger, 2000	6010	600	3250	3490	600
Ponette & Ranger, 2000	4230	420	2440	1710	450
Ponette & Ranger, 2000	4860	450	1980	3440	440
Ranger & Gelhaye 2001	3618	363	2251	3073	378
Ranger <i>et al.</i> , 1995	4300±1400	500±1600	2800±1300	2400±900	400±100
Ranger <i>et al.</i> , 1995	4100±1500	400±1700	2300±800	3200±1300	400±100
Ranger <i>et al.</i> , 1995	4200±1300	500±200	2100±800	4600±1200	490±200
Ranger <i>et al.</i> , 1995	3736	450	2292	3925	406
Ranger <i>et al.</i> , 1995	3433	390	2135	2838	312
Ranger <i>et al.</i> , 1995	2387	506	1363	3325	264
Ranger <i>et al.</i> , 2002	3706	412	2118	3824	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	3615	346	2242	2692	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	2420	260	880	3240	
Sicard <i>et al.</i> , 2006	2889	333	2444	2306	417

Pour rappel, certaines de ces données concernent les mêmes peuplements

On remarque que la variation de concentrations mesurées peut être importante tant au sein d'une même étude (voir écart-types chez certains auteurs) qu'entre les différentes sources. Plusieurs facteurs peuvent entrer en ligne de compte : les conditions climatiques et stationnelles, l'âge, la dimension des branches récoltées,...

C'est pourquoi nous avons choisi de calculer la médiane plutôt que la moyenne, en raison de la sensibilité de cette dernière aux valeurs extrêmes. Les concentrations médianes des branches de chaque essence sont présentées dans le Tableau 15¹⁵.

Tableau 15. Concentrations médianes des branches de chêne (n=8 ; taillis n=7), hêtre (n=13), épicéa (n=38) et douglas (n=16).

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
chêne (F)	3394	298	1821	4607	296
chêne (T)	7100	600	2550	2500	400
hêtre	3965	478	1984	3495	279
épicéa	4910	517	1895	3123	400
douglas	3918	416	2247	3137	406

« n » indique le nombre de valeurs sur lesquelles est basé le calcul de la médiane (n variable selon les éléments)

Les concentrations en éléments décroissent dans l'ordre suivant : N>Ca>K>P~Mg sauf pour les branches de chêne, plus concentrées en Ca qu'en N. Les feuillus concentrent davantage de Ca dans leurs branches que les résineux. Par contre, il s'agit de la tendance inverse pour Mg. Le taillis de chêne est, sur base des médianes des données récoltées, le régime qui concentre le plus d'éléments dans les branches, exception faite du calcium.

¹⁵ Il s'agit d'un calcul de médiane non pondéré par le nombre de peuplements et/ou arbres envisagés dans chaque étude. La pondération pourrait être une amélioration portée à cette étude, à condition de tenir également compte de la « distance » du site par rapport au Grand-Duché de Luxembourg (une étude dans le sud de la Belgique sur un seul peuplement peut être plus intéressante qu'une étude plus large mais plus éloignée).

Les données reprises ci-dessus ne concernent pas les branches de l'année. Ces dernières présentent des concentrations en éléments minéraux nettement supérieures (Tableau 16), comparables à ce qu'on retrouve dans le feuillage (voir plus loin). Cette observation mérite d'être gardée à l'esprit lors de la discussion des minéralomasses exportées en cas de récolte des rémanents.

Tableau 16. Concentrations en éléments nutritifs des branches d'un an présentées par différents auteurs.

		N	P	K	Ca	Mg
		mg/kg				
chêne	Denayer-De Smet, 1971	13000	470	3600	14000	1500
hêtre	Nilhgard & Lindgren, 1972	26700	1080	7700	8820	
	Nilhgard & Lindgren, 1973	25900	1550	5900	5010	
	Nilhgard & Lindgren, 1974	22400	1860	4900	6010	
	Nilhgard, 1971	25000	1550	5750	5000	1700
épicéa	Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	10000	1760	6900	2400	800
	Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	10200	1620	6800	2500	700
	Nilhgard, 1971	15152	1970	9394	1818	758
	Ranger <i>et al.</i> , 1992	13400±1400	2390±390	5400±1100	2800±300	1090±120
	Ranger <i>et al.</i> , 1992		2729	7243	3359	1260
douglas	Ranger <i>et al.</i> , 1995	11000±1500	1300±200	5600±800	4200±100	1100±200
	Ranger <i>et al.</i> , 1995	11200±1200	1300±100	5000±700	3900±1100	1200±300
	Ranger <i>et al.</i> , 1995	11400±1300	1400±200	4500±700	4900±1100	1100±300

Pour rappel, lorsqu'un auteur figure à plusieurs reprises, c'est qu'il s'agit de peuplements différents pour lesquels des concentrations différentes sont données. Lorsqu'un écart-type est donné, il s'agit d'une information fournie par le ou les auteurs et indépendante de tout calcul de notre part.

A titre de comparaison, les concentrations médianes en éléments nutritifs d'autres compartiments de l'arbre sont présentées dans les Tableaux 17 à 20. Les données sur lesquelles se basent ces valeurs peuvent être retrouvées *in extenso* à l'Annexe VI.

Tableau 17. Concentrations médianes du feuillage de chêne (n=7; taillis n=7), hêtre (n=14), épicéa (n=32 et 12) et douglas (n=14 et 3).

feuillage					
	N	P	K	Ca	Mg
mg*kg ⁻¹					
chêne	24451	1714	11100	9714	1710
chêne (taillis)	22831	1900	8093	3800	1200
hêtre	26750	1400	8509	5332	800
épicéa (vieilles aiguilles)	12994	1230	5278	3900	616
épicéa (aiguilles de l'année)	15284	1757	6413	2555	943
douglas (vieilles aiguilles)	15640	959	4886	6310	1100
douglas (aiguilles de l'année)	16000	1100	5300	4700	1200

En ce qui concerne le feuillage (Tableau 17), il apparaîtrait que les essences feuillues concentrent davantage d'éléments que les essences résineuses. Nous ne maîtrisons cependant pas l'effet « site », lequel influence également la concentration en éléments dans le feuillage. Il semblerait également qu'au sein de ces deux grands groupes, le chêne concentrerait P, K, Ca et Mg, tandis que le hêtre contiendrait

plus de N. De même, le douglas présenterait des concentrations supérieures à l'épicéa pour N, Ca et Mg. On remarque également que, comme dans le cas des branches, la concentration des aiguilles de l'année est plus importante que celles des vieilles aiguilles.

Pour le tronc, certains auteurs donnent une concentration pour l'ensemble du tronc (Tableau 18) tandis que d'autres séparent le bois (Tableau 19) de l'écorce (Tableau 20). Ceci permet de mettre en lumière la richesse minérale relative de cette dernière. On remarquera, en particulier, les différences de concentrations en Ca entre l'écorce et le bois chez le chêne.

Tableau 18. Concentrations médianes en éléments nutritifs dans le tronc pour le chêne (n=7), le hêtre (n=12), l'épicéa (n=22) et le douglas (n=6).

	tronc entier (bois + écorce)				
	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
chêne	1760	90	1000	3032	120
hêtre	1320	111	1070	1560	222
épicéa	1128	113	685	1255	155
douglas	1035	82	827	590	110

Remarque : pas de données pour le taillis de chêne

Tableau 19. Concentrations médianes en éléments nutritifs pour le bois de tronc pour le chêne, le hêtre, l'épicéa et le douglas.

	bois du tronc				
	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
chêne	1300	62	968	525	66
chêne (taillis)	6633	333	2400	7800	467
hêtre	1157	82	981	839	243
épicéa	990	52	524	717	114
douglas	639	30	314	285	53

Remarque : Certaines sources différencient l'aubier et le duramen sans préciser le % de chacun, elles n'ont donc pas été comptabilisées.

Tableau 20. Concentrations médianes en éléments nutritifs pour l'écorce pour le chêne, le hêtre, l'épicéa et le douglas.

	écorce du tronc				
	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
chêne	5000	489	1700	23000	441
chêne (taillis)	6633	333	2400	7800	467
hêtre	7500	500	2250	16429	545
épicéa	5228	575	2800	7839	869
douglas	4053	458	2565	1963	340

D'autres compartiments sont encore présentés par certains auteurs (racines, fruits,...) mais nous n'en parlons pas le cadre de ce travail.

La présentation de ces différents résultats, essence par essence, peut être retrouvée en annexe VII.

En résumé, les différents résultats présentés ci-dessus confirment plusieurs affirmations fréquemment retrouvées lors qu'on parle des risques liés à l'exportation des rémanents, à savoir que :

- la concentration en éléments nutritifs est plus importante dans le feuillage et, pour les compartiments ligneux, augmente lorsque le diamètre décroît. Une exception notable : la concentration en Ca, plus élevée dans l'écorce pour le chêne, le hêtre et l'épicéa;
- les compartiments jeunes sont plus concentrés en éléments nutritifs ;
- les concentrations sont, en général, plus fortes pour N et Ca, intermédiaires pour K et plus faibles pour Mg et P. Il existe néanmoins plusieurs exceptions où la concentration en K est supérieure à celle de Ca :
 - o dans le feuillage du chêne, du hêtre et de l'épicéa ;
 - o dans le bois du chêne, du hêtre et du douglas ;
 - o dans l'écorce du douglas.

Les concentrations médianes à partir desquelles sont effectuées les différentes estimations d'exportations minérales présentées ci-après sont basées sur les Tableau 15 et 18 en pour les minéralomasses des branches et du tronc respectivement. Il est toutefois utile de conserver en mémoire les concentrations des Tableau 17, 19 et 20 lors de la discussion.

3.2. Estimation de la biomasse des branches

La biomasse forestière est l'un des réservoirs les plus importants en ce qui concerne les variations de stocks de carbone (Zianis *et al.*, 2004 ; Teobaldelli *et al.*, 2009). Son évaluation quantitative est donc un facteur clé de gestion des flux de C, ce qui n'est pas dénué d'intérêt dans le contexte actuel, loin s'en faut (cfr les objectifs de l'« United Nation Framework Convention on Climate Change » ou du protocole de Kyoto).

Compte tenu de la difficulté matérielle d'acquisition de cette donnée aux échelles habituelles de réalisation des études (échelles nationales, régionales ou subrégionales), l'estimation de la biomasse est généralement basée sur les informations fournies par les inventaires forestiers nationaux, bien que cela ne fasse pas partie de leurs objectifs premiers, lesquels portent plutôt sur la collecte de données relatives à la gestion forestière (Joosten *et al.*, 2004 ; Weiss, 2006 ; Somogyi *et al.*, 2007 ; Teobaldelli *et al.*, 2009 ; Cienciala and Exnerova, 2010 ; Freudenschuß and Weiss, 2010). D'autre part, les inventaires et tables de production concernent généralement la détermination des volumes « bois fort » ou commerciaux et incluent rarement des estimations quantitatives d'autres constituants, pourtant non négligeables pour les calculs de stocks, tels que les racines, les branches ou les feuilles (Vallet *et al.*, 2006 ; Somogyi *et al.*, 2007 ; Wutzler *et al.*, 2008).

Afin de palier ces inconvénients, deux méthodes d'estimation rapide et indirecte de la biomasse totale d'arbres ou de peuplements peuvent être envisagées (Weiss, 2006 ; Somogyi *et al.*, 2007) :

- La première, employée par la plupart des pays européens, est basée sur l'utilisation de facteurs d'expansion¹⁶ et/ou de conversion, appelés « Biomass Expansion Factors (BEFs) » ou « Biomass Conversion and Expansion Factors (BCEFs) ». Ceux-ci permettent de « passer » d'un compartiment A connu (par exemple le volume bois fort) à un compartiment B inconnu (par exemple la biomasse aérienne) (Lowe *et al.*, 2000 ; Lehtonen *et al.*, 2004 ; Somogyi *et al.*, 2007 ; Teobaldelli *et al.*, 2009 ; Freudenschuß and Weiss, 2010) ;
- La seconde est fondée sur l'emploi d'une ou de plusieurs équation(s) allométrique(s) appropriée(s), celle(s)-ci prédisant la biomasse à partir d'un (généralement le diamètre ou la

¹⁶ Il serait plus judicieux d'employer le terme générique de « facteurs de biomasse ». Même si l'expansion est l'utilisation la plus fréquente des facteurs de biomasse (Patjik *et al.*, 2008), ce dernier peut aussi servir à réduire d'un compartiment à un autre (Somogyi *et al.*, 2007)

circonférence à hauteur d'homme) ou plusieurs paramètres dendrométriques (diamètre-hauteur) facilement mesurables et disponibles dans l'inventaire (Wirth *et al.*, 2004 ; Zianis *et al.*, 2004 ; Zianis *et al.*, 2005 ; Mukkonen and Mäkipää, 2006 ; Muukkonen, 2007 ; Freudenschuß and Weiss, 2010).

Si Weiss (2006) affirme qu'aucune des deux méthodes n'est *en soi* plus précise que l'autre et que le choix entre l'utilisation de facteurs d'expansion ou de fonctions de biomasse dépend plutôt de l'adéquation du modèle avec les conditions écologiques locales, Joosten and Schulte (2002) estiment quant à eux que les prédictions réalisées avec les BEFs sont moins précises et présentent une erreur statistique souvent inconnue. Pour Somogyi *et al.* (2007), il vaut mieux accorder une préférence à des équations de biomasse locales si celles-ci sont disponibles.

En résumé, la marche à suivre généralement conseillée dans l'utilisation de ces méthodes est la suivante :

- 1) équations de biomasse spécifiques pour chaque type forestier et/ou chaque essence ;
- 2) facteurs d'expansion spécifiques pour chaque type forestier et/ou chaque essence ;
- 3) équations de biomasses génériques ou facteurs d'expansion disponibles au niveau national ;
- 4) facteurs d'expansion et/ou équations de biomasse de pays limitrophes/d'une région éco-climatique semblable. Parfois (4) est préférable à (3).

Le Grand-Duché de Luxembourg ne disposant ni d'équations allométriques ni de facteurs d'expansion de biomasses propres (Lowe *et al.*, 2000 ; Cienicala & Exnerova, 2010), nous avons donc recouru aux données d'autres pays, en essayant, dans la mesure du possible et des données disponibles, de rester dans des conditions éco-climatiques et sylvicoles relativement proches. Cette façon de procéder n'est pas exempte d'incertitudes. Celles-ci seront également discutées ci-dessous.

3.2.1. Facteurs d'expansion de la biomasse (BEFs)

Les calculs effectués pour estimer la biomasse ligneuse aérienne totale et la biomasse des branches sont les suivants :

$$\text{Biomasse}_{\text{tot}} [\text{kg}] = V_{\text{BF}} * \text{densité basale} * \text{BEF}^{17}$$

$$\text{Biomasse}_{\text{BR}} [\text{kg}] = (V_{\text{BF}} * \text{densité basale}) * (\text{BEF}-1)$$

Où V_{BF} :

Volume bois fort des arbres éclaircis ; variable connue via les tables de production transmises par l'Administration des Eaux et Forêts du Grand-Duché, à savoir :

- hêtre Schober éclaircie moyenne 1967 ;
- chêne Jüttner éclaircie moyenne 1955 ;
- épicéa Thill éclaircie moyenne (traitement C) 1988 ;
- douglas Rondeux éclaircie moyenne 1991 ;
- chêne taillis Gross éclaircie moyenne 1950.

$$\text{Densité basale}^{18} : \frac{\text{masse anhydre}}{\text{volume vert}}$$

¹⁷ Il s'agit, au coefficient de concentration en carbone près, de l'équation de stocks de C (Dupouey *et al.*, 2000 ; Joosten *et al.*, 2004)

¹⁸ La masse anhydride est obtenue par séchage à 65°C ou 105°C suivant les auteurs

La densité basale est un des facteurs qui affecte le plus les calculs de stocks (Cienciala et Exnerova, 2010) car une faible erreur d'estimation a un effet multiplicateur important. Un rapide tour de la littérature a permis de mettre en lumière une forte variabilité régionale de celle-ci (e.g. Joosten and Schultze, 2002 ; Lundgren & Persson, 2002).

La compilation de valeurs de densité basale trouvées dans la littérature a confirmé cette variabilité. Nous n'avons donc considéré que les données allemandes (Dietz, 1975 ; Burschel *et al.*, 1993 ; Baritz and Strich, 2000 ; Grote, 2002) et belges (Vande Walle *et al.*, 2005).

Les valeurs retenues sont les suivantes (Tableau 21) :

Tableau 21. Valeur des densités basales retenues dans ce travail pour chacune des essences étudiées.

essence	Densité basale ¹⁹
Chêne	560
Hêtre	560
Epicéa	380
Douglas	450

BEF

Il existe une forte variation des facteurs d'expansion utilisés dans les différents pays européens (e.g. Löwe *et al.*, 2000), les raisons de ces différences étant notamment à chercher du côté de la terminologie floue et non standardisée (Joosten *et al.*, 2004 ; Somogyi *et al.*, 2007) : on parle indifféremment de « biomass expansion factors » pour passer d'un « volume tige » à une « masse tige » ou à une « masse totale », entre deux volumes ou deux masses, comme l'illustre la Figure 4.

Il est donc indispensable de connaître le compartiment duquel on part et celui vers lequel on étend ou convertit (Somogyi *et al.*, 2007, 2008). Ceci est d'autant plus important que certains pays européens calculent leurs BEFs uniquement pour la biomasse aérienne tandis que d'autres incluent également les racines (Lowe *et al.*, 2000).

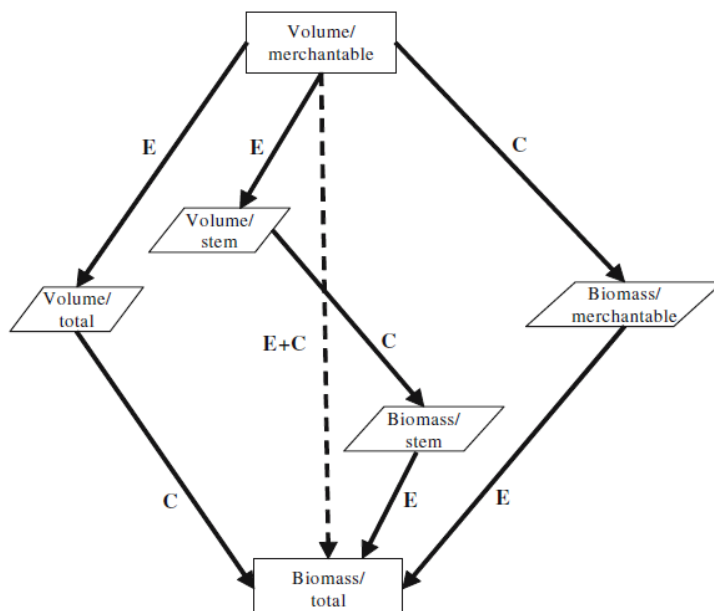


Figure 4. Illustration de différentes façons d'estimer la biomasse totale à partir du volume commercial. E : expansion ; C : conversion. (issue de Somogyi *et al.*, 2007).

¹⁹ Une densité est normalement adimensionnelle. Toutefois, on la confond souvent avec une masse volumique. Les unités de mesure des données présentées dans le tableau seraient donc des kg*m³.

Plusieurs sources permettent d'obtenir des facteurs d'expansion pour les forêts tempérées, soit par type de forêt, soit par essence. Sont présentées ci-après celles qui ont été consultées en raison de leur citation fréquente :

- 1) L'IPCC (2003, 2006) : donne quelques valeurs de BEFs « par défaut » pour de grandes zones climatiques et les types forestiers majeurs dans le cadre de l'estimation de stocks de carbone au niveau mondial (voir, dans ces documents, l'annexe 3A (2003) et le chapitre 4 (2006))²⁰ mais encourage le développement de données (BEFs ou équations) propres à chaque pays ;
- 2) L'action européenne Cost E21 (Baritz & Strich, 2000 ; Laitat *et al.*, 2000 ; Lowe *et al.*, 2000 ; Pignard *et al.*, 2000) a été le cadre de travail stimulant pour la synthèse de données et méthodes des pays participants et la mise en lumière des divergences au sein même de l'Europe ;
- 3) Le projet CarboInvent, mené dans six pays européens (dont l'Allemagne) pour améliorer les estimations des « budgets carbone » à l'aide du modèle EFISCEN. Ce modèle se base sur une série de facteurs d'expansion et d'équations de biomasse qui ont été « revus et corrigés » à l'aide d'un certain nombre d'études plus ou moins récentes sur le sujet (Vilén *et al.*, 2005) ;
- 4) La base de données « ABC factors database » du projet GHG AFOLU de la Commission Européenne (Somogyi *et al.*, 2008 ; Cienciala & Exnerova, 2010), disponible en ligne (http://fi.jrc.it/BEF_selection.cfm). Elle contient des valeurs pour 22 pays, 29 genres et 50 espèces ainsi que les références des documents, rapports ou articles dont sont issues les données ;
- 5) Différentes études proposant des BEFs plus spécifiques et qui ont été ou non retenues en fonction de leur pertinence par rapport au contexte de ce travail (Lehtonen *et al.*, 2004 ; Lévy *et al.*, 2004 ; Van Camp *et al.*, 2004 ; Jalkanen *et al.*, 2005 ; Vande Walle *et al.*, 2005 ; Lehtonen *et al.*, 2007 ; Pajtik *et al.*, 2008 ; Teobaldelli *et al.*, 2009).

Nous nous sommes concentrés sur les valeurs données par la France, la Belgique et l'Allemagne (Tableau 22) pour finalement retenir celles de Baritz and Strich (2000). Nous nous servirons de celles de Vande Walle *et al.*, (2005) pour discuter la nécessité du choix judicieux du facteur d'expansion (voir 3.3.3). Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- la France a davantage développé l'utilisation des équations de biomasse. D'autre part, les BEFs disponibles sont soit très variables d'un projet à l'autre (Lousteau *et al.*, 2004) soit englobent la partie souterraine (Lowe *et al.*, 2000) ;
- la Belgique inclut la souche dans son calcul (valeurs issues de COST E21) ou le feuillage (Vande Walle *et al.*, 2005) ;
- L'Allemagne ne considère qu'une expansion aux compartiments de la biomasse aérienne (Facteur d'expansion : volume ligneux aérien total/ volume du bois > 7 cm de diamètre) en ce qui concerne les données de Baritz & Strich (2000).

Tableau 22. Valeurs des facteurs d'expansion dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg.

	France	Belgique		Allemagne
Références	COST E21 Pignard <i>et al.</i> , 2000 ²¹	COST E21	Vande Walle <i>et al.</i> , 2005 ²²	COST E21 Baritz and Strich, 2000
Hêtre	1.7	1.42	1.34	1.24
Chêne	1.6	1.39	1.32	
Douglas	1.125	1.29	1.28	1.14
Epicéa		1.30	1.29	

²⁰ Attention, il existe deux méthodes d'estimations des stocks de C : la méthode des changements de stocks de biomasse et celles des accroissements. Les BEFs donnés par l'IPCC dépendent de la méthode et de l'équation correspondante.

²¹ Volume (tige+branches)/volume tige

²² Total aérien (feuillage inclu)/ total ligneux

3.2.2. Equations de biomasse

Les équations dont il est question sont spécifiques à l'estimation de la biomasse des branches. Celles-ci ont été trouvées via :

- des articles présentent à la fois des équations allométriques de biomasse et de minéralomasse ;
- des articles considérés comme « référence en la matière » ou, du moins, étant à la base de rapports et d'études nationaux ou européens (e.g. CarboInvent Annexe 1 de Vilén *et al.*, 2005).
- la compilation de Zianis *et al.* (2005) et l'addendum de Muukkonen and Mäkipää (2006), après vérification, autant que possible²³, des conditions dans lesquelles elles ont été établies. Cette base de données est désormais disponible en ligne et maintenue à jour par le « Finnish Forest Research Institute (Metla) » (www.metla.fi/hanke/3306/appendix-A.xls et www.metla.fi/hanke/3306/appendix-BC.xls).

La forme générale des équations est la suivante :

$$\text{Biomasse [kg]} = a * x^b$$

Où a et b sont des coefficients empiriques fonction notamment de l'essence et des conditions de site (essence, site, climat, ...)

x : est le diamètre à hauteur d'homme (dbh), généralement en cm.

Le diamètre explique une grande partie de la variation. Néanmoins, l'incorporation de la hauteur dans la formule améliore la précision des prédictions (Joosten *et al.*, 2004). C'est également l'avis de Wirth *et al.* (2004) et Wutzler *et al.*, (2008), qui montrent que les meilleurs modèles contiennent des combinaisons du diamètre, de la hauteur et de l'âge. Il est toutefois nécessaire de trouver un compromis entre l'augmentation du nombre de variables (ce qui réduit les biais de prédiction) et la limitation à une ou deux variables explicatives (afin de diminuer la variabilité des prédictions) (Wirth *et al.*, 2004). Enfin, l'utilisation de l'une ou l'autre équation dépend également des mesures disponibles. C'est ainsi que nous n'avons pas pu utiliser toutes celles que nous avons trouvées, notamment celles présentées par Ranger & Nys (1996), Ranger *et al.*, (1997) ou Ponette *et al.*, (2001), car elles se basent sur des grandeurs dont nous ne disposons pas (mesure du diamètre des branches à 10 cm de l'insertion avec la tige par exemple).

Les équations sur lesquelles se basent ce travail sont listées à l'annexe VIII. Nous présentons par contre une illustration graphique de celles-ci aux Figures 5 à 8. Certaines d'entre elles nécessitant des valeurs de hauteur voire d'âge, nous nous sommes servis, le cas échéant, des données fournies par les tables de production précédemment citées (classe de fertilité 1). Cependant, les tables de l'épicéa (Till, 1988) et du douglas (Rondeux, 1991) étant basées sur la circonférence à 150 cm (et non à 130 cm) d'une part et sur la hauteur dominante d'autre part, nous avons dû :

- utiliser les tables de cubage de Dagnelie *et al.* (1999) pour établir la conversion de diamètre entre les deux hauteurs ;
- estimer la hauteur totale ou moyenne à partir d'une équation fournie par soit Bartelink (1996), soit par Näslund (1937) et obtenue via Muukkonen (2007) et dans laquelle la hauteur est fonction du diamètre.

²³ Plusieurs des équations de biomasse pour les branches d'épicéa, de hêtre et de chênes (O. Petrae et robur) sont issues d'un numéro spécial d'Austrian Journal of Forest Science qui n'a malheureusement pu être consulté directement.

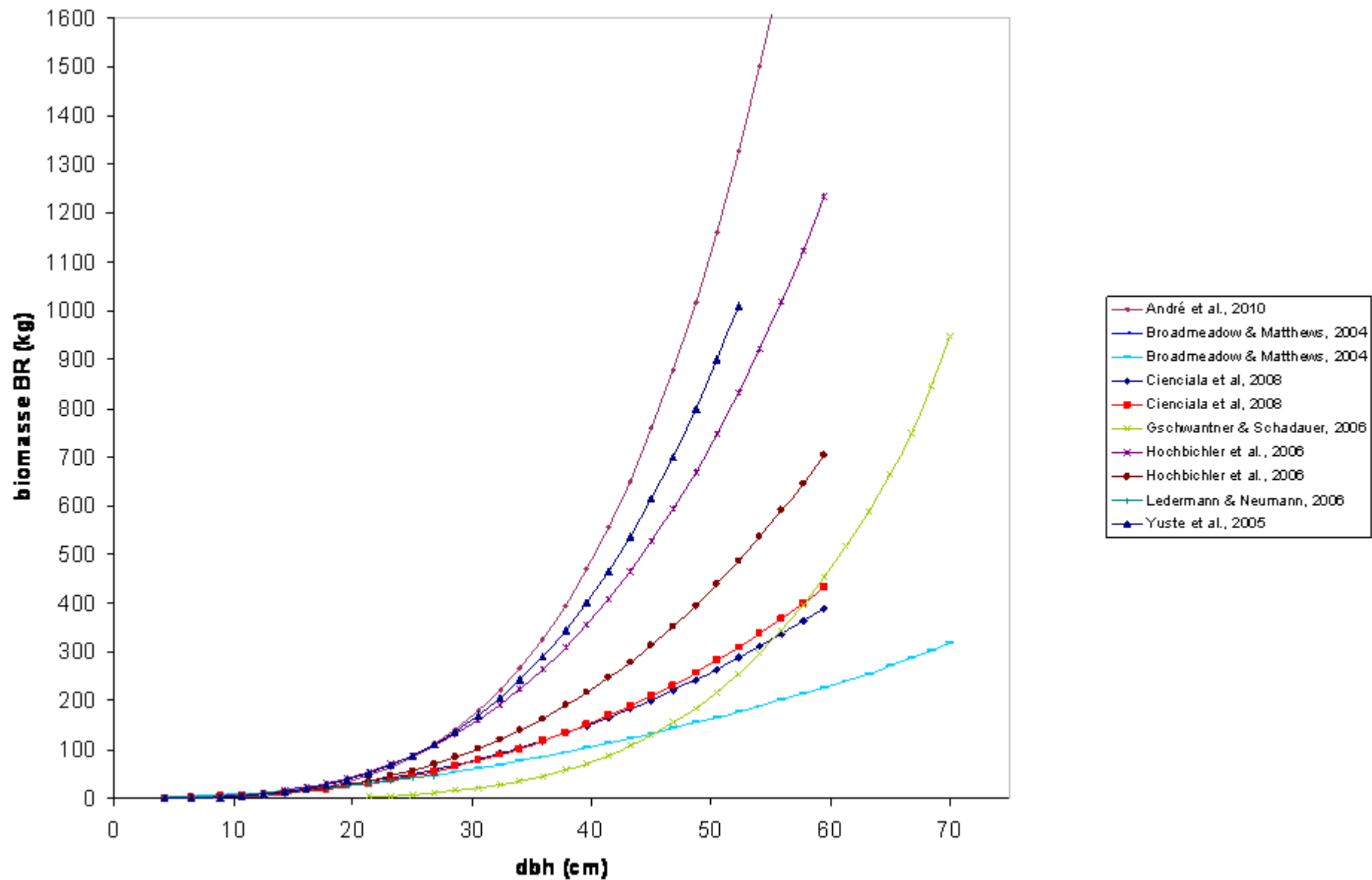


Figure 5. Evolution de la biomasse des branches pour le chêne en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 46 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.

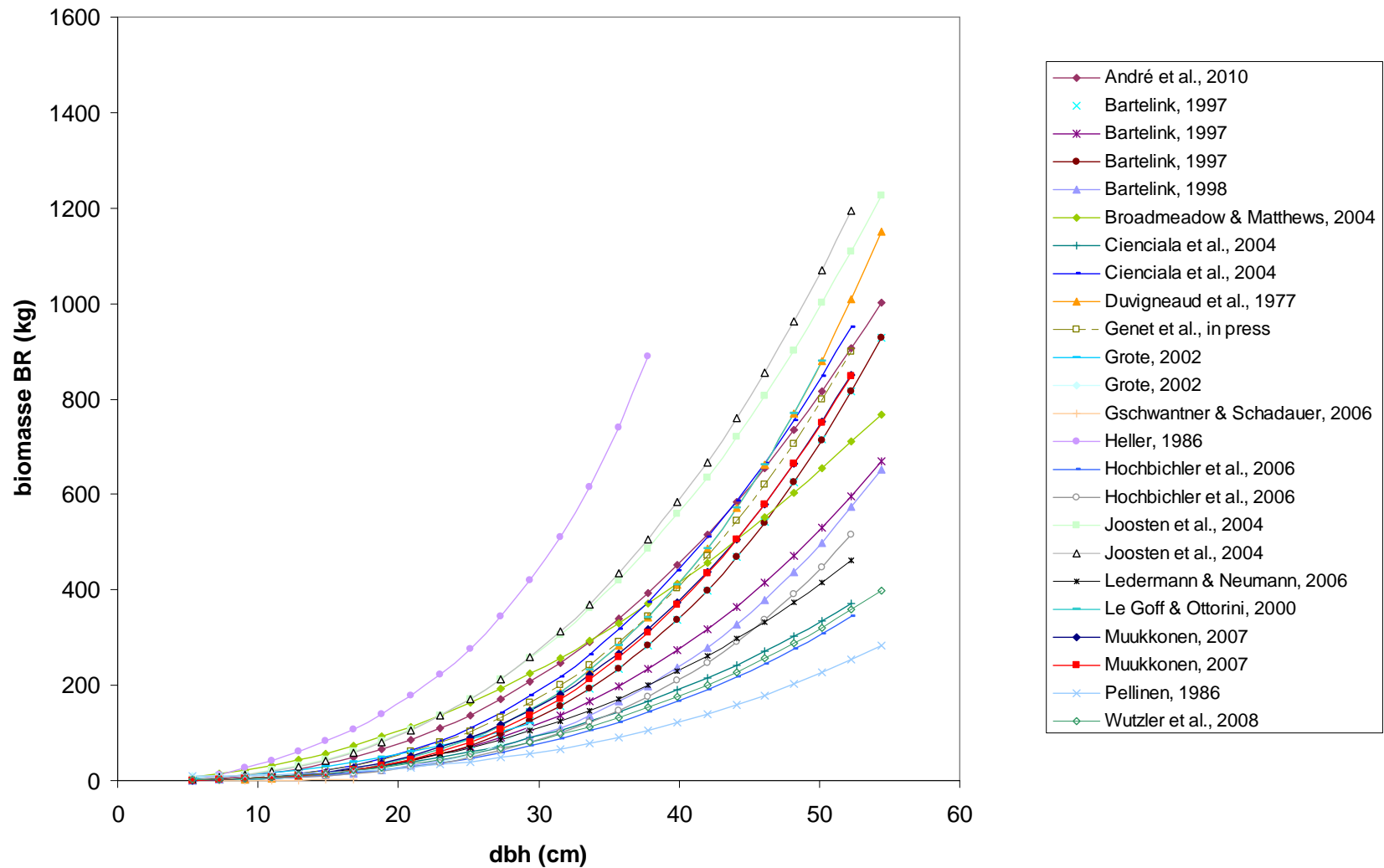


Figure 6. Evolution de la biomasse des branches pour le hêtre en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 47 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.

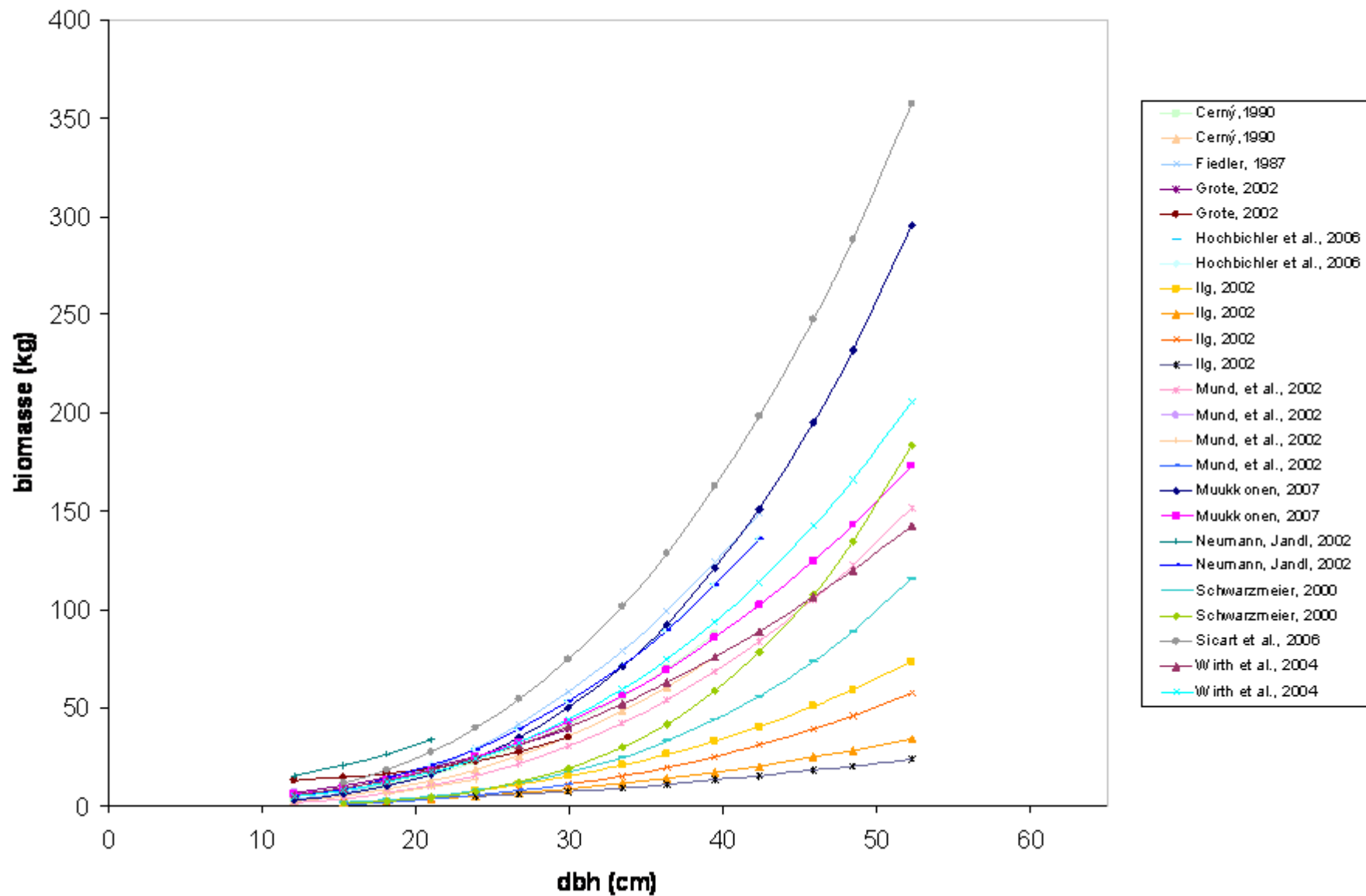


Figure 7. Evolution de la biomasse des branches pour l'épicéa en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 48 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.

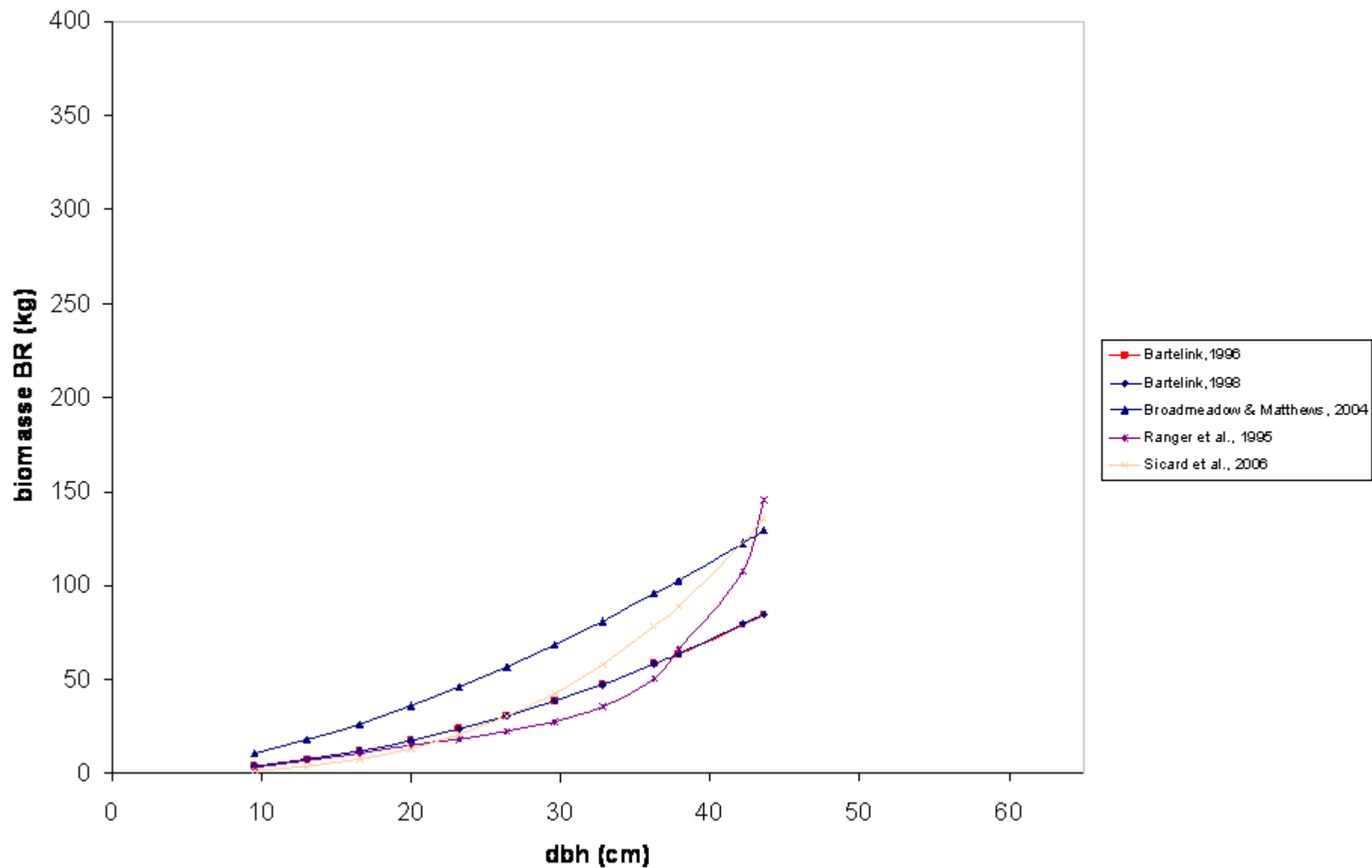


Figure 8. Evolution de la biomasse des branches pour le douglas en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 48 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.

On remarque que le nombre d'équations de biomasse des branches décroît fortement entre le hêtre (17) et le douglas (4) en passant par l'épicéa (11) et le chêne (7). Par ailleurs, on observe également un écart substantiel entre les courbes minimale et maximale et ce, malgré le respect des gammes de diamètres et, dans la mesure du possible, des hauteurs imposés par les différents auteurs²⁴. Dans une synthèse des approches employées pour estimer les stocks de carbone, Raupach *et al.* (2005) constataient que les incertitudes sur les données étaient aussi importantes que les données elles-mêmes.

N'ayant pas suffisamment d'arguments privilégiant l'utilisation de l'une ou l'autre courbe, nous avons opté pour la construction d'une « courbe moyenne », de forme générique $a \cdot dbh^b$ (dbh : diameter at breast height), générée à partir des différentes équations disponibles pour une essence donnée (voir Annexe VIII). Comme ces dernières n'ont pas été développées à partir du même nombre d'arbres, il nous a semblé important d'en tenir compte en introduisant une pondération. De cette manière, une équation générique (par ex. celle de Genet *et al.*, in press pour le hêtre ou celle de Wirth *et al.*, 2004 pour l'épicéa) compte davantage qu'une autre résultant d'une étude locale. Concrètement, nous avons tout d'abord estimé les couples x-y (diamètre-biomasse de branches) à partir d'une série de diamètres arbitrairement choisis (de 5 cm en 5 cm dans l'intervalle de valeurs données par les auteurs) pour chacune des équations. Ensuite, cette gamme a été dupliquée en fonction de sa taille, en considérant arbitrairement que 10 arbres équivalent à une série de valeurs de diamètre (par ex. une étude portant sur 260 arbres a été multipliée 26 fois). Enfin, nous avons utilisé cet ensemble de x-y généré par toutes les équations (pondérées par leur importance) comme support pour définir « l'équation moyenne » à l'aide du logiciel statistique JMP-8. Nous attirons l'attention sur le fait que ces courbes moyennes n'ont pas fait l'objet de considérations statistiques approfondies et qu'il n'est donc pas souhaitable de les utiliser en dehors du cadre de ce travail.

Les courbes suivantes ont été obtenues :

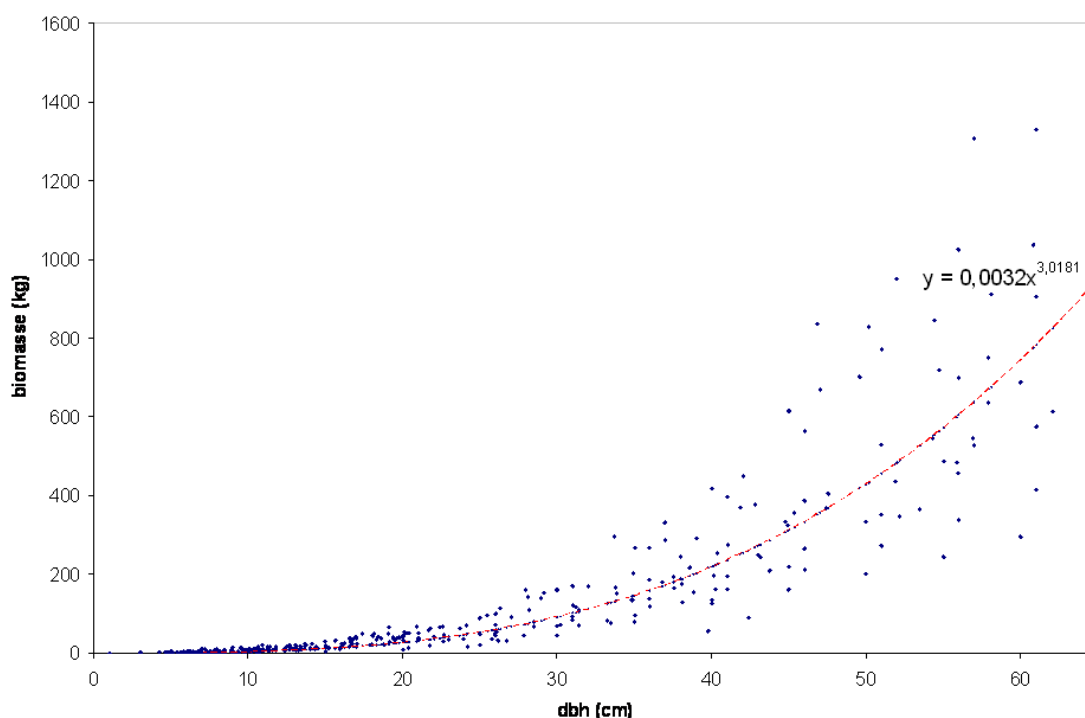


Figure 9. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de chêne à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.

²⁴ Pour les équations comprenant à la fois le diamètre et la hauteur comme variables explicatives, si la hauteur calculée pour un diamètre donné n'appartenait pas à la gamme donnée par les auteurs, le résultat n'a pas été pris en compte.

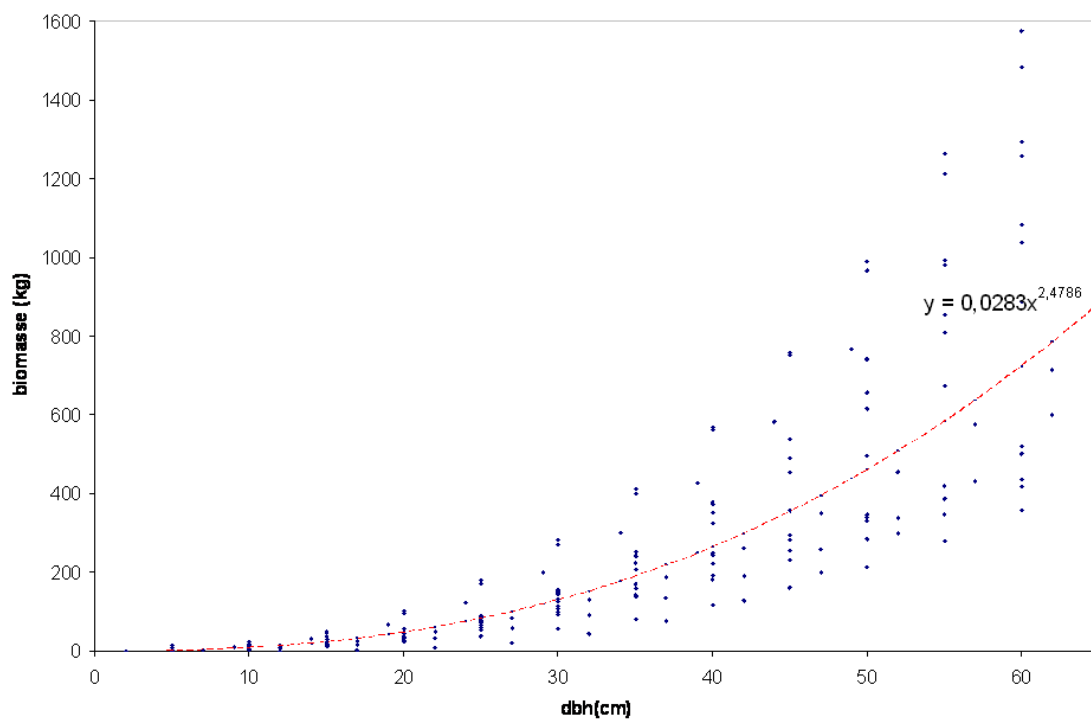


Figure 10. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de hêtre à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.

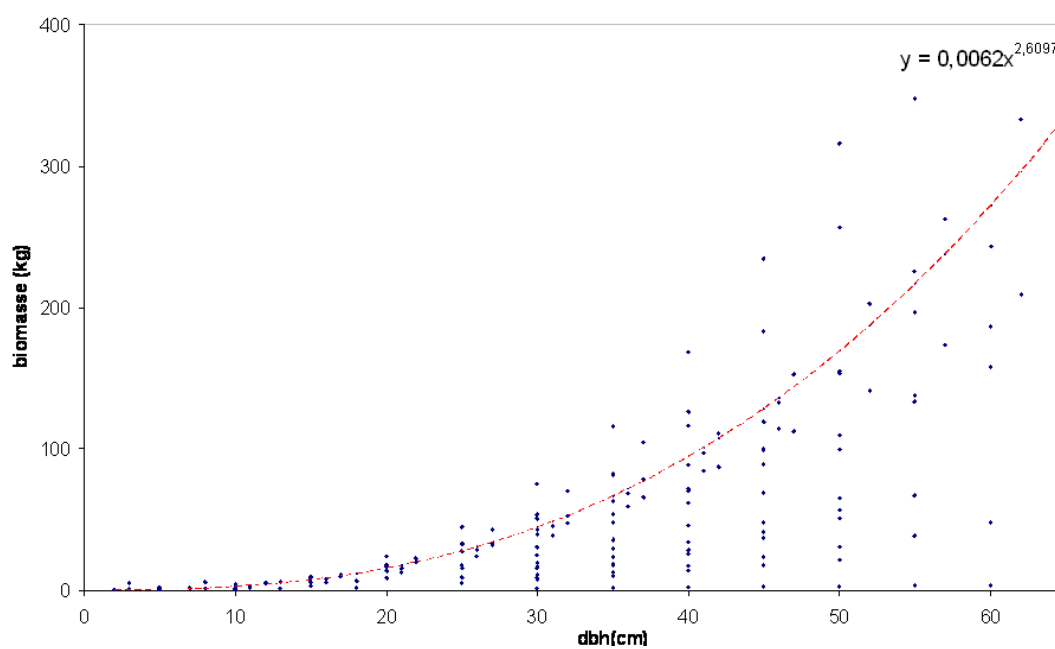


Figure 11. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches d'épicéa à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.

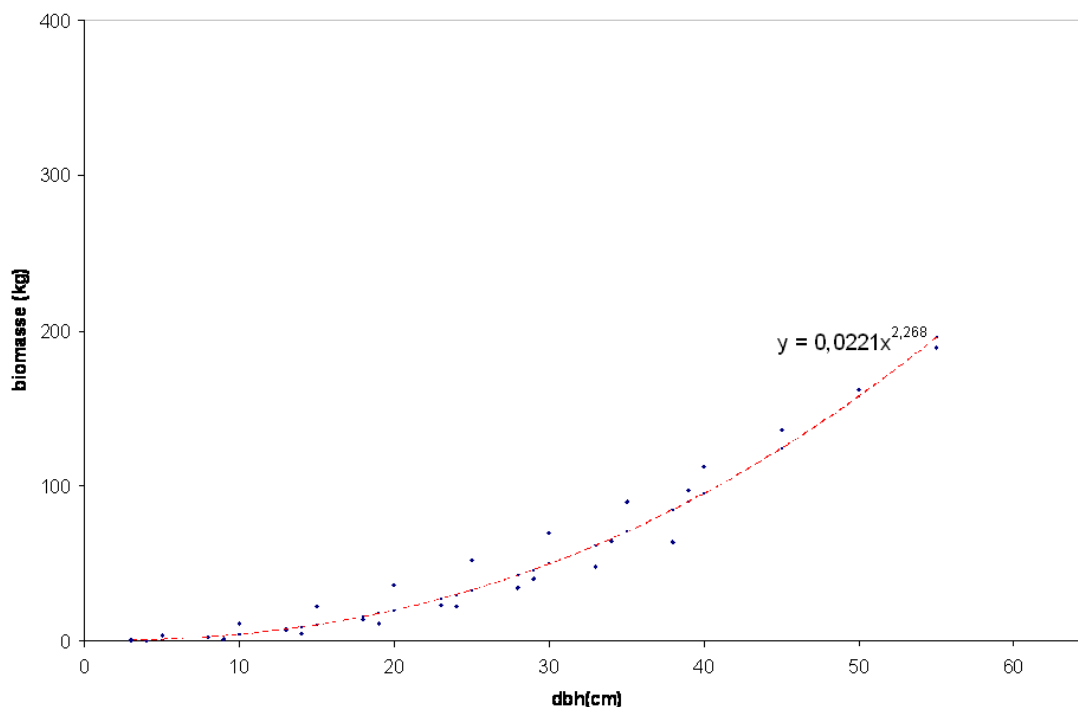


Figure 12. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de douglas à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.

Sur les quatre simulations avec JMP, seules celles de l'épicéa et du douglas ont convergé²⁵. Nous avons, par après, également constaté que les estimations de biomasse des branches d'épicéa obtenues grâce à la courbe moyenne sont presque identiques à celles données par l'équation de Wirth *et al.* (2004), considérée comme équation de référence pour cette essence en Allemagne et conseillée pour le Grand-Duché (cfr sources de données du modèle EFISCEN).

Pour le hêtre et le chêne, la convergence a dû être forcée manuellement, c'est-à-dire que, puisqu'il était impossible de diminuer la fonction objective, nous avons accepté l'estimation des paramètres là où se sont arrêtées les itérations. Cela réduit, bien évidemment, la qualité de la courbe de sortie. On constate en effet que l'écart entre la courbe moyenne et la toute nouvelle équation générique de Genet *et al.*, (in press) croît au fur et à mesure que le diamètre augmente, ce qui semble indiquer une sous-estimation de la biomasse pour les arbres les plus gros. Pour le chêne, la première simulation n'a pas fourni une équation satisfaisante (coefficients assez différents de ceux des trois autres essences et sous-estimation manifeste des estimations par rapport à celles données par les équations de la littérature et le BEF). Nous avons donc recommencé une simulation à partir de ces mêmes données (estimées) auxquelles ont été ajoutées des données expérimentales issues d'un travail conjoint entre l'INRA et l'UCL sur le chêne, travail qui doit lui-même déboucher, d'ici quelques années, sur une proposition d'équations génériques de biomasse et minéralomasse pour cette essence.

3.2.3. Limites des deux méthodes indirectes d'estimation de la biomasse des branches

Au vu de ce qui est présenté ci-dessous, il apparaît clairement que nous ne pourrions vraisemblablement pas avoir mieux qu'une « idée globale » des quantités exportées. Il nous semble dès lors important, avant de passer aux estimations d'exportations sensu stricto, de balayer les différentes raisons de ces incertitudes, dues d'une part, dans le contexte scientifique actuel et, d'autre part, aux conditions propres à l'étude.

²⁵ C'est-à-dire que le critère de convergence a été atteint pour chacun des paramètres. Le critère de convergence est la valeur de l'ajustement des paramètres qui permet au programme de décider de la fin des itérations. Plus celui-ci est faible, plus la précision est grande.

Au niveau de la communauté scientifique, Teobaldelli *et al.* (2009) ou Freudenschuß & Weiss (2010) rappellent qu'une grande incertitude entoure encore les BEFs et les équations de biomasses en raison, notamment, de problèmes méthodologiques et/ou d'un manque d'acquisition de certaines données.

Parmi les inconvénients d'ordre général fréquemment évoqués, on note :

- un manque de consensus méthodologique et terminologique entre pays, ne fût-ce qu'au niveau de l'Europe des 27, tant pour les BEFs que pour les équations (Lowe *et al.*, 2000 ; Joosten *et al.*, 2004 ; Pajtik *et al.*, 2008) ;
- une trop faible représentativité des échantillons sur lesquels sont développés les facteurs ou les équations de biomasse (Wutzler *et al.*, 2008) ;
- une précision des estimations assez faible pour les compartiments du houppier (branches, feuillage) (Wirth *et al.*, 2004 cité par Pajtik *et al.*, 2008 ; Cienicala *et al.*, 2005 ; Albaugh *et al.*, 2009), en partie explicable par la large gamme de variation des proportions de bois < 7 cm (Burschel *et al.*, 1993 ; Joosten and Schultze, 2002) ;

Parmi les points faibles plus spécifiques à chacune des méthodes, il est important d'évoquer:

BEFs

- que les BEFs sont considérés, à tort, comme constants.

On peut facilement se rendre compte de la variation de ceux-ci avec l'âge et/ou le diamètre dans différentes figures issues d'articles précédemment cités (Bartelink, 1996 : Figures 2 et 4 ; Wirth *et al.*, 2004 : Figure 6 ; dans Cienicala *et al.*, 2008 : Figure 1 ; André *et al.*, 2010 : Figure 2). Les facteurs principaux de variation repris dans la littérature (sans qu'il n'y ait consensus sur tous) sont : la région éco-climatique, l'essence, l'âge du peuplement/le stade de développement ou encore la sylviculture (densité de peuplement, historique sylvicole,...) (Bartelink, 1998 ; Lehtonen *et al.*, 2004 ; Jalkanen *et al.*, 2005 ; Vallet *et al.*, 2006, Teobaldelli *et al.*, 2009) ;

- qu'une source d'erreur supplémentaire est introduite si les densités basales ne sont pas mesurées dans le cadre de l'étude mais estimées ;

Equations de biomasse :

- qu'il existe des équations allométriques de formes mathématiques diverses, ce qui rend les comparaisons difficiles ;
- que les régressions sont parfois utilisées en dehors du cadre d'obtention de celles-ci (transposition sur des surfaces plus larges, à des diamètres plus petits ou plus grands par exemple) (Zianis *et al.*, 2004 ; Wirth *et al.*, 2004) ;
- que la valeur de densité est intégrée à un des coefficients de l'équation ; l'utilisateur de l'équation n'a pas la possibilité de contrôler de la valeur de celle-ci ;
- que les équations sont rarement établies en tenant compte de différences de fertilité des stations ;

Au niveau du travail, plusieurs points rentrent en ligne de compte :

- l'incorporation de certaines études dans la région éco-climatique pourrait être contestée (équations de la République Tchèque par exemple). Toutefois, celles-ci étant intégrées dans des recherches plus larges d'estimation de biomasse (Wirth *et al.*, 2004 ; Vilén *et al.*, 2005 ; Wutzler *et al.*, 2008 ; Genet *et al.*, in press) et leur utilisation étant préconisée pour le Grand-Duché de Luxembourg (cfr sources de données du modèle EFISCEN) nous ne les avons pas écartées ;

- les équations sont utilisées, sans faire de distinction quant aux différences de régimes éventuelles (exception faite de la distinction entre les futaies et taillis de chêne) ;
- les calculs sont réalisés dans le cadre idéal mais irréaliste de peuplements purs équiennes (condition d'utilisation des tables de production) soumis à une sylviculture moyenne ;
- les compartiments pris en compte et comparés ne sont peut-être pas tous strictement identiques. En effet, il y a parfois peu de précisions quant aux diamètres limites des branches dans les articles ou concernant l'incorporation ou non de rameaux de l'année et des branches mortes. Cette remarque est similaire à celle de Wutzler *et al.*, (2008), qui signalaient que de larges différences d'estimation pouvaient être imputables non pas aux différences environnementales mais à celles des protocoles d'échantillonnage.
- Nous n'avons absolument aucune maîtrise de la propagation des erreurs.

En cas d'étude ultérieure plus approfondie, l'établissement d'équations ou/et de coefficients d'expansion de biomasse spécifiques au Grand-Duché serait sans doute judicieux. Toutefois, compte tenu de la lourdeur de travail que cela représente pour un résultat qui, à l'heure actuelle, est encore fort soumis aux incertitudes, nous préconisons plutôt les améliorations suivantes :

- utiliser des données de diamètre, hauteur et âge des éclaircies des placettes de l'inventaire forestier national plutôt que celles des tables de production ;
- évaluer la répartition de biomasse entre la tige et le houppier dans différents types de forêts au Grand-Duché de Luxembourg pour valider l'utilisation des BEFs allemands ou belges ;
- tenir compte des avancées scientifiques les plus récentes, notamment les travaux concernant le développement d'équations de biomasse spécifiques à chaque essence à un niveau transnational (travaux d'Astrid Genet, travaux en cours UCL-INRA) ou intégrant la variation des BEFs avec l'âge, ce qui permettrait, entre autre, de mieux prendre en compte le caractère « vieille futaie » des peuplements grand-ducaux.

3.2.4. Cas particulier des taillis

Disposer d'une estimation des minéralomasses exportées par exploitation des taillis de chêne aurait été fort intéressant, d'autant plus que ceux-ci se retrouvent presque exclusivement sur les sols schisteux ou schisto-gréseux de l'Oesling, classés parmi les moins riches au niveau chimique. Cependant, les remarques soulevées par les quelques études sur le sujet (Metayer, 1979 ; Nys *et al.*, 1983 ; Auclair & Bige ; 1984 ; Bouchon *et al.*, 1985 ; Millier *et al.*, 1986) et les difficultés rencontrées dans les estimations des minéralomasses exportées dans les futaies équiennes monospécifiques nous en ont dissuadés.

Les différentes raisons ayant motivé ce choix sont reprises ci-après :

Au niveau des concentrations par compartiments :

Les articles de Nys *et al.* (1983) et Bouchon *et al.* (1985) fournissent des valeurs de concentrations pour différents compartiments de taillis ardennais. Malheureusement, les catégories choisies pour les tiges principales sont différentes (tronc et écorce « totaux » dans un cas, tronc et écorce à différentes découpes sans précision de la proportion de chacune d'elles dans l'autre cas), ce qui complique les comparaisons. Ensuite, ces auteurs ne donnant ni des valeurs de concentrations pour le compartiment « tronc entier » ni le pourcentage entre l'écorce et le tronc, l'estimation de celles-ci nous est difficile. Enfin, un article de Millier *et al.* (1986) portant sur l'échantillonnage dans l'étude la minéralomasse forestière met en lumière la nécessité d'avoir un nombre minimum d'arbres, lequel n'est pas du tout

atteint dans l'article de Nys et al. (1983) (7 chênes maximum) et insuffisant dans le cas de Bouchon *et al.* (1985) (20 arbres par essences et par station).

Au niveau de l'estimation de la biomasse :

Plusieurs difficultés sont apparues. Tout d'abord dans le choix des facteurs d'expansion et des équations de biomasse. En effet, dans le premier cas, seules deux sources fournissent un « coefficient multiplicateur » pour les taillis et ceux-ci sont relativement différents : 1,52 (Bouchon *et al.*, 1985)²⁶ et 1,82 (Auclair & Metayer, 1980 ; valeur citée par Auclair & Bige, 1984 et reprise comme facteur d'expansion branches des taillis recensables par Lousteau *et al.*, 2004), avec les implications que cela comporte sur les ordres de grandeurs. Dans le second cas, plusieurs auteurs (Metayer, 1979 ; Bige, 1982 ; Bouchon *et al.*, 1985 ; Auclair & Bige, 1984 ; Jansen & Kuiper, 2004) mettent en évidence une variabilité importante dans les taillis. La comparaison des équations et/ou tarifs de biomasse de différentes études (Kestermont, 1971 ; Metayer, 1979 ; Ranger *et al.*, 1981 ; Auclair & Bige, 1984 ; Bouchon *et al.*, 1985) montre de fortes différences d'estimation de la matière sèche aérienne totale. Bouchon *et al.* (1985) proposent d'ailleurs une équation par station. En outre, une équation spécifique aux branches n'existe pas toujours. Ensuite, il existe des individus sans bois fort, pouvant constituer une quantité non négligeable dans certains peuplements (Auclair & Bige, 1984) et qui devraient être pris en compte dans le calcul total. Enfin, les taillis grand-ducaux actuels étant assez âgés et pas vraiment gérés, il serait peut-être d'abord nécessaire d'évaluer les exportations réalisées en cas de très forte éclaircie du système actuel ou de coupe totale.

Nous discuterons néanmoins des taillis de manière qualitative en même temps que les autres types de peuplement. En effet, si l'on connaît relativement peu les conséquences de ce type de gestion sur les stocks de nutriments et leur *turnover* dans le sol et la phytocénose (Hölscher *et al.*, 2001), il semble que la qualité de la litière (Balboa-Murias *et al.*, 2006) et de l'horizon superficiel (Hölscher *et al.*, 2001) soit primordiale. Une exploitation des rémanents n'est donc pas sans conséquences sur un tel système.

3.3. Minéralomasses exportées pour différents scénarios

L'estimation quantitative des minéralomasses suivant différents scénarios, dont nous allons discuter le calcul à présent, s'appuie sur les considérations développées dans les points 3.1 et 3.2.

3.3.1. Minéralomasses « bois fort »

Nous allons tout d'abord présenter les exportations de minéralomasses « de base ». En effet, quel que soit le scénario pour les rémanents, on suppose une exploitation des tiges des arbres éclaircis et ce, jusqu'à 60 ans pour le douglas, 70 ans pour l'épicéa, 140 ans pour le hêtre et 200 ans pour le chêne.

A titre d'exemple, voici les résultats obtenus pour un peuplement de hêtre d'un niveau de fertilité 1. La table de production de Schober 1967 (éclaircie modérée, classe de fertilité 1) fournit les volumes éclaircis repris dans le Tableau 23. On obtient les biomasses par multiplication de ceux-ci avec la densité basale du hêtre (Tableau 21).

²⁶ L'article donne un coefficient multiplicateur moyen de 0,85. Pour la comparaison, il est nécessaire de tenir compte de la densité basale (a priori 560 kg* m⁻³), ce qui donne le rapport de 1,52

Tableau 23. Extrait de la table de production de Schober (1967) pour un niveau d'éclaircie modérée et une classe de fertilité 1.

âge [années]	# arbres éclaircis	V _{BF} éclairci tot [m ³]	Biom. _{BF} [kg]
30	-	-	-
35	2426	-	-
40	1180	5	2800
45	688	8	4480
50	454	13	7280
55	317	18	10080
60	236	21	11760
65	182	25	14000
70	138	27	15120
75	112	29	16240
80	91	31	17360
85	74	32	17920
90	61	33	18480
95	51	33	18480
100	43	34	19040
105	36	34	19040
110	31	35	19600
115	27	35	19600
120	23	35	19600
125	20	35	19600
130	17	34	19040
135	15	34	19040
140	13	33	18480
145	12	33	18480
150	11	33	18480

On peut alors calculer les exportations minérales par ha en multipliant la somme des biomasses des arbres éclaircis jusqu'à l'âge d'exploitabilité du hêtre au Grand-Duché (140 ans) par les concentrations moyennes en éléments nutritifs de ce compartiment (Tableau 24).

Arbres éclaircis

Tableau 24. Minéralomasse totale exportée par ha par l'exploitation du bois fort des arbres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité de peuplements de hêtre (140 ans) de classe de fertilité 1.

Compartiment/élément	N	P	K	Ca	Mg
	kg*ha ⁻¹				
tronc entier	431,7	36,2	349,9	510,2	72,6

Ces minéralomasses ont été obtenues à partir de la densité basale (Tableau 21) et des concentrations médianes données au Tableau 18.

L'exploitation des seules tiges des arbres éclaircis entraîne une exportation annuelle de 3.5 à 5 kg de Ca, 3 à 4 kg de N, 2.5 kg de K et < 1 kg de Mg et P (Tableau 25).

Tableau 25. Minéralomasse exportée par ha et par an par l'exploitation du bois fort des arbres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité de peuplements de hêtre de classe de fertilité 1.

compartiment/élément	N	P	K	Ca	Mg
	kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹				
tronc entier	3,1	0,3	2,5	3,6	0,5

La même démarche peut-être appliquée pour chacune des essences et chaque classe de fertilité²⁷. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 26. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des chênes éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹				
0	921	65	597	1587	75
1	760	53	492	1309	62
2	573	40	371	986	47
3	357	25	231	615	29
4	136	10	88	234	11

Tableau 27. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des hêtres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹				
0	510	43	413	603	86
1	432	36	350	510	73
2	346	29	280	409	58
3	255	21	207	301	43
4	177	15	144	210	30

Tableau 28. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des épicéas éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹				
0	265	26	161	294	36
1	235	23	143	261	32
2	205	20	125	228	28
3	162	16	98	180	22
4	124	12	75	138	17
5	92	9	56	103	13
6	66	7	40	73	9

²⁷ La classe de fertilité « 0 » n'est pas dans les tables originelles. Il s'agit d'une extrapolation réalisée par l'Administration des Eaux et Forêts pour faire face aux productivités plus importantes que celles prévues par les tables.

Tableau 29. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des douglas éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹				
0	239	19	191	136	25
1	228	18	182	130	24
2	191	15	153	109	20
3	171	14	137	98	18

La comparaison des essences entre elles nécessite qu'on remette ces chiffres dans la perspective de leur révolution propre. Les exportations annuelles à l'hectare sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 30. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des chênes éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 200 ans*.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	4,6	0,3	3,0	7,9	0,4
1	3,8	0,3	2,5	6,5	0,3
2	2,9	0,2	1,9	4,9	0,2
3	1,8	0,1	1,2	3,1	0,1
4	0,8	0,1	0,6	1,5	0,1

* sauf classe de fertilité 4 où la durée de rotation n'est que de 160 ans

Tableau 31. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des hêtres éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 140 ans.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	3,6	0,3	3,0	4,3	0,6
1	3,1	0,3	2,5	3,6	0,5
2	2,5	0,2	2,0	2,9	0,4
3	1,8	0,2	1,5	2,2	0,3
4	1,3	0,1	1,0	1,5	0,2

Tableau 32. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des épicéas éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 70 ans.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	3,8	0,4	2,3	4,2	0,5
1	3,4	0,3	2,0	3,7	0,5
2	2,9	0,3	1,8	3,3	0,4
3	2,5	0,3	1,5	2,8	0,3
4	1,8	0,2	1,1	2,0	0,2
5	1,3	0,1	0,8	1,5	0,2
6	0,9	0,1	0,6	1,0	0,1

Tableau 33. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des douglas éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 60 ans.

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	4,0	0,3	3,2	2,3	0,4
1	3,8	0,3	3,0	2,2	0,4
2	3,2	0,3	2,5	1,8	0,3
3	2,8	0,2	2,3	1,6	0,3

Les exportations annuelles en éléments nutritifs suite à l'exploitation des tiges des arbres éclaircis sont *grosso modo* comprises entre :

- 1.0 et 5.0 kg de N ;
- 0.5 et 3.2 kg de K ;
- 0.05 et 0.40 kg de P ;
- 0.1 à 0.8 kg de Mg.

Ca est l'élément qui présente le plus de variations, l'exportation étant bien plus élevée pour le chêne (jusqu'à 10 kg ha⁻¹ an⁻¹) en comparaison avec le douglas (< 2.3 kg ha⁻¹ an⁻¹).

Arbres du peuplement final

Il est également intéressant d'estimer les exportations minérales liées à l'exploitation des grumes du peuplement final (à l'âge d'exploitabilité de 200 ans pour le chêne, 140 ans pour le hêtre, 70 ans pour l'épicéa et 60 ans pour le douglas).

Tableau 34. Volume sur pied d'un peuplement à l'âge d'exploitabilité.

classe de fertilité	volume coupe finale (m ³ *ha ⁻¹)			
	chêne	hêtre	épicéa	douglas
0	574	701	673	785
1	499	617	611	718
2	424	533	549	651
3	352	451	490	586
4	249	369	430	
5			369	
6			306	

Une démarche similaire à celle des arbres éclaircis permet d'estimer les exportations minérales causées par l'exploitation du bois fort du peuplement final et ce, pour chaque essence et chaque classe de fertilité :

Tableau 35. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 200 ans (chêne).

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	2,8	0,2	1,8	4,9	0,2
1	2,5	0,2	1,6	4,2	0,2
2	2,1	0,1	1,4	3,6	0,2
3	1,7	0,1	1,1	3,0	0,1
4	1,2	0,1	0,8	2,1	0,1

Tableau 36. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 140 ans (hêtre).

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	3,7	0,3	3,0	4,4	0,6
1	3,3	0,3	2,6	3,9	0,5
2	2,8	0,2	2,3	3,3	0,5
3	2,4	0,2	1,9	2,8	0,4
4	1,9	0,2	1,6	2,3	0,3

Tableau 37. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 70 ans (épicéa).

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	4,0	0,4	2,4	4,4	0,5
1	3,7	0,4	2,3	4,2	0,5
2	3,4	0,3	2,0	3,7	0,5
3	3,0	0,3	1,8	3,3	0,4
4	2,6	0,3	1,6	2,9	0,4
5	2,3	0,2	1,4	2,5	0,3
6	1,9	0,2	1,1	2,1	0,3

Tableau 38. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 60 ans (douglas).

classe de fertilité	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
0	6,1	0,4	4,2	3,0	0,6
1	5,6	0,4	3,8	2,7	0,5
2	5,1	0,3	3,5	2,5	0,5
3	4,5	0,3	3,1	2,2	0,4

3.3.2. Minéralomasses additionnelles

Nous avons ensuite estimé quelles seraient les exportations supplémentaires en cas de plusieurs scénarios d'exploitation des rémanents, à savoir :

1. exportation des rémanents à chaque passage en éclaircie (« worse case ») ;
2. une exportation au cours de la vie du peuplement ;
 - 2a : à la première éclaircie ;
 - 2b : à une éclaircie intermédiaire ;
 - 2c : à la dernière éclaircie avant exploitation du peuplement final.
3. deux exportations au cours de la vie du peuplement ;
 - 3a : éclaircies 1 et intermédiaire (2a+2b) ;
 - 3b : première et dernière éclaircies (2a +2c) ;
 - 3c : éclaircies intermédiaire et dernière avant exploitation finale (2b+2c).
4. trois exportations (pour le chêne et le hêtre uniquement) ;
5. exploitation des rémanents du peuplement final.

Le scénario 1 est probablement (mais à dessein) exagéré afin d'évaluer le pire, en tout cas dans la limite du cadre de cette étude. Il est, en effet, peu probable que l'on exporte la totalité des rémanents, tant sur un point de vue économique que sur le plan technique (il est difficile de récolter <70% des rémanents, Terlinden, 2010). En ce qui concerne les autres scénarios, le choix de se limiter à 1, 2 voire 3 récoltes de rémanents provient de la lecture des différents travaux ayant prescrit des conseils en la matière : en effet, ceux-ci suggèrent ces restrictions, surtout si les exportations ne sont pas compensées par des apports de fertilisants (Cacot *et al.*, 2006 ; Chevalier, 2008...). Cacot *et al.* (2005) préconisent également, si plusieurs récoltes de rémanents interviennent au cours d'un cycle sylvicole, de les espacer le plus possible. Nous avons donc choisi d'en tenir compte en n'envisageant la récolte des rémanents que lors :

- de la première éclaircie (âge variable suivant l'essence et la classe de fertilité)
- de la dernière (à l'âge d'exploitabilité) ;
- d'une éclaircie intermédiaire (fixée à mi-parcours entre les deux précédentes).

Il est important de signaler que, pour ne pas devoir réaliser d'extrapolation des valeurs reprises dans les tables de production, nous avons choisi de considérer des passages en éclaircie tous les 5 ou 10 ans et non tous les 6 ou 12 ans (pour les résineux et les feuillus respectivement) comme il est généralement prévu en pratique. D'autre part, une éclaircie tous les 10 ans implique, pour le hêtre et pour le chêne, que le calcul des exportations minérales à un temps t_x prenne en considération la somme des branches à t_x et t_{x-5} (sauf pour la première éclaircie).

Les différents résultats sont détaillés pour le hêtre de classe de fertilité 1 dans le Tableau 39.

Tableau 39. Quantité exportée pour différents scénarios d'exploitation dans le cas d'un peuplement de hêtre de classe de fertilité 1.

	N		P		K		Ca		Mg	
	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.
	kg ha ⁻¹									
exportations « de base »	888		74		720		1049		149	
scénario 1	311	319	38	39	156	160	274	281	22	22
scénario 2	a	3	10	0	1	5	2	9	<0,5	1
	b	35	32	4	4	17	16	31	28	2
	c	36	33	4	4	18	16	31	29	3
scénario 3	a	37	42	5	5	19	21	33	37	3
	b	38	43	5	5	19	21	34	38	3
	c	70	65	8	8	35	33	62	57	5
scénario 4	73	75	9	9	37	38	64	66	5	5
scénario 5	329	310	40	37	165	155	290	273	23	22

BEF : estimation de la biomasse des branches via le facteur d'expansion ; Equ. : estimation via la courbe allométrique « moyenne »

Les exportations « de base » concernent le bois fort uniquement (peuplement final et arbres éclaircis). Les exportations de rémanents équivalent aux quantités d'éléments nutritifs dans la biomasse des matériaux ligneux de diamètre < 7 cm uniquement (pas de feuillage), évaluée soit par le facteur d'expansion choisi (BEF), soit par l'équation allométrique moyenne (Equ.) pour les éclaircies ou les combinaisons d'éclaircies envisagées ci-dessus. On constate qu'il peut y avoir dans certains cas, une différence d'estimation substantielle entre les deux méthodes. On remarque encore que les minéralomasses exportées lors de l'exploitation des rémanents du peuplement final (scénario 5) sont du même ordre de grandeur que celles de l'exploitation des rémanents des arbres éclaircis (scénario 1).

En ce qui concerne les scénarios 2a et 3a, les faibles exportations observées pour la première éclaircie ont une double origine : dans la quantité de biomasse exportée plus faible lors de celle-ci par rapport aux suivantes d'une part, dans la seule prise en compte des minéralomasses à t_x d'autre part.

Tableau 40. Quantité exportée annuellement pour différents scénarios d'exploitation dans le cas d'un peuplement de hêtre de classe de fertilité 1

	N		P		K		Ca		Mg		
	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.	BEF	Equ.	
kg*ha⁻¹*an⁻¹											
exportations « de base »	6,34		0,53		5,14		7,49		1,07		
scénario 1	2,22	2,28	0,27	0,28	1,11	1,14	1,96	2,01	0,16	0,16	
scénario 2	a	0,02	0,07	<0,005	0,01	0,01	0,04	0,02	0,06	<0,005	<0,005
	b	0,25	0,23	0,03	0,03	0,12	0,12	0,22	0,20	0,02	0,02
	c	0,26	0,23	0,03	0,03	0,13	0,12	0,22	0,21	0,02	0,02
scénario 3	a	0,27	0,30	0,03	0,04	0,13	0,15	0,23	0,27	0,02	0,02
	b	0,27	0,31	0,03	0,04	0,14	0,15	0,24	0,27	0,02	0,02
	c	0,50	0,47	0,06	0,06	0,25	0,23	0,44	0,41	0,04	0,03
scénario 4		0,52	0,54	0,06	0,06	0,26	0,27	0,46	0,47	0,04	0,04
scénario 5		2,35	2,21	0,28	0,27	1,18	1,11	2,07	1,95	0,17	0,16

La plus grosse exportation d'éléments nutritifs est réalisée lors de l'exploitation du bois fort. En effet, malgré le fait que celui-ci soit moins concentré en éléments nutritifs, il représente une plus forte quantité en termes de biomasse. Ceci peut sembler en contradiction avec d'autres études (e.g. Nicolas *et al.*, 2007) présentant des exportations de minéralomasses suivant divers modes d'exploitation (tronc seul versus arbre entier) et mettant en lumière la forte hausse de celles-ci pour un faible quantité de biomasse supplémentaire. Cependant, ces auteurs incluent le feuillage dans leur calcul, compartiment qui, nous l'avons montré précédemment (Tableau 17), est encore plus concentré en éléments que les matériaux ligneux de diamètre < 7 cm. Nous montrons cependant déjà bien combien le pourcentage d'augmentation en cas d'exploitation des rémanents des arbres éclaircis (scénario 1) et/ ou du peuplement final (scénario 5) est important (Figure 13 et 14). D'autre part, nos conclusions sont similaires : dans le cas particulier du hêtre de classe de fertilité 1, la production totale en bois fort (peuplement sur pied à 140 ans + éclaircies) s'élève à 672,5 tonnes environ tandis que la quantité totale des branches des arbres éclaircis avoisine les 80 tonnes. Or, l'exploitation de ces 80 tonnes de rémanents équivaut à accroître de moitié l'exportation annuelle par ha en P. On observe enfin sans surprise que limiter la fréquence d'exploitation des rémanents a un effet important sur les quantités exportées.

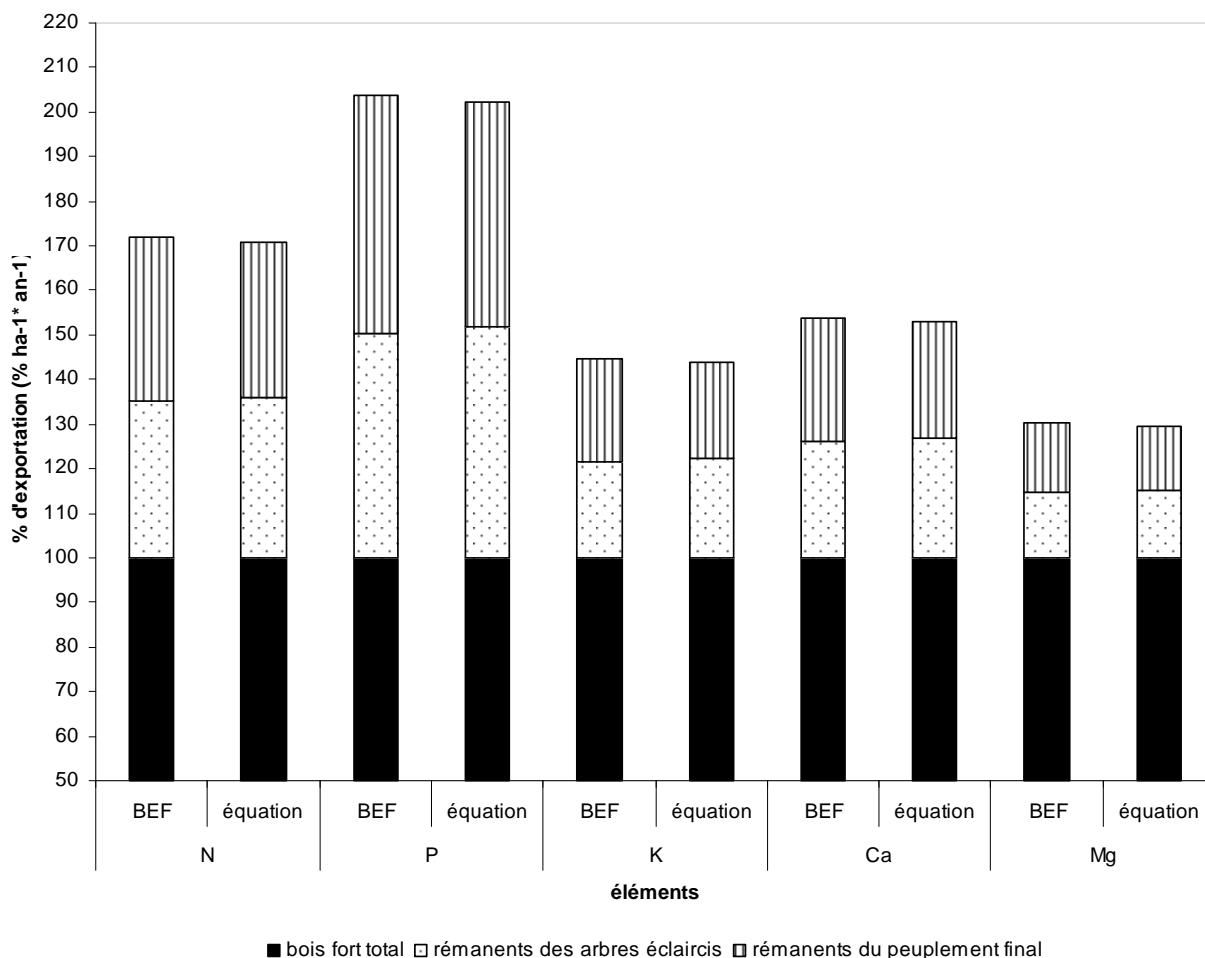


Figure 13. Illustration graphique du pourcentage d'exportation supplémentaire en éléments majeurs en cas d'exploitation des rémanents des arbres éclaircis (scénario 1) et du peuplement final (scénario 5) par rapport à l'exportation du seul bois fort (=100%) dans le cas du hêtre (classe de fertilité 1).

Des tableaux similaires aux Tableau 39 et 40 sont présentés en annexe IX pour chacune des essences, à chaque niveau de fertilité. Les minéralomasses exportées sont proportionnelles à la productivité. Pour une classe de fertilité donnée, on constate :

Pour l'exploitation du bois fort :

- que l'exportation en N et P est supérieure pour les résineux;
- que le chêne est l'essence qui exporte le plus de Ca ;
- que, pour Mg, il s'agit du hêtre;
- que le douglas a tendance à exporter davantage de K.

Pour l'exploitation des rémanents :

- les conclusions dépendent de l'expression des résultats. Par exemple en quantité totale, l'exploitation des feuillus est plus coûteuse que celles des résineux. Ramenée à la durée de rotation, l'exploitation du douglas est supérieure à celle du chêne ;
- la première éclaircie exporte davantage d'éléments minéraux chez les résineux ;
- au cours des éclaircies suivantes, les exportations les plus importantes sont réalisées pour le hêtre, puis pour le douglas et l'épicéa, ensuite pour le chêne.

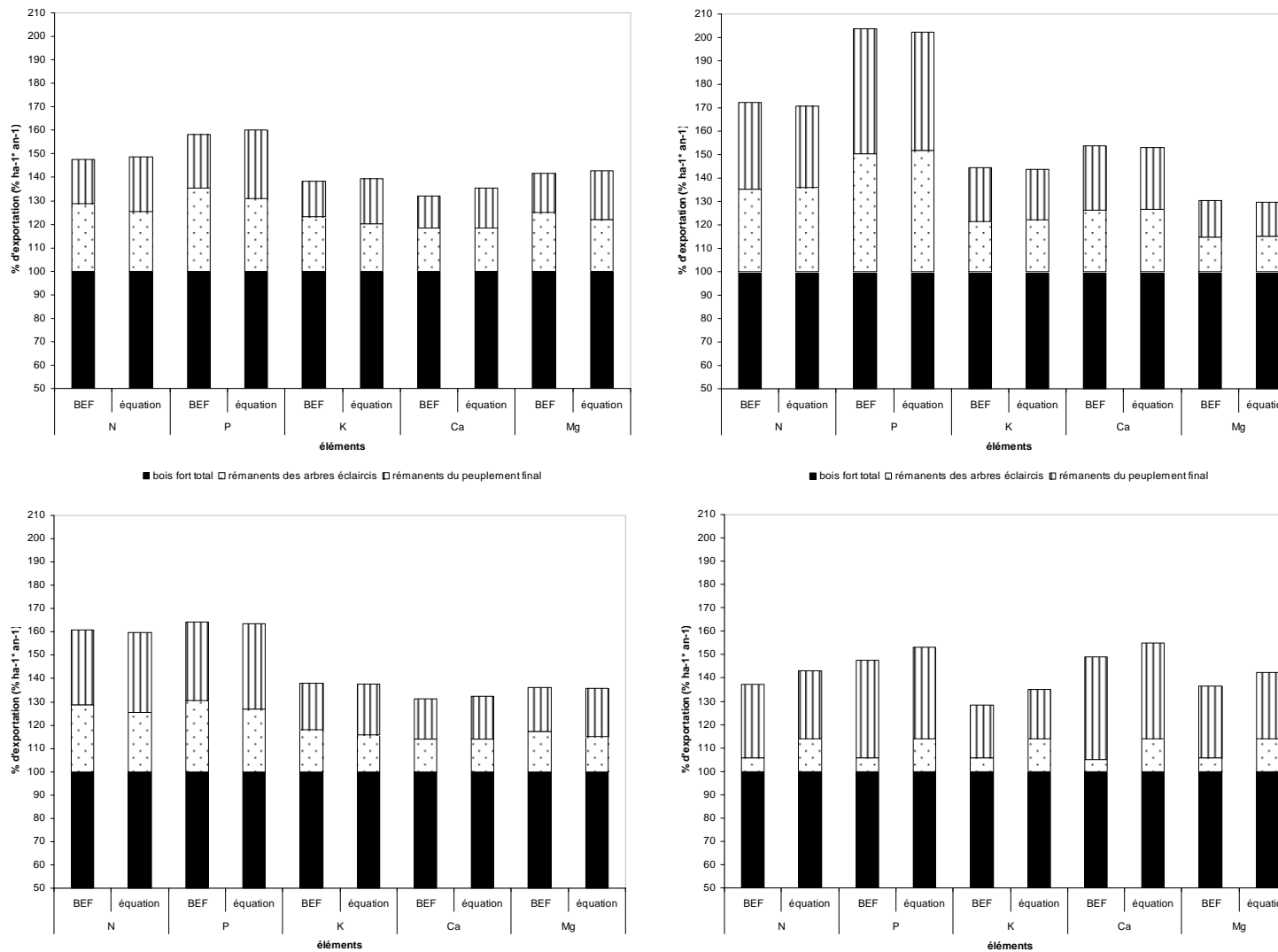


Figure 14. Comparaison des exportations additionnelles en éléments majeurs par exploitation des résidus des arbres éclaircis (scénario 1) et du peuplement final (scénario 5) par rapport à l'exportation du seul bois fort (=100%) dans le cas du chêne (en haut à gauche), du hêtre (en haut à droite), de l'épicéa (en bas à gauche) et du douglas (en bas à droite) de classe de fertilité 1. Les légendes sont semblables à celles de la Figure 13.

3.3.3. Limites des estimations

Nous l'avons déjà évoqué ci-dessus, les minéralomasses exportées en cas d'exploitation des rémanents peuvent paraître faibles comparées aux valeurs obtenues pour le bois fort. Nous voudrions maintenant nuancer ces résultats et/ou les remettre dans un contexte plus large.

A) Effets « biomasse »

Les estimations de la biomasse et de la minéralomasse des branches sont fortement dépendantes de la quantité de bois fort : plus cette dernière est importante, plus les exportations en rémanents seront importantes. En effet, le BEF étant un facteur multiplicatif basé sur le volume de la tige (ou la biomasse de celle-ci, moyennant l'utilisation de la densité du bois), ceci a pour conséquence que la quantité de rémanents (et donc la minéralomasse des branches) est supérieure dans les peuplements les plus productifs (en terme de volume de grume). Or, il est probable que les allocations entre les différentes parties de l'arbre soient différentes en fonction de la fertilité. La proportion de branches entre deux classes de fertilité ne serait donc pas identique comme le prévoit le facteur d'expansion. C'est d'ailleurs ce qui ressort de la lecture du tableau annexe de l'article de Teobaldelli *et al.*, (2009). Bartelink (1998) a également mis en exergue une différence dans la répartition de la biomasse selon la fertilité mais celle-ci se fait davantage au profit du système racinaire. En outre, rappelons qu'en considérant le BEF constant, on a supposé que la proportion de branches était identique pour tous les arbres, quel que soit leur âge, ce qui n'est pas le cas (Lehtonen *et al.*, 2004 ; Vallet *et al.*, 2006 ; Pajtik *et al.*, 2008).

Un effet similaire est observé avec les équations de biomasse : en effet, l'utilisation de la forme générique $y=a*dbh^b$ ne rend pas non plus compte des différences de fertilité puisque deux arbres de diamètre égal auront la même quantité de branches, quels que soient leur âge ou leur hauteur.

Dans le même ordre d'idée, une mauvaise estimation de la quantité de rémanents dans un système donné peut avoir de lourdes conséquences dans le budget en éléments nutritifs. Reprenons les valeurs de BEFs proposées par Vande Walle *et al.* (2005) et présentées au Tableau 22 et illustrons-le à l'aide des estimations des minéralomasses exportées pour le niveau de fertilité 1 de chaque essence.

Tableau 41. Estimation des minéralomasses exportées pour chaque essence de classe de fertilité 1 (tous les rémanents jusqu'à l'âge d'exploitabilité) par la méthode des facteurs d'expansion (valeurs de Vande Walle *et al.* (2005)).

	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
chêne	2,40	0,21	1,25	3,02	0,17
hêtre	3,15	0,38	1,58	2,78	0,22
épicéa	4,23	0,45	1,61	2,54	0,35
douglas	3,80	0,40	2,18	3,04	0,39

Ces valeurs sont en réalité « identiques » à celles du scénario 1, si ce n'est que l'estimation est basée sur les facteurs d'expansion de Baritz & Stritch (2000) (Tableau 22). La comparaison montre une augmentation des exportations minérales allant de 133 % (chêne) à 207 % (épicéa) pour une variation de BEF allant de +6 à 13 %.

B) Effets « essence »

Les résultats présentés ci-dessous montrent que le hêtre serait l'essence pour laquelle l'exportation des rémanents aurait l'effet le plus marqué sur les bilans d'éléments minéraux. Cette constatation est due à la combinaison de plusieurs éléments:

- Le hêtre présente une forte production en volume bois fort;
- La densité basale du hêtre est supérieure à celle de l'épicéa et du douglas, ce qui se marque par une différence de + 180 et + 110 kg par m³ respectivement ;
- Le facteur d'expansion est plus élevé, ce qui implique que le hêtre a plus de branches et donc, potentiellement davantage de rémanents d'exploitation ;
- Dans nos scénarios, le passage en éclaircie étant prévu tous les 10 ans, on récolte davantage dans les peuplements feuillus que dans les peuplements résineux ;

Par contre, à masses de branches égales, l'épicéa exportera davantage de N, P et Mg que le hêtre, puisque les branches du premier sont plus concentrées en ces éléments que celles du second. D'autre part, Bartelink (1998) signale que le douglas investit davantage de matière sèche dans le feuillage que le hêtre, spécialement au détriment des branches et de la tige. Ceci implique qu'une exportation des branches avec des aiguilles serait particulièrement coûteuse. Ceci est d'ailleurs confirmé par les fortes concentrations en éléments nutritifs dans ce dernier compartiment (Tableau 17).

4. Exportation des rémanents : au-delà des seuls aspects quantitatifs

4.1.1. Réflexions systémiques

La comparaison des estimations de minéralomasses exportées pour le seul bois fort aux données de dépôts atmosphériques (Tableau 42) permet de constater que celles-ci sont non seulement du même ordre de grandeur mais souvent même supérieures, et ce, d'autant plus que la productivité est élevée (ce qui est d'ailleurs le cas de bon nombre de peuplements)²⁸.

Tableau 42. Dépôts atmosphériques annuels moyens entre 1997 et 2005 mesurés hors couvert dans le bois communal de Virton (kg*ha⁻¹* an⁻¹).

Type	N (NH ₄ +NO ₃)	K	Ca	Mg
hors couvert	9,0	2,3	5,4	0,8

Ces chiffres illustrent le fait que, sans même envisager l'exploitation des rémanents, certains écosystèmes, en particulier ceux pour lesquels les apports par altération sont réduits, pourraient être dans un état d'équilibre fragile voire un déséquilibre pour certains éléments. Une exportation accrue de biomasse (et donc minéralomasse) ne viendrait que renforcer cette situation. D'autant plus que la tendance actuelle est à une réduction des dépôts atmosphériques en cations à un rythme plus soutenu que celle observée pour N d'une part et, d'autre part, à une diminution généralisée des teneurs foliaires en P (Rumpf *et al.*, 2008 ; Ilg *et al.*, 2009 ; Jonard *et al.*, 2009), ce qui se traduit par l'apparition de carences (Armbruster *et al.*, 2002) et/ou de déséquilibres dans les rapports entre éléments (Katzensteiner *et al.*, 1992). Certains chercheurs sont même encore plus pessimistes puisqu'ils estiment que ni le fait d'éviter l'exportation des rémanents ni l'écorçage mécanique ne peuvent compenser les dépôts acides dans les forêts allemandes (Joosten & Schulte, 2003).

Par ailleurs, le suivi des écosystèmes forestiers européens a mis en évidence, depuis quelques années déjà, une augmentation de la croissance et de la productivité des forêts d'Europe centrale et de l'Ouest (Spiecker *et al.*, 1996 ; Solberg *et al.*, 2009). Ceci peut notamment être illustré par la nécessité d'extrapoler les tables de production d'usage afin de rendre compte de l'accroissement de certains peuplements (niveau de fertilité « 0 »). Ce « dopage » de croissance, probablement dû à la présence d'azote en quantité suffisante (Jandl *et al.*, 2007), augmente l'immobilisation dans la biomasse d'autres éléments nutritifs, ceux-là mêmes qui risquent de devenir (ou sont déjà devenus) limitants (Akselsson *et al.*, 2008). Sachant que les branches et le feuillage sont plus concentrés que le bois, une exploitation des rémanents pourrait accentuer les déséquilibres et déficits en certains éléments et augmenter le risque de lixiviation des nitrates au niveau des sols.

Si l'on se base sur le principe d'homéostasie, il se pourrait que, tôt ou tard, on observe un « déclassement de fertilité » des peuplements dans lesquels un équilibre nutritionnel n'est plus rencontré. La fertilité minérale n'est cependant qu'un paramètre parmi d'autres dans l'établissement du diagnostic stationnel. Néanmoins, on peut se demander si la diminution de l'indice de site avec l'âge des peuplements (Figure 15) n'est pas un signe avant-coureur d'un appauvrissement généralisé. Il semblerait par ailleurs que des baisses de productivité soient observées après exploitation des rémanents (via la récolte par « arbres

²⁸ Pour rappel (paragraphe 2.1.), nous ne considérons pas dans ce travail les entrées par altération des minéraux et les sorties par drainage, lesquels rentrent bien entendu en ligne de compte.

entiers ») dans des peuplements de conifères au Pays de Galles (Proe *et al.*, 1996 ; Walmsley *et al.*, 2009) ou en Scandinavie (Jacobson *et al.*, 2000 ; Nord-Larsen, 2002 ; Egnell, 2010).

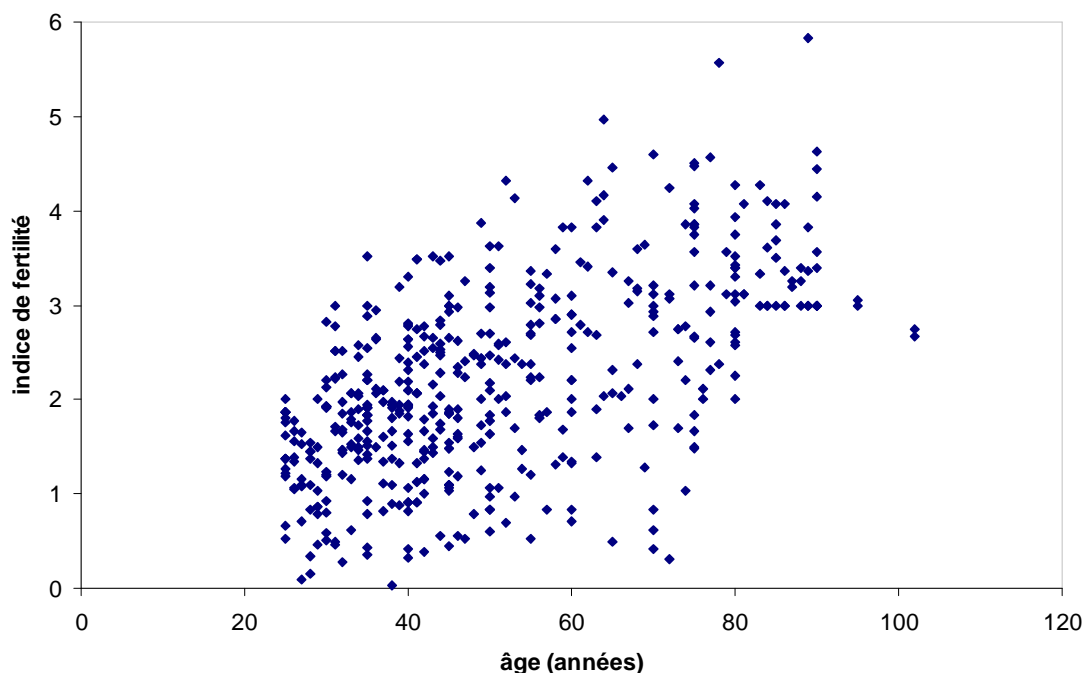


Figure 15. Relation entre l'indice de fertilité et l'âge pour les peuplements purs d'épicéa commun au Grand-Duché de Luxembourg²⁹.

Au niveau des sols, une exportation accrue de cations risque d'entraîner des déséquilibres dans les rapports Al-cations, sans que cela ne se traduise forcément par une diminution du pH (Van Breemen *et al.*, 1983), du moins dans un premier temps. L'évolution au niveau des sols est toutefois assez complexe à prévoir (Wall, 2008). En effet, plusieurs aspects vont se combiner. Tout d'abord, la quantité d'éléments disponibles à un temps t sur le complexe d'échange ainsi que la réserve minérale potentiellement disponible. Ensuite, va également intervenir la dynamique de recharge entre cette réserve et le complexe. C'est elle qui va, somme toute, être déterminante pour la nutrition future de l'arbre. En effet, quelles que soient la teneur totale et la capacité du complexe d'échange, celles-ci ont peu d'intérêt si les éléments ne peuvent être mobilisés. Enfin, il n'est pas à exclure que les mécanismes déclenchés à court et long termes soient différents

Une comparaison quantitative des minéralomasses exportées suivant divers scénarios avec les stocks d'éléments échangeables ou biodisponibles suivant les différentes catégories de sols établies aurait été utile. Elle était d'ailleurs prévue par les objectifs de ce travail. Cependant, ne disposant pas de données de densité apparente, l'établissement des stocks à l'ha d'éléments dans les sols aurait nécessité le recours à une fonction de pédotransfert (FPT). Cette démarche nous aurait contraints à émettre quelques hypothèses supplémentaires, notamment sur la teneur en matière organique actuelle (les valeurs de l'ASTA datent des années 1960 et ne sont disponibles que pour 2/3 des profils), et la proportion d'éléments grossiers (et leur influence au niveau du calcul). En outre, ces fonctions (Adams, 1973 ; Boucneau *et al.*, 1998), sont surtout validées pour des sols agricoles et non forestiers. Il nous a donc semblé que cette procédure aurait induit des incertitudes supplémentaires, variables suivant les sols, et aurait pu rendre caduques certaines de nos observations.

²⁹ La classe de fertilité « 0 » n'a pas été considérée dans ce graphique car rien ne la distinguait d'une absence de valeurs.

Un autre impact négatif de l'exportation des rémanents sur les sols concerne les litières. Celui-ci est double :

- l'exploitation des branches (et éventuellement d'une partie du feuillage) va diminuer les restitutions, ce qui va inévitablement influencer le cycle biogéochimique. Or certains écosystèmes, les taillis en particulier, sont très dépendants de la performance de ce dernier, la fertilité étant confinée dans la phytocénose et la litière. La matière organique joue également un rôle important dans la nutrition lorsque les réserves minérales sont insuffisantes (Duchaufour, 1994). C'est particulièrement vrai pour le phosphore, dont le cycle dans les écosystèmes forestiers est quasiment fermé, et dont le recyclage par retour des litières est très efficace (Croisé & Jonard, 2008). Le risque d'appauvrissement est donc réel ;
- l'exploitation des rémanents augmente le risque de décapage superficiel (litter raking), ce qui, non seulement entraîne une perte significative en éléments nutritifs (Glatzel, 1991) mais expose le sol aux intempéries (« splash erosion », gel).

4.1.2. Conseils techniques

La plupart des pays donnent des avis de type binaire (récolte permise-récolte non autorisée) ou, éventuellement, en indiquant le pourcentage de récolte autorisé (voir Tableaux 1 à 10 dans Thiffault & Morissette, 2009). Il est difficile de donner des conseils précis comme l'a fait l'ADEME (Cacot *et al.*, 2006) compte tenu des incertitudes que nous avons, tant au niveau des estimations des stocks dans les sols qu'au niveau des biomasses et minéralomasses.

Il nous semble cependant opportun de rappeler quelques recommandations existantes plus générales (Cacot *et al.*, 2006 ; Stupak *et al.*, 2008). Il est souhaitable de laisser au maximum les rémanents sur place, tout en ne les rassemblant pas en andains. En effet, cette pratique décape les horizons humifères (Bonneau & Ranger, 1999) et concentre les éléments minéraux à un seul endroit (Jabiol *et al.*, 2000) ; Guillaume, 2006). Brûler les rémanents est à proscrire.

Si, malgré tout, une exploitation des rémanents avait lieu, il faudrait veiller à :

- Récolter en hiver ;
- Ne pas récolter le feuillage, compartiment encore plus concentré en éléments nutritifs que les branches, comme nous l'avons montré précédemment. C'est encore mieux de l'éparpiller sur le parterre de coupe ;
- Laisser sécher les rémanents (4 ou 6 mois minimum pour les résineux et les feuillus respectivement. Cette pratique a plusieurs aspects positifs : elle permet tout d'abord de laisser le feuillage au sol, elle diminue ensuite la quantité d'éléments nutritifs exportés (Stupak *et al.*, 2008) ;
- Limiter le nombre de récolte de rémanents à une voire maximum 2 au cours de la vie du peuplement ;

Pas mal de pays donnent des conseils de fertilisation pour compenser les exportations dues à l'exploitation des rémanents. On peut, bien entendu, adhérer ou non à l'idée d'apporter des engrais +/- artificiels là où la nature aurait fait son travail. Même si le choix de ne pas fertiliser a été pris au Grand-Duché de Luxembourg, peut-être serait-il intéressant de calculer quels seraient les besoins en fertilisation compensatoire de manière à pouvoir les intégrer **maintenant** dans les discussions. En effet, D'aucuns diront que ne pas exploiter les rémanents à l'heure où les marchés des bioénergies ont le vent en poupe constitue un manque à gagner. A moins qu'il ne s'agisse, justement, d'une opportunité pour « garantir » la fertilité des sols. Les rémanents deviennent rentables si leur maintien occasionne un coût moindre que celui d'une fertilité compensatoire. Cette approche permettrait, en quelque sorte, de prendre le long terme en compte dans les réflexions. Toutefois, l'évaluation de cette fertilisation compensatoire ou, de manière plus large, de la fertilisation en forêts est un sujet en soi qui nécessite

qu'on s'y intéresse spécifiquement (voir Bonneau (1995) et les différents travaux ultérieurs). En outre, si cette approche peut pallier certains problèmes, elle n'est pas exempte de risques (Hüttl & Schneider, 1998) ou d'expériences négatives (Bonneau (1969) souligne notamment le manque de résultats, sur schistes du Dévonien dans les Ardennes pour des peuplements de douglas, après trois ans d'application). Certains pays avaient également pris l'habitude d'utiliser les cendres de combustion des dispositifs de chauffage au bois-énergie avant de remettre en question leur qualité en termes de teneurs en métaux lourds (Pitman, 2006 ; Karlun *et al.*, 2008).

L'écorçage en forêt a été proposé par Ranger & Bonneau (1986) et Ranger *et al.* (2002). Ce procédé serait en effet intéressant au vu de la richesse en éléments nutritifs de celle-ci. Les mêmes auteurs soulignent cependant sa faible faisabilité socio-économique (opération coûteuse). Folt & Vautherin (2002), quant à eux, attirent l'attention sur certains avantages (séchage notamment) et inconvénients (qualité technologique moindre) de l'écorçage des grumes de résineux.

4.1.3. Autres éléments de décision

La problématique de l'exploitation ou non des rémanents dépasse largement le cadre chimique fixé par cette étude.

Au niveau environnemental interviennent également les risques concernant :

- la fertilité physique des sols : la compaction, l'orniérage ou encore l'érosion ont un effet négatif sur la qualité de la station ;
- la protection des eaux : bien que les résultats de l'AFOCEL (2004) semblent indiquer que les pertes par drainage ne soient pas en relation avec la quantité de rémanents laissés sur le site, une lixiviation indirecte des nitrates pourraient avoir lieu. Le passage accru des machines peut également entraîner un risque supplémentaire de pollution organique des sols et des eaux. Des mesures additionnelles sont donc peut-être à envisager dans des zones de captages d'eau potable avec présence de substrats très perméables ;
- le maintien de la biodiversité.

Ces différents aspects sont discutés plus en détails dans la synthèse ECOFOR (Landmann *et al.*, 2009).

Il arrive qu'il ne soit pas possible d'envisager tous les aspects conjointement : certains paramètres positifs dans un cas peuvent, dans un autre être des inconvénients. A titre d'exemples, une texture argileuse est chimiquement plus favorable mais physiquement plus « à risque ». De même, une station peut être diagnostiquée comme non sensible à l'exploitation des rémanents mais se trouver dans une zone d'intérêt écologique.

Signalons encore qu'il y a, à l'heure actuelle, de plus en plus de discussions concernant les impacts négatifs de l'exploitation des souches pour le bois-énergie (Palviainen *et al.*, 2010 ; Walmsley and Godbold, 2010) . Il apparaît donc clairement qu'une ligne de conduite en matière d'exploitation permise ou non doit être établie pour éviter les dérives et surenchères.

Au niveau économique, l'exploitation des rémanents, si elle apporte un revenu supplémentaire, a aussi un coût qui, dans certains contextes (pente, accessibilité des machines, superficie exploitée, adéquation machine-situation) reste prohibitif, ce qui devrait limiter les quantités exportées. Cependant, Ralevic *et al.* (2010) insistent sur le fait que même si les aspects opérationnels et financiers limitent la récupération de résidus de récolte et même s'il existe plusieurs facteurs opérationnels qui peuvent minimiser les impacts environnementaux sur le sol et la biodiversité, des directives sur l'extraction durable de la biomasse doivent être émises dans le cas des sites susceptibles aux perturbations du sol et à la perte d'éléments nutritifs. Par ailleurs, certaines études (Bohlin & Roos, 2002 ; Walker, 2009) ont montré que la prise de décision des propriétaires privés étant un processus complexe, basé sur une réflexion bien plus

large que le seul incitant économique. Nous suggérons dès lors qu'une bonne information et une sensibilisation des propriétaires privés aux enjeux environnementaux influencera positivement leur comportement futur. Ceci nécessite cependant de garder à l'esprit que, parfois, les rémanents sont évacués non pas forcément pour approvisionner la filière bois-énergie mais plutôt dégager les lieux (pour faciliter la circulation des machines ou pour assurer la sécurité des personnes circulant en forêt). Par ailleurs, bien que les dispositifs utilisant le bois-énergie présentent des produits de petites dimensions, peut-être serait-il intéressant, en cas de pression croissante sur les forêts, de favoriser l'exploitation de l'accroissement avant de sortir les rémanents des forêts.

Il semble clair que, au vu des nombreux paramètres et enjeux à prendre en considération, dont seuls certains ont été envisagés ci-dessus, la décision finale ne pourra vraisemblablement n'être prise qu'après avoir fixé des arbitrages et/ou des compromis.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude avait pour objectif de quantifier les risques d'appauvrissement chimique des sols forestiers du Grand-Duché de Luxembourg en cas d'exploitation accrue de biomasse. Elle s'inscrit dans un contexte très actuel de questionnement par rapport à la meilleure utilisation des rémanents : Certains les considèrent comme un gisement forestier à exploiter afin de diminuer les émissions de CO₂ tant au niveau du bilan d'un pays, qu'à plus grande échelle. D'autres s'interrogent face à l'utilisation « à fonds perdu » d'une composante essentielle à l'équilibre chimique des écosystèmes forestiers, surtout les plus fragiles. La sonnette d'alarme a d'ailleurs été tirée récemment à ce sujet en Belgique³⁰.

Malgré les nombreuses incertitudes liées à l'estimation quantitative des risques-incertitudes que nous ne sommes d'ailleurs pas les seuls à relever³¹ dues notamment au manque de connaissances de certains termes du bilan « entrées-sorties » d'un écosystème forestier donné, ce travail propose une classification succincte de la sensibilité des sols développés sur différents substrats présents au Grand-Duché de Luxembourg. Nous avons estimé que les risques d'appauvrissement chimique étaient les plus importants pour les sols sur grès du Luxembourg (et dérivés) et sur matériaux primaires (schistes et grès de l'Oesling). Les sols sur marnes et altération de la marne sont moins sensibles. Certains d'entre eux sont cependant acides et ne doivent pas faire l'objet d'une exploitation importante. Nous avons considéré le pH_{eau} de 5 comme limite entre les sols marneux de risques moyens et faibles. Il nous semblerait judicieux d'affiner cette classification, somme toute encore très qualitative par certaines analyses physico-chimiques supplémentaires, avec des méthodes propres au contexte forestier et pour lesquelles il existe des valeurs seuils. Cette démarche permettrait en effet d'apprécier le stock d'éléments disponibles dans les différents groupes mieux que nous n'avons pu le faire sur base des données de l'inventaire permanent wallon et des profils-type d'EFOR/ERSA. Elle permettrait en outre de disposer d'autres critères importants de classification, comme la concentration en Al « échangeable » ou le rapport cations/Al dans l'Oesling.

Ce travail a également tenté de dresser un état des lieux de l'état des connaissances actuelles en matière d'estimation des biomasses et minéralomasses. Ceci nous a permis de constater, une fois de plus, que ces sujets faisaient l'objet d'un grand intérêt scientifique, en recrudescence ces dernières années mais qu'ils étaient malheureusement aussi sources de nombreuses difficultés conceptuelles, méthodologiques et techniques. Notre démarche propose un ordre de grandeur des exportations minérales sous différents scénarios et dans un contexte propre au Grand-Duché de Luxembourg, à partir d'estimations :

- de la productivité sur base des tables de production ;
- de biomasses réalisées à l'aide des deux grandes méthodes d'usage (facteurs d'expansion et équations allométriques) ;
- de concentrations « moyennes » en éléments nutritifs dans différents compartiments dont les branches calculées à partir des différents documents consultés.

Cette analyse suggère que l'exploitation des rémanents aurait un impact plus important pour le hêtre par rapport aux autres essences, en raison du développement de son houppier et de sa productivité. Néanmoins, le prélèvement en cations divalents est fort important chez le douglas. Il semble également que l'exportation minérale soit supérieure pour P par rapport aux autres éléments.

³⁰ Les rémanents forestiers. Question écrite du 20/04/201 De Mr André Bouchat à Mr le Ministre B. Lutgen. Session : 2009-2010, n°301
Terlinden, M., 2010. Jusqu'à la dernière brindille ? Quelques réflexions sur la gestion des rémanents et résidus de coupes en forêt. *Silva Belgica*, 117: 36-37

³¹ Voir entre autre Cacot *et al.*, 2004 et 2007

Nos estimations montrent que l'exportation minérale est d'autant plus importante que la classe de fertilité est élevée. Pour être tout à fait correct, il aurait fallu pouvoir tenir compte de « l'effet site », puisque celui-ci intervient dans le contrôle de la concentration en élément dans les différents compartiments de l'arbre. Nous n'avons toutefois pas pu le faire en raison du manque d'information à ce sujet dans les articles sources.

Enfin, en cas d'approfondissement du sujet, nous conseillons en outre :

- de s'enquérir des résultats d'études actuellement en cours ou en voie de publication (en Lorraine³² et en Suisse³³ notamment) ;
- d'avoir accès à la littérature en langue allemande. En effet, les Autrichiens et les Allemands semblent avoir développé une expertise intéressante mais ont malheureusement publié les fruits de leurs études dans des revues nationales, peu « visibles ». Le modèle SILVA, par exemple, pourrait être testé avec des données grand-ducales afin d'obtenir une autre estimation des exportations de biomasse et minéralomasse ;
- de réaliser une étude socio-économique afin de mieux appréhender les réelles menaces portant sur les écosystèmes forestiers et de pouvoir proposer (ou imposer) des solutions adéquates ;
- de développer une approche multicritère de façon à pouvoir hiérarchiser les différents paramètres rentrant en ligne de compte (protection physique et/ou chimique des sols, protection des eaux, zone d'intérêt biologique, fonction sociale de la forêt, ...).

³² Association Lorraine de Certification Forestière, 2007. Politique de qualité de la gestion forestière durable 2007-2012 en Lorraine. Projet 8 : assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêts. Document du référentiel régional PEFC Lorraine Approuvé en Assemblée Générale le 17 octobre 2007

³³ Lemm , R., Thees, O., Hensler, U., Hässig, J., Bürgi, A. and Zimmermann S., 2010. Ein Modell zur Bilanzierung des holzerntebedingten Nährstoffentzugs auf Schweizer Waldböden (A model for balancing nutrient extraction caused by timber harvesting on Swiss forest soils), Schweiz Z Forstwes, 161: 401-412

6. Références

Adams, 1973. The effect of organic matter on the bulk density and true density of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, 24: 10–17

ADEME, 2009. Compte rendu de la réunion Centre-Est : « Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour des usages énergétiques », CR-Ademe-Lyon-6mars 2009, 4 p.

Administration de l'Environnement (ADE), 2006. Bodenmonitoring Luxembourg. Sachstandsbericht nach Abschluss der ersten Beprobungskampagne. Luxembourg. 287p.

Administration des Eaux et Forêts (ADN), 1999. Le choix des essences forestières en Oesling, guide pour l'identification des stations. Luxembourg. 28 p + annexes

ADN, 2002. Territoires écologiques du Luxembourg. Domaines et secteurs écologiques. Luxembourg. 68p + annexes

ADN, 2009. Guide pour l'identification des stations pour les forêts du Gutland. Typologie stationnelle. Luxembourg, 88 p.

Ahern, C.R., Baker, D.E. and Aitken, R.L., 1995. Models for relating pH measurements in water and calcium chloride for a wide range of pH, soil types and depths. *Plant and Soil*, 171: 47-52

Akselsson, C., Westling, O., Alveteg, M., Thelin, G., Fransson, A. M. and Hellsten, S. The influence of N load and harvest intensity on the risk of P limitation in Swedish forest soils. *Science of the Total Environment*, 404: 284-289

Alban, D.H., 1979. Species influence on nutrients in vegetation and soils. In: State of New-York University (Ed.), Impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling. Proceedings, New York: USDA Forest Service, 152-171

Albaugh, T.J., Bergh, J., Lundmarl, T., Nilsson, U., Stape, J.L., Allen, H.L. and Linder, S., 2009. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce? *Forest Ecology and Management*, 258: 2628-2637

Alriksson, A. and Eriksson, H.M., 1998. Variation in mineral nutrient and C distribution in the soil and vegetation compartments of five temperate tree species in NE Sweden. *Forest Ecology and Management*, 108: 261-273

André, F. and Ponette, Q., 2003. Comparison of biomass and nutrient content between oak (*Quercus petraea*) and hornbeam (*Carpinus betulus*) trees in a coppice-with-standards stand in Chimay (Belgium). *Annals of Forest Science*, 60: 489-502

André, F., Jonard, M. and Ponette, Q., 2010. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. *Science of the Total Environment*, 408:2285-2294

Arend, J.P. and Wagner, M., 1997. Luxembourg. In: Vanmechelen L., Groenenmans R. and Van Ranst E. (Eds.) *Forest Conditions in Europe*. EC-UN/ECE, Brussels and Geneva, 192-194

- Armbruster, M., MacDonald, J., Dise, N.B. and Matzner, E., 2002. Throughfall and output fluxes of Mg in European forest ecosystems: a regional assessment. *Forest Ecology and Management*, 164:137-147
- ASTA, 2010. La cartographie des sols au Grand-Duché de Luxembourg à l'échelle 1/25.000, Version provisoire_V4. Ministère de l'Agriculture, de la viticulture et du développement rural. 29p
- Auclair, D. & Bige, M.-C., 1984. Une méthode d'évaluation régionale de la biomasse des taillis à partir des données de l'Inventaire forestier national. Application à la Région Centre. *Annales des Sciences Forestières*, 41 : 405-426
- Auclair, D. & Metayer, S., 1980. Méthodologie de l'évaluation de la biomasse aérienne sur pied et de la production en biomasse des taillis. *Oecologica Applicata*, 1 : 357-377
- Augusto, L., Ranger, R., Bonneau, M., 2000. Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, LII : 507-518
- Augusto, L., Ranger, J., Ponette, O. and Rapp, M., 2000. Relationships between forest tree species stand production and stand nutrient amount. *Annals of Forest Science*, 57:313-324
- Badeau, V., 1998. La santé des forêts. Caractérisation écologique du Réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les cahiers du DSF. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. DERF, Paris, 211 p.
- Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie. 2^{ème} édition revue et augmentée. INRA, Paris, 257 p.
- Balboa-Murias, M.A., Rojo, A., Alvarez, J.G. and Merino A., 2006. Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. *Annals of Forest Science*, 63: 557-565
- Bauer, G., Persson, H., Persson, T., Mund, M., Hein, M., Kummerow, E., Mateucci, G., van Oene, H and Scarascia-Mugnozza G., 2000. Linking plant nutrition and ecosystem processes. In: Ernst-Detlef Schulze (Ed.). *Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems*, Springer, 63-98
- Baritz, R. and Strich, S., 2000. Forests and the National Greenhouse Gas Inventory of Germany. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4: 267-271
- Bartelink, H.H., 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management*, 86:193-203
- Bartelink, H.H., 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, 54:39-50
- Bartelink, H.H., 1998. A model of dry matter partitioning in trees. *Tree Physiology*, 18:91-101
- Beaufils, T., 1992. L'Oesling. Etude stationnelle forestière d'une région luxembourgeoise. Etude réalisée pour le compte de l'Administration des Eaux et Forêts du Grand Duché du Luxembourg. En collaboration technique avec Monnier A et Robinot P., Besançon, 5 volumes
- Belkacem, S., Nys, C. and Gelhaye D., 1992. Effects of fertilizer and lime on mature Norway spruce (*Picea abies*) biomass mineral content. *Annales des Sciences Forestières* 49: 235-252.

- Bergeron, Y., Camiré, C., Bouchard, A., Gangloff, P., 1982. Analyse et classification des sols pour une étude écologique intégrée d'un secteur de l'Abitibi, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, XXXVI : 291-305
- Bige, M.-C., 1982. Evaluation de la biomasse et de la productivité des taillis dans la Région Centre. Méthodologie et premiers résultats. Rapport de stage effectué à la station de recherches sur la forêt et l'environnement du Centre de Recherches Forestières d'Orléans, INRA, Rennes, 53 p + annexes
- Blanco, J.A., Zavala, M.A., Imbert, J.B. and Castillo, F.J., 2005. Sustainability of forest management practices: Evaluation through a simulation model of nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, 213: 209-228
- Blaser, P., Walthert, L., Zimmermann, S., Graf Pannatier, E. and Luster, J., 2008. Classification schemes for the acidity, base saturation, and acidification status of forest soils in Switzerland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 163-170
- Bohlin, F. and Roos, A., 2002. Wood fuel supply as a function of forest owner preferences and management styles. *Biomass and Bioenergy*, 22: 237-249
- Bonneau, M., 1969. La fertilisation en sylviculture. *Revue Forestière Française*, XXI : 429-439
- Bonneau, M., 1995. La fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, base du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. Engref, Nancy, 368 p
- Bouchon, J., Nys, C. and Ranger, J., 1985. Cubage, biomasse et minéralomasse: comparaison de trois taillis simples des Ardennes primaires. *Acta Oecologica. Oecologica Plantarum*, 6: 53-71
- Boucneau, G., Van Meirvenne, M., Hofman, G., 1998 Comparing pedotransfer functions to estimate bulk density in northern Belgium. *Pedologie-Themata*, 5: 67-70
- Broadmeadow, M. and Matthews, R., 2004. Survey methods for Kyoto Protocol monitoring and verification of UK forest carbon stocks. UK Emissions by Sources and Removals by Sinks due to Land Use, Land Use Change and Forestry Activities, Report. CEH, Edinburgh
- Burger, J.A., 2002. Soil and long-term site productivity values. In: Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T., Smith, C.T. (Eds.). *Bioenergy from Sustainable Forestry Guiding Principles and Practice*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 65-189
- Burschel, P., Kuersten, E., Larson, B.C. and Weber, M., 1993. Present Role of German Forests and Forestry in the National Carbon Budget and Options to its Increase. *Water Air Soil and Pollution*. 70: 325-340
- Cacot, E. (coord), Eisner, N., Charnet, F., Leon, P., Rantien, C., Ranger, J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers. ADEME, 36 p.
- Cacot, E., Charnet, F., Graffin, A., Pitocchi, S., Ranger, J., Nicolas, M. & Eisner, F., 2007. Etude de l'impact du prélèvement des rémanents en forêt - volet 3. FCBA, IDF, ONF, UCFF, Ademe, INRA, 61 p.
- Callesen, I. and Raulund-Rasmussen, K., 2004. Base cation, aluminium, and phosphorus release potential in Danish forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167: 169-176

- Callesen, I., Raulund-Rasmussen, K., Lazdins A. and Pärn H. 2005. Nutrient release capability in sandy parent material in Baltic and Danish forest soils. *Forestry Studies*, 42: 58-65
- Cerný, M., 1990. Biomass of *Picea abies* (L.) Karst. in midwestern Bohemia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 5: 83-95
- Chevalier, H., 2008. Evaluer le coût des pratiques sylvicoles en faveur de la biodiversité forestière. Mémoire de fin d'étude. ENGREF, 130p + annexes
- Cienciala, E., Apltauer, J., Exnerová, Z. and Tatarinov, F., 2008. Biomass functions applicable to European beech. *Journal of Forest Science*, 54: 109-120
- Cienciala, E., Cerny, M., Apltauer, J. and Exnerová, Z., 2005. Biomass functions applicable to European beech. *Journal of Forest Science*, 51: 147-154
- Cienciala, E. and Exnerová, Z., 2010. Overview of allometric procedures applied in national GHG inventories of the EU Member States. In: Cienciala, E., Seufert, G., Blujdea, V., Grassi, G., Exnerová, Z. (Eds.). *Harmonized Methods for Assessing Carbon Sequestration in European Forests Results of the Project "Study under EEC 2152/2003 Forest Focus regulation on developing harmonized methods for assessing carbon sequestration in European forests"*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 323p.
- Cole, DW. and Rapp, M., 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In: Reichle, D.E. (Ed.). *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge UK, Cambridge University Press: C 341-409
- Colinet, G., Weissen, F., Bock, L., Toussaint, F., 2008. Suivi pédologique dans le cadre de l'inventaire permanent des ressources ligneuses. Rapport final de fin de convention MRW-DGRNE. 65 p + annexes
- Croisé, L., Jonard, M., 2008. Evolution de la nutrition des peuplements : vers une carence générale en phosphore ? *Rendez-vous Techniques ONF, hors-série n°4* : 120-126
- Denayer-De Smet, S., 1971. Teneurs en éléments biogènes des tapis végétaux dans les forêts caducifoliées d'Europe. In: Duvigneaud, P. (Ed.). *Productivity of forest ecosystems: proceedings of the Brussels Symposium*. Unesco, Paris, 515-525
- de Tillesse, M. & Devillez, F., 1995. Modélisation du niveau trophique des sols forestiers : évaluation du pH en fonction des groupements phytosociologiques. *Annales des Sciences Forestières*, 52: 353-364
- Dagnelie, P., Palm, R., Rondeux, J. & Thill, A., 1988. Tables de production relatives à l'épicéa commun. Les presses agronomiques de Gembloux. Gembloux, Belgique, 123p.
- Dagnelie, P., Palm R., Rondeux, J., Thill, A., 1999. Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux. 2^{ème} édition. Gembloux, Belgique, 126p.
- Dewolf, Y., 1965. Intérêt et principes d'une cartographie des formations superficielles. Publications de la Faculté des lettres et sciences humaines de l'université de Caen, Caen, 183 p
- Dietz, P. Von, 1975. Dichte und rindengehalt von Industrieholz. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 33: 135-141
- Duchaufour, Ph., 1994. Pédologie. Sol, végétation, environnement. 4^{ème} édition. Masson, Paris, 324p.

- Dupouey, J.-L., Pignard, G., Badeau, V., Thimonier, A., Dhôte, J.-F., Nepveu, G., Bergès, L., Augusto, L., Belkacem, S. and Nys, C., 2000. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Revue Forestière Française*, LII: 139-154
- Duvigneaud, P., Kestemont, P., Timperman, J., Moniquet, J.-C. 1977. La hêtraie ardennaise à *Festuca altissima* à Mirwart Biomasse et productivité primaire. *Productivité biologique en Belgique*. Duculot (Eds.), Paris-Gembloux, 107-154
- Dyck, W.J. and Bow, C.A., 1992. Environmental impacts of harvesting. *Biomass and Bioenergy*, 2: 173-191
- Eckmüller, O., 2006. Allometric relations to estimate needle and branch mass of Norway spruce and Scots pine in Austria. *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 7-16
- Egnell, G., 2010. Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management*, 261: 148-153
- Eriksson, H.M. and Rosen, K., 1994. Nutrient distribution in a Swedish tree species experiment. *Plant and Soil*, 164: 51-59
- Fiedler, F., 1987. Das Ökologische Meßfeld der Sektion Forstwirtschaft der TU Dresden. V. Die Verteilung der Dendromassekomponenten. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 36: 229-234
- Flot, J.-L. & Vautherin, P., 2002. Des stocks de bois à conserver en forêt ou hors forêt. *Revue Forestière Française*, LIV : 136-144
- Freer-Smith, P.H. and Kennedy, F., 2003. Base Cation Removal in Harvesting and Biological Limit Terms for Use in the Simple Mass Balance Equation to Calculate Critical Loads for Forest Soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 145: 409-427
- Freudenschuß, A. and Weiss, P., 2010. Current status of use of Biomass Expansion Factors and Biomass Functions. Cienciala, E., Seufert, G., Blujdea, V., Grassi, G., Exnerová, Z. (Eds.). *Harmonized Methods for Assessing Carbon Sequestration in European Forests Results of the Project "Study under EEC 2152/2003 Forest Focus regulation on developing harmonized methods for assessing carbon sequestration in European forests"*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 323p.
- Galtznel, G., 1991. The impact of historic land use and modern forestry on nutrient relations of Central European forest ecosystems. *Fertilizer Research*, 27: 1-8
- Genet, A., Wernsdörfer, H., Jonard, M., Pretzsch, H., Rauch, M., Ponette, Q., Nys, C., Legout, A., Ranger, J., Vallet, P. and Saint-André, L. in press. Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. *Forest Ecology and Management*, submitted article
- Genot, V., Colinet, G., Bock, L., 2007. La fertilité des sols agricoles et forestiers en Région wallonne. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. Laboratoire de Géopédologie, unité sol-écologie-territoire, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux. 78p.
- Grigal, D.F. and Bates, P.C., 1997. Assessing impacts of forest harvesting: the Minnesota experience. *Biomass and Bioenergy*, 13: 213-222

- Grote, R., 2002. Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species. *Silva Fennica*, 36: 779-788
- Gschwantner, T. and Schadauer, K., 2006. Branch biomass functions for broadleaved tree species in Austria. *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 17-34
- Guillaume, P. & Carnol, M., 2006. Conséquences des différents types de traitement des déchets forestiers sur la qualité des sols et des eaux de drainage en Haute Ardenne. Rapport final. Convention 2005-2006 entre la Région Wallonne et l'Université de Liège. 37 p. + annexes
- Hagen-Thorn, A., Armolaitis, K., Callesen, I. and Stejernquist, I., 2004. Macronutrients in tree stems and foliage: a comparative study of six temperate forest species planted at the same sites. *Annals of Forest Science*, 61: 489-498
- Härdtle, W., Von Oheim, G., Friedel, A., Meyer, H. and Westphal, C., 2004. Relationship between pH-values and nutrient availability in forest soils-the consequences for the use of ecograms in forest ecology. *Flora*, 199: 134-142
- Heller, H. 1986. Biomasse-Messungen an Buche und Fichte. In: Ellenberg, H., Mayer, R., Schauer mann, J. (Eds.). *Ökosystemforschung: Ergebnisse des Sollingprojektes 1966-1986*. Ulmer, Stuttgart, 109-127
- Herbillon, A.J., 1986. Chemical estimation of weathering minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soils. In: Beindroth, F.H., Camargo, M.N., Eswaran, H. (Eds.). *Proceedings of the 8th International Classification Workshop: Classification, Characterization and Utilization of Oxisols*. Rio de Janeiro, Brazil, 39-48
- Hesselinck, T.P., 2010. Increasing pressures to use forest biomass: A conservation viewpoint. *The Forestry Chronicle*, 86: 28-35
- Hochbilchler, E., Bellos, P. and Lick, E., 2006. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea Abies*) and Scots pine (*Pinus Sylvestries*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *petrea*). *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 35-46
- Hölscher, D., Schade, E. and Leuschner, C., 2001. Effects of coppicing in temperate deciduous forests on ecosystem nutrient pools and soil fertility. *Basic and Applied Ecology*. 2: 155-164
- Huet, S., Forgeard, F. and Nys, C., 2004. Above-and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. *Annals of Forest Science*, 61: 683-694
- Hüttl, R.F. and Schneider, B.U., 1998. Forest ecosystem degradation and rehabilitation. *Ecological Engineering* 10 : 19-31
- IFN, 2005. Bois-énergie : les forêts ont de la ressource ! IF n°9. 8p.
- IFN, 2010. Bois-énergie : les forêts ont de la ressource...à mobiliser ! IF n°24. 8p.
- Ilg, S., 2002. Erhebung der oberirdischen Biomasse- und Elementvorräte eines Fichtenbestandes (*Picea abies* (L.) Karst.) im Bereich der Waldklimastation Zusmarshausen. Fachbereich Forstwirtschaft, 98 p.

Ingerslev, M. and Hallbäck, L., 1999. Aboveground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients. *Forest Ecology and Management*, 119: 21-38

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2003. Annex 3A.1 Biomass Default Tables for Section 3.2 Forest Land. In: Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. and F. Wagner (Eds.). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan. 3.171-3.178

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara T. and Tanabe, K. (Eds.), Hayama, Japan, 83p.

Jabiol, B., Ranger, J. and Richter, C., 2000.- Sol sensible ou résistant ? Eléments simples de diagnostic de la sensibilité à la dégradation chimique ou physique. *Forêt Privée*, 253: 30-46

Jacobson, S., Kukkola, M., Malkonen, E. and Tveite, B., 2000. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *Forest Ecology and Management*, 129: 41-51

Jalkanen, A., Mäkipää, R., Stahl, G., Lehtonen, A. and Petersson, H., 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependant biomass expansion factors. *Annals of Forest Science*. 62: 845-851

Jandl, R., Neumann, M and Eckmüllner, O., 2007. Productivity increase in Northern Austria Norway spruce forests due to changes in nitrogen cycling and climate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170: 157-165

Jansen P. and Kuiper, L., 2004. Double green energy from traditional coppice stands in the Netherlands. *Biomass and Bioenergy*, 26: 401-402

Johnson, D.W., 1983. The effects of harvesting intensity on nutrient depletion in forests. In: IUFRO Symposium on forest site and continuous productivity. Ballard, Russell, Gessel, Stanley (Eds.). Seattle, Washington, August 22-28 1982, 157-166

Jonard, M., André, F., Dambrine, E., Ponette, Q. and Ulrich, E., 2009. Temporal trends in the foliar nutritional status of the French, Walloon and Luxembourg broad-leaved plots of forest monitoring. *Annals of Forest Science*, 66: 412 p10

Joosten, R. and Schulte, A. 2002. Possible effects of altered growth behaviour of Norway spruce (*Picea abies*) on carbon accounting. *Climate Change* 55: 115–129

Joosten, R., Schumacher, J., Wirth, C. and Schulte, A., 2004. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecology and Management* 189: 89-96

Karltun, E., Saarsalmi, A., Ingerslev, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., Ozolincius, R. and Varnagiryte-Kabasinskiene, I., 2008. Wood ash recycling – possibilities and risks. In: Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K., Stupak, I. (Eds.). *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, 79–108

- Katzensteiner, K., Glatzel, G. and Kazda, M., 1992. Nitrogen-induced nutritional imbalances-a contributing factor to Norway spruce decline in the Bohemian Forest (Austria). *Forest Ecology and Management*, 51: 29-42
- Kestermont, P., 1971. Productivité primaire des taillis simples et concept de nécromasse. In: Duvigneaud P. (Ed.). *Productivity of forest ecosystems: proceedings of the Brussels Symposium*. Unesco, Paris, 515-525
- Kieffer, J.C., Janssens R., Weissen F., Wagner M., 2003. *Standortskartierung im Großherzogtum Luxemburg, Grundlage für eine nachhaltige Forsteinrichtung" (Carte des aptitudes stationnelles de la forêt au Grand-Duché de Luxembourg. Base d'un aménagement pour un développement forestier durable)*. *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstplanzenzüchtung* », Freiburg, 42, 29p.
- Knoepp, J.D. and Swank, W.T., 1997. Long-term effects of commercial sawlog harvest on soil cation concentrations. *Forest Ecology and Management*, 93: 1-7
- Kooijman, A.M., 2010. Litter quality effects of beech and hornbeam on undergrowth species diversity in Luxembourg forests on limestone and decalcified marl. *Journal of Vegetation Science*, 21: 248-261
- Krumlik, J.G., 1974. Biomass and nutrient distribution in two old growth forest ecosystems in south coastal British Columbia. pH-D thesis. Department of Forestry. University of British Columbia. 88p. + annexes
- Laitat, E., Karjalainen, T., Loustau, D. and Lindner, M., 2000. Introduction: Towards an integrated scientific approach for carbon accounting in forestry. COST E21 Workshop. *Contribution of forests and forestry to mitigate greenhouse effects*, 28-30 September 2000, Joensuu (Finland). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4: 241-251
- Lambert, J., Parmentier, M., Léonard, C., Weissen, F., Reginster, P., 1990. Premiers enseignements de l'analyse des sols forestiers en région wallonne. *Silva Belgica*, 97(2): 7-12.
- Landmann, G., Gosselin, F., Bonhême, I. (Coord.), 2009. *Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles*. Paris, MEEDDM-Ecofor, 210 p.
- Larrieu, L. & Jabiol, B., 2001. Analyses de sol en forêt : les choix du gestionnaire forestier. *Revue Forestière Française*, LIII: 558-567
- Ledermann, T. and Neumann, M., 2006. Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Austrian Journal of Forest Science* 123: 47-64
- Le Goaster, S, Dambrine E, 1990. Mineral supply of healthy and declining trees of a young spruce stand. *Water, Air, and Soil Pollution* 54: 260-280
- Le Goff, N. and Ottorini, J.M., 2000. Biomass distributions at tree and stand levels in the beech experimental forest of Hesse (NE France). *Viterbo* (November): 9-11
- Legout, A., Walter, C. and Nys, C., 2007. Spatial variability of nutrient stocks in the humus and soils of the forest massif (Fougères, France). *Annals of Forest Science*. 65: 108 p₁-108 p₁₀

- Lehtonen, A., Cienciala, E., Tatarinov, F. and Mäkipää, R., 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic, *Annals of Forest Science* 64: 133–140.
- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R. and Liski, J., 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 211-224
- Leuschner, C., Meier, I.C. and Hertel, D., 2006. On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. *Annals of Forest Sciences*, 63: 355-368
- Lévy, G., 1988. Appréciation de la fertilité du sol. *Revue Forestière Française*, XL: 11-18
- Lévy, P.E., Hale, S.E. and Nicoll, B.C., 2004. Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain, *Forestry*, 77: 421–430
- Lousteau, D. (coord.), 2004. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles, Rapport final du projet «CARBOFOR», Programme GICC 2001 «Gestion et Impacts du Changement Climatique», Convention Gip Ecofor n°3/2001, Cestas, 125 p+ annexes
- Lowe, H. Seufert, G., Raes, F., 2000. Comparison of methods used within Member States for estimating CO₂ emissions and sinks according to UNFCCC and EU Monitoring Mechanism: forest and other wooded land. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4: 315-319
- Lundgren, C. and Persson, B., 2002. Provenance variation in stem wood basic density and dry matter for *Picea abies* grown on farmland in southern Sweden. *Forest Genetics*, 9: 103-110
- Marion, M.G., 1979. Biomass and nutrient removal in long-rotation stands. In: State University of New York (Ed.). *Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling*. Proceedings, New York: USDA Forest Service, 98-110
- Marques, R. and Ranger, J., 1997. Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb). France) stands on the Beaujolais Mounts (France). 2. Quantitative approach. *Forest Ecology and Management*, 92: 167-197
- Merino, A., Macias, F., Garcia-Rodeja, E., 2000. Element fluxes and buffer reaction in acidified soils from a humid temperate region of Southern Europe. *Water, Air and Soil Pollution*, 120: 217-228.
- Metayer, S., 1979. Evaluation de la biomasse aérienne des taillis. Etude méthodologique sur trois taillis purs de charme, de chêne et de bouleau. INRA, Centre de Recherches Forestières d'Orléans, 89 p. + annexes
- Millier, C., Nys, C. and Ranger, J., 1986. L'échantillonnage dans l'étude de la minéralomasse forestière: l'exemple du taillis ardennais. *Annales des Sciences Forestières*, 43: 165-178
- Moffat, A., 1991. Forestry and soil protection in the UK. *Soil Use and Management*, 7: 145-151
- Moffat, A.J., 2003. Indicators of soil quality for UK forestry. *Forestry*, 76: 547-568
- Moffat, A.J., Hutchings A.T. and Boswell R. C., 1997. United Kingdom. In: Vanmechelen L., Groenenmans R. and Van Ranst E.(Eds.). *Forest Conditions in Europe*. EC-UN/ECE, Brussels and Geneva, 192-194

- Morrisson, I.K. and Foster, N.W., 1979. Biomass and element removal by complete tree harvesting of medium rotation forest stands In: State University of New York (Ed.). Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. Proceedings, New York: USDA Forest Service, 111-129
- Mund, M., Kummerow, E., Hein, M., Bauer, G.A. and Schulze, E.-D., 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management* 171: 275-296
- Muukkonen, P., 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 126:1 57-166
- Muukkonen, P. and Mäkipää, R., 2006. Biomass equations for European trees: addendum. *Siva Fennica*, 40: 763-773
- Neumann, M. and Jandl, R. 2002. Aboveground biomass of two young Norway spruce stands. Manuscript.
- Nicolas, M., Charnet, F., Ranger, J., Rantien C., Brethes A., Mengin-Lecreulx, P., Sardin T., 2007. Bois-énergie: maîtriser les impacts. ONF Rendez-vous techniques n°15, 36-45
- Nihlgård, B. and Lindgren, L. 1977. Plant Biomass, Primary Production and Bioelements of Three Mature Beech Forests in South Sweden. *Oikos*, 28: 95-104
- Nisbet T., Dutch J. and Moffat A., 1997. Whole-tree harvesting: a guide to good practice. *Forestry Practice Guide*, 14 p.
- Nord-Larsen, T., 2002. Stand and site productivity response following whole-tree harvesting in early thinnings of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Biomass and Bioenergy*, 23: 1-12
- Nys, C. & Ranger, J., 1983. Etude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. III. Minéralomasse et cycle biologique. *Annales des Sciences Forestières*, 40: 41-66
- Oren, R., Werk, K.S., Schulze, E.-D., Meyer, J., Schneider, B.U. and Schramel P., 1988. Performance of two *Picea abies* (L.) Karst. stands at different stages of decline. *Oecologia*, 77: 151-162
- Olsson, B.A., Bengtsson, J. and Lundkvist, H. 1996. Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *Forest Ecology and Management*, 84: 135-147.
- Pajtik, J., Konôpa, B. and Lukac, M., 2008. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) trees. *Forest Ecology and Management*, 256: 1096-1103
- Palviainen, M., Finér, L., Laiho, R., Shorohova, E., Kapitsa, E. and Vanha-Majamaa, I., 2010. Phosphorus and base cation accumulation and release patterns in decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps. *Forest Ecology and Management*, 260: 1478-1489
- Paré, D., 2008. What impact does forest biomass harvesting have on soils? Join the research effort! Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre. *Branching Out* n°45, 2 p.
- Pardé, J., 1977. Biomasse forestière et utilisation totale des arbres. *Revue forestière française*, XXIX : 333-342.

- Pellinen, P., 1986. Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Dissertation Univ. Göttingen, 134 p
- Penninckx, V., Meerts, P., Herbauts, J. and Gruber W. 1999. Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium *Forest Ecology and Management* 113: 23-33.
- Pignard, G., Dupouey, J.-P., Arrouays, D. and Loustau, D., 2000. Carbon stocks estimates for French forests, *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4:285-289
- Ponette, Q. (coord.), Bemelmans, D., Bemelmans, V., Polomé, P., 2007. Etude des ressources "bois-énergie" en Région wallonne. UCL – Unité des eaux et forêts, Région wallonne – Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, 74p.
- Ponette, Q. & Ranger, J., 2000. Biomasses et minéralomasses aériennes de cinq peuplement de douglas du réseau RENECOFOR : quantification et implications sylvicoles. *Revue Forestière Française*, LII: 115-134.
- Ponette, Q., Ranger, J., Ottorini, J.-M. and Ulrich E., 2001. Aboveground biomass and nutrient content of five Douglas-fir stands in France. *Forest Ecology and Management*, 142: 109-127
- Proe, M.F., Cameron, A.D., Dutch, J and Christodoulou, X.C., 1996. The effect of whole-tree harvesting on the growth of second rotation Sitka spruce. *Forestry*, 69: 389-401
- Prietzl, J. and Stetter, U., 2010. Long-term trends of phosphorus nutrition and topsoil phosphorus stocks in unfertilized and fertilized Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands at two sites in Southern Germany. *Forest Ecology and Management* 259: 1141–1150
- Rademacher, P., Mueller-Using, B., Meesenburg, H. and Meiwes, K.J., 2001. Inventory and budget of nutrients in managed German forest stands – a method for sustainable nutrient management. In: Horst *et al.* (Eds.), *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*, 906-907
- Ralevic, P., Ryans, M. and Cormier D., 2010. Assessing forest biomass for bioenergy: Operational challenges and cost considerations. *The Forestry Chronicle*, 86: 43-50
- Ranger, J. & Bonneau, P., 1984. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols en forêt. *Le cycle biologique en forêt. Revue Forestière Française*, XXXVI: 93-112.
- Ranger, J. & Bonneau, P., 1986. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols en forêt. *Les effets de la sylviculture. Revue Forestière Française*, XXXVIII: 105-123
- Ranger, J., Cuirin, G., Bouchon, J., Colin, M., Gelhaye, D., Mohamed Ahamed, D., 1992. Biomasse et minéralomasse d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) de forte production dans les Vosges (France). *Annals of Forest Science*, 49: 651-668
- Ranger, J., Dambrine, E., Nicolas, M., Landmann, G., 2009. Impact de prélèvements accrus de biomasse sur les sols forestiers. In Landmann, G., Gosselin, F., Bonhême, I. (Coord.), 2009. *Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles*. Paris, MEEDDM-Ecofor, 107-123
- Ranger, J. and Gelhaye D., 2001. Belowground biomass and nutrient content in a 47-year-old Douglas-fir plantation. *Annals of Forest Science*, 58: 423-430

- Ranger, J., Gelhaye, D., Turpault, M.-P., 2002. Impact des plantations forestières traitées semi-intensivement sur la fertilité minérale des sols et la qualité de l'environnement. *Etude et Gestion des Sols*, 9: 159-176
- Ranger, J., Marques, R. and Colin-Belgrand, M., 1997. Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. *Acta Oenologica*, 18: 73-90
- Ranger, J., Marques, R., Colin-Belgrand, M., Flammang, N. and Gelhaye D., 1995. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management*, 72: 167-183
- Ranger, J., Marques, R., Colin-Belgrand, M., Flammang, N. and Gelhaye D., 1996. La dynamique d'incorporation d'éléments nutritifs dans un peuplement de douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco). Conséquences pour la gestion sylvicole. *Revue Forestière Française*, XLVIII: 217-230
- Ranger, J., Nys, C. and Ranger D., 1981. Etude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. I. Biomasse aérienne du taillis-sous-futaie. *Annales des Sciences Forestières*, 38: 259-282
- Ranger, J. and Nys, C., 1996. Biomass and nutrient content of extensively and intensively managed coppice stands. *Forestry*, 69: 91-110
- Raulund-Rasmussen, K., Stupak, I., Clarke, N., Callesen, I., Helmisaari, H.S., Karlton, E. and Varnagiryte-Kabasinskiene, I., 2008, Effect of very intensive forest biomass harvesting on short and long term site productivity, In Röser *et al.* (Eds.), *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, 29-78
- Raupach, M.R., Rayner, P. J., Barrett, D., DeFries, R. S, Heimann, M., Ojima, D. S., Quegan, S. and Schimmlius, C. C., 2005. Model–data synthesis in terrestrial carbon observation: methods, data requirements and data uncertainty specifications. *Global Change Biology*, 11: 378-397
- Rennie, P.J., 1955. The uptake of nutrients by mature forest growth. *Plant and Soil*, VII: 49-95
- Rennie, P.J., 1957. Les prélèvements des éléments nutritifs des forêts exploitées et leur importance sur les sols pauvres pour la production de bois. *Revue Forestière Française*. 7: 529-545
- Reynolds, B., Wood, M.J., Truscott, A.M., Brittain, S.A. and Williams, D.L., 2000. Cycling of nutrient base cations in a twelve year old Sitka spruce plantation in upland mid-Wales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4: 311-321
- Richer de Forges, A., Feller, C., Jamagne, M., Arroays, D., 2008. Perdue dans le triangle des textures. *Etude et Gestion des Sols*, 15: 97-111
- Riha, S.J., James, B.R., Senesac, G.P. and Pallant, E., 1986. Spatial variability of soil pH and organic matter in forest plantations. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1347-1352
- Rondeux J. & Thibaut A., 1996. Tables de production relatives au Douglas. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique, 152 p.

- Scarascia-Mugnozza, G., Bauer, G., Persson, H., Matteucci, G., and Masci, A., 2000. Tree biomass, growth and nutrient pools. In: Schulze E-D (ed) Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. Ecological studies 142. Springer, Heidelberg, pp 49-62.
- Schwarzmeier, M., 2000. Erhebung der oberirdischen Biomassevorräte von Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst.) im Bereich der Waldklimastationen Ebersberg und Flossenbürg. Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Forstwirtschaft, Germany 155 p.
- Sicard, C., Saint-Andre, L., Gelhaye, D. and Ranger, J., 2006. Effect of initial fertilisation on biomass and nutrient content of Norway spruce and Douglas-fir plantations at the same site. *Trees*, 20: 229-246
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Andreassen, K., de Lange, H., Garcia Fernandez, P., Hildingsson, A. and de Vries, W. 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management* 258: 1735-1750
- Somogyi, Z., Cienciala, E., Mäkipää, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A. and Weiss, P. 2007: Indirect methods of large scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*, 126: 197-207
- Somogyi, Z., Teobaldelli, M., Federici, S., Matteucci, G., Pagliari, V., Grassi, G. and Seufert, G., 2008. Allometric biomass and carbon factors database. *Forest-Biogeosciences & Forestry*, 1: 107-113
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. and Skovsgaard, J., 1996: Growth Trends in European Forests; Studies from 12 countries. European Forest Research Institute report 5. Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, New York), 372 p.
- Staebler, G.R., 1979. Rationalization of biomass harvest and use. Rationalization of Biomass Harvest and Use. In: Proceedings: Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling. Broomall, PA: Northeast Forest Experimental Station, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 22-31
- Stevens, P.A., Norris, D.A., Williams, T.G., Hugues, S., Durrant, D. W. H., Anderson, M.A., Weatherley, N.S., Hornung M. and Woods C. 1995. Nutrient losses after clearfelling in Beddgelert Forest: a comparison of the effects of conventional and whole-tree harvest on soil water chemistry. *Forestry*, 68 (2): 115-131
- Stokes, B.J., 2002. Harvesting small tress and forest residues. *Biomass and Bienergy*, 2: 131-147.
- Stupak, I., Nordfjell, T. and Gundersen, P., 2008. Comparing biomass and nutrient removals of stems and fresh and predried whole trees in thinnings in two Norway spruce experiments. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 2660-2673
- Sverdrup, H. and Rosén, K. 1998. Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability. *Forest Ecology and Management*, 110: 221-236
- Svoboda, M, Matejka, K. and Kopacek, J. 2006. Biomass and element pools of selected spruce trees in the catchments of Plesne and Certovo Lakes in the Sumava Mts. *Journal of Forest Science*, 52: 482-495
- Teobaldelli, M., Somogyi, Z., Migliavacca, M. and Usoltsev, V., 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*, 257: 1004-1013

- Terlinden, M., 2010. Jusqu'à la dernière brindille ? Quelques réflexions sur la gestion des rémanents et résidus de coupes en forêt. *Silva Belgica*, 117: 36-37
- Thiffault, E., Morissette, J., 2009. Analyse de la sensibilité des sites pour le territoire de l'Abitibi – Témiscamingue et de l'unité d'aménagement forestier de Tembec. Service canadien des forêts, Rapport technique, 97 p.
- Thiffault, E., Paré, D., Brais, S. and Titus, B.D., 2010. Intensive biomass removals and site productivity in Canada: A review of relevant issues. *The Forestry Chronicle*, 86: 36-42
- Turpault, M.-P., Ranger, J., Marques, R. and Ezzaim, A., 1999. Les bilans entrées-sorties, indicateurs de gestion durable des écosystèmes forestiers : cas des plantations de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) des monts du Beaujolais. *Revue Forestière Française*, LI: 184-196
- Valbiom, 2004. La filière bois-énergie, Dossier réalisé pour le compte de la DGTRE, Gembloux, 58 p.
- Vallet, P., Dhôte, J.-F., Le Moguédec, G., Ravart, M. and Pignard, G. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229: 98-110
- Van Breemen, N., Mulder, J. and Driscoll, C.T., 1983. Acidification and alkalinization of soils. *Plant and soil*, 75: 283-308
- Van Camp, N., Vande Walle, I., Mertens, J., De Neve, S., Samson, R., Lust, N., Lemeur, R., Boeckx, P., Lootens, P., Beheydt, D., Mestdagh, I., Sleutel, S., Verbeeck, H., Van Cleemput, O., Hofman, G. and Carlier, L., 2004. Inventory-based carbon stock of Flemish forests: a comparison of European biomass expansion factor. *Annals of Forest Science*, 61: 677-682
- Vande Walle, I., Van Camp, N., Perrin, D., Lemeur, R., Verheyen, K., Vanwesemael, B. and Laitat, É., 2005. Growing stock-based assessment of the carbon stock in the Belgian forest biomass. *Annals of Forest Science*, 62: 1-12
- Vilén, T., Meyer, J., Thürig, E., Lindner, M. and Green, T., 2005. Improved regional and national level estimates of the carbon stock and stock change of tree biomass for six European countries, (Deliverable 6.1). Improved national estimates of the carbon stock and stock change of the forest soils for six European countries (Deliverable 6.2). CarboInvent Project: Forest Institute, Joensuu, *Joensuu, Finland*, 31p.
- Vanmechelen, L., Groenenmans, R. and Van Ranst, E., 1997. Forest Conditions in Europe. Results of a Large-Scale Soil Survey. Technical Report. EC-UN/ECE, Brussels and Geneva, 259 p.
- Walker, J.S., 2009. Private landowners' engagement with woodfuel production: a scoping study in Fife. A report to the Social & Economic Research Group, Forest Research, Forestry Commission, 24p.
- Walmsley, J. D. and Godbold, D.L., 2010. Stump Harvesting for Bioenergy – A Review of the Environmental Impacts. *Forestry*, 83: 17-38
- Walmsley, J. D., Jones, D. L., Reynolds, B., Price, M. H. and Healey, J. R., 2009. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 257: 1104-1111
- Waterlot, G, Beugnies, A., Bintz, J., 1973. Guides géologiques régionaux. Ardenne et Luxembourg. Masson et Cie, Paris, 206p.

Weiss, P., 2006. Preface to the Special Issue: Austrian Biomass Functions. *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 1-102

Weissen, F., Bronchart, L., Piret, A., 1994. Guide de boisement des stations forestières de Wallonie. Ministère de la Région Wallonne (Belgique), Service Documentation-Communication de la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE), Division Nature et Forêts, 145 p. + annexes

Wirth, C., Schumacher, J. and Schulze, E.-D. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24: 121-139

Wutzler, T., Wirth, C. and Schumacher, J., 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. *Canadian Journal of Forest Science*, 38: 1661-1675

Yuste, J.C., Konopka, B., Janssens, I.A., Coenen, K., Xiao, C.W. and Ceulemans, R., 2005. Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology* 25, 701-712

Zabowski, D., Skinner, M.F., Rygielwicz, P.T., 1994. Timber harvesting and long-term productivity: weathering processes and soil disturbance. *Forest Ecology and Management*, 66: 55-68

Zianis, D. and Mencuccini, M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187: 311-332

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. and Mencuccini, M. 2005: Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica, Monographs* 4, 63 p.

7. Index des Tableaux

Tableau 1. Aperçu général des données mises à disposition dans le cadre de l'étude par les différentes sources.....	7
Tableau 2. Arguments concernant l'utilisation de Mg et P ₂ O ₅ comme indicateur du statut nutritif.	10
Tableau 3. Groupes réalisés sur base de la géologie du Grand-Duché de Luxembourg.	12
Tableau 4. Classification des substrats sur base de leur richesse chimique présumée.	13
Tableau 5. Classification et caractérisation des placettes IFL suivant les types stationnels du Gutland et essai de conversion en fonction de la sensibilité chimique (couleurs attribuées par ordre croissant de risques (relatif) : vert clair-vert foncé-beige-orange-rouge).	16
Tableau 6. Tableau croisé de pH pour les placettes de l'IFL différenciées sur base du pH à la Figure 2.	18
Tableau 7. Valeurs des premier et troisième quartiles (Q ₁ et Q ₃) de paramètres physico-chimiques d'intérêt en fonction des différents types de substrats considérés dans l'approche « roche-mère » (valeurs issues de l'inventaire permanent wallon (0-20 cm) et des analyses de profils de la typologie du Gutland (0 cm < P ₁ < 22 cm)).	19
Tableau 8. Classification du risque d'appauvrissement chimique pour chacun des groupes définis par l'approche géo-pédologique.	20
Tableau 9. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe.	23
Tableau 10. Concentrations (mg* kg ⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de chêne (futaie).	29
Tableau 11. Concentrations (mg* kg ⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de chêne (taillis).....	29
Tableau 12. Concentrations (mg* kg ⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de hêtre.....	30
Tableau 13. Concentrations (mg* kg ⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches d'épicéa.....	31
Tableau 14. Concentrations (mg* kg ⁻¹ de biomasse) en éléments nutritifs dans les branches de douglas.....	32
Tableau 15. Concentrations médianes des branches de chêne (n=8; taillis n=7), hêtre (n=13), épicéa (n=38) et douglas (n=16).	32
Tableau 16. Concentrations en éléments nutritifs des branches d'un an présentées par différents auteurs.	33
Tableau 17. Concentrations médianes du feuillage de chêne (n=7; taillis n=7), hêtre (n=14), épicéa (n=32 et 12) et douglas (n=14 et 3).	33
Tableau 18. Concentrations médianes en éléments nutritifs dans le tronc pour le chêne (n=7), le hêtre (n=12), l'épicéa (n=22) et le douglas (n=6).....	34
Tableau 19. Concentrations médianes en éléments nutritifs pour le bois de tronc pour le chêne, le hêtre, l'épicéa et le douglas.	34
Tableau 20. Concentrations médianes en éléments nutritifs pour l'écorce pour le chêne, le hêtre, l'épicéa et le douglas.....	34
Tableau 21. Valeur des densités basales retenues dans ce travail pour chacune des essences étudiées.	37
Tableau 22. Valeurs des facteurs d'expansion dans les pays limitrophes du Grand-Duché de Luxembourg.	38
Tableau 23. Extrait de la table de production de Schober (1967) pour un niveau d'éclaircie modérée et une classe de fertilité 1.	50
Tableau 24. Minéralomasse totale exportée par ha par l'exploitation du bois fort des arbres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité de peuplements de hêtre (140 ans) de classe de fertilité 1.	50
Tableau 25. Minéralomasse exportée par ha et par an par l'exploitation du bois fort des arbres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité de peuplements de hêtre de classe de fertilité 1.	51
Tableau 26. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des chênes éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.	51
Tableau 27. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des hêtres éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.	51
Tableau 28. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des épicéas éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.	51
Tableau 29. Minéralomasse totale exportée par l'exploitation du bois fort des douglas éclaircis (hors coupe finale) jusqu'à l'âge d'exploitabilité pour différentes classes de fertilité.	52
Tableau 30. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des chênes éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 200 ans*.	52
Tableau 31. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des hêtres éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 140 ans.....	52
Tableau 32. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des épicéas éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 70 ans.....	52

Tableau 33. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort des douglas éclaircis (hors coupe finale) selon la classe de fertilité pour une durée de rotation de 60 ans.	53
Tableau 34. Volume sur pied d'un peuplement à l'âge d'exploitabilité.	53
Tableau 35. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 200 ans (chêne).	53
Tableau 36. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 140 ans (hêtre).	54
Tableau 37. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 70 ans (épicéa).	54
Tableau 38. Exportation moyenne annuelle en éléments nutritifs par exploitation du bois fort du peuplement principal à 60 ans (douglas).	54
Tableau 39. Quantité exportée pour différents scénarios d'exploitation dans le cas d'un peuplement de hêtre de classe de fertilité 1.	55
Tableau 40. Quantité exportée annuellement pour différents scénarios d'exploitation dans le cas d'un peuplement de hêtre de classe de fertilité 1.	56
Tableau 41. Estimation des minéralomasses exportées pour chaque essence de classe de fertilité 1 (tous les rémanents jusqu'à l'âge d'exploitabilité) par la méthode des facteurs d'expansion (valeurs de Vande Walle <i>et al.</i> (2005)).	59
Tableau 42. Dépôts atmosphériques annuels moyens entre 1997 et 2005 mesurés hors couvert dans le bois communal de Virton ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$).	61

8. Index des Figures

Figure 1. Organigramme présentant la proportion de placettes de l'échantillon IFL ayant été associées à un type stationnel de la typologie du Gutland (voir Tableau 5).	15
Figure 2. Répartition des placettes IFL sur base de la clé de détermination du niveau trophique.	17
Figure 3. Schéma conceptuel de la démarche d'estimation des minéralomasses exportées par exploitation des rémanents.	21
Figure 4. Illustration de différentes façons d'estimer la biomasse totale à partir du volume commercial. E : expansion ; C : conversion. (issue de Somogyi <i>et al.</i> , 2007).	37
Figure 5. Evolution de la biomasse des branches pour le chêne en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 46 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.	40
Figure 6. Evolution de la biomasse des branches pour le hêtre en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 47 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.	41
Figure 7. Evolution de la biomasse des branches pour l'épicéa en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 48 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.	42
Figure 8. Evolution de la biomasse des branches pour le douglas en fonction du diamètre (à 130 cm) selon différentes équations allométriques. Pour une équation donnée, l'évolution du diamètre et, le cas échéant, des autres variables explicatives (voir Tableau 48 Annexe VIII), correspond à un site de fertilité 1.	43
Figure 9. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de chêne à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.	44
Figure 10. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de hêtre à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.	45
Figure 11. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches d'épicéa à partir du diamètre mesuré à 1,3 m.	45
Figure 12. Courbe moyenne estimant la biomasse des branches de douglas à partir du diamètre mesuré à 1,3 m. ...	46
Figure 13. Illustration graphique du pourcentage d'exportation additionnelle en éléments majeurs en cas d'exploitation des rémanents des arbres éclaircis (scénario 1) et du peuplement final (scénario 5) par rapport à l'exportation du seul bois fort (=100%) dans le cas du hêtre (classe de fertilité 1).	57
Figure 14. Comparaison des exportations additionnelles en éléments majeurs par exploitation des rémanents des arbres éclaircis (scénario 1) et du peuplement final (scénario 5) par rapport à l'exportation du seul bois fort (=100%) dans le cas du chêne (en haut à gauche), du hêtre (en haut à droite), de l'épicéa (en bas à gauche) et du douglas (en bas à droite) de classe de fertilité 1. Les légendes sont semblables à celles de la Figure 13.	58
Figure 15. Relation entre l'indice de fertilité et l'âge pour les peuplements purs d'épicéa commun au Grand-Duché de Luxembourg.	62

Table des annexes

Annexe I. Etat des lieux de la problématique et des méthodologies existantes	2
I.1. Cadre de décision et recommandations nationales	2
I.2. Méthodologies d'évaluation de la sensibilité des sols à l'exportation des rémanents	7
I.3. Conclusion.....	20
I.4. Références bibliographiques relatives à l'Annexe I	21
Annexe II. Intérêt du pH comme indicateur	24
Annexe III. Intérêt de la texture comme indicateur	29
Annexe IV. Intérêt de la « roche-mère » comme indicateur	31
Annexe V. Estimation des concentrations en éléments dans différents compartiments de l'arbre	36
Annexe VI. Concentrations en éléments dans différents compartiments de l'arbre	55
Annexe VII. Concentrations en éléments dans différents compartiments par essence	65
Annexe VIII. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse des branches	66

Annexe I. Etat des lieux de la problématique et des méthodologies existantes

Cette première annexe présente, d'une part, une synthèse des politiques adoptées par différents pays dans le cadre de la protection des sols et, d'autre part, les méthodologies développées par certains états ou organismes afin d'évaluer les risques consécutifs à l'exportation accrue de rémanents.

I.1. Cadre de décision et recommandations nationales

Suède et Finlande

L'exportation des rémanents est une pratique courante en Finlande et en Suède. Les deux pays ont surtout développé une approche basée sur les coûts d'exploitation de cette ressource (de manière non exhaustive : Asikainen *et al.*, 2002 ; Bohlin and Roos, 2002 ; Berg, 2003 ; Ranta, 2005 ; Röser *et al.*, 2006), probablement parce que les apports d'amendements et de fertilisation sont généralisés et interviennent davantage en terme de frais à supporter qu'en terme de quantité à pourvoir.

Le Conseil National Forestier du Suède (National Board of Forestry, 2002) a publié une série de recommandations concernant les opérations d'exportation de rémanents pour le bois-énergie et les mesures d'amendement/fertilisation compensatoires pour pallier les effets indésirables en terme de déficit nutritionnel et d'impacts environnementaux négatifs (pollution du sol, biodiversité, qualité des eaux de surface ou souterraines). Sverdrup & Rosén (1998) estiment que le risque d'épuisement des cations est réel après un ou deux cycles et ce, dans toute la Suède. Akselsson *et al.* (2007) arrivent aux mêmes conclusions : les pools de cations échangeables sont en diminution, même lors de l'exploitation des seules grumes. Les craintes d'appauvrissement des sols sont donc fondées en cas d'exportation d'arbres entiers, en particulier pour les forêts d'épicéa.

Sur le point particulier de la balance nutritionnelle, le Conseil National Forestier préconise :

- une fertilisation compensatoire, à chaque export de rémanents, composée principalement de cendres (issues de la combustion du bois-énergie et stabilisées). D'autres produits minéraux peuvent éventuellement y être associés. Les apports en cendres et en azote doivent être raisonnés sur base des quantités exportées par hectare et par cycle sylvicole et suivant l'essence et la région du pays considérées ;
- de laisser les aiguilles in situ et de prendre, si possible, le soin de les éparpiller sur toute la surface exploitée ;
- une fertilisation compensatoire obligatoire dans les zones forestières fortement acidifiées, les tourbières ou lorsque la plus grosse partie des aiguilles est évacuée dans le cadre de coupe de régénération.
- Une absence de fertilisation compensatoire lors d'un export par cycle, avec un maintien et dispersion obligatoire des aiguilles ;
- une certaine vigilance par rapport à la teneur en métaux lourds et aux risques de lixiviation des éléments apportés.

Les Suédois sont également attentifs aux dégâts physiques occasionnés aux sols par le matériel d'exploitation ainsi qu'aux impacts des opérations sur la disparition de certains organismes ou la prolifération d'espèces indésirables.

Les sites identifiés à risques et les recommandations pour l'utilisation des ressources forestières pour la production d'énergie sont les suivants (Tableau 1):

Tableau 1. Classification suédoise des sites à risques pour l'exploitation du bois-énergie et recommandations associées (Stupak *et al.*, 2008).

Classes	Recommandations
Sites riches en lichen dans le nord de la Suède	Exportation à éviter si difficultés de régénération
Zones fortement acidifiées	Fertilisation compensatoire obligatoire
Zones tourbeuses	Fertilisation compensatoire obligatoire
Zones sensibles pour l'azote	Exportation des aiguilles possibles si fertilisation compensatoire

En Finlande, la méthode des bilans de masse est également utilisée pour évaluer les pertes en cations en cas d'exploitation d'arbres entiers. La situation semble moins critique qu'en Suède (Heiskala *et al.*, 2001).

La Finlande propose une petite dizaine de types de sites à risque (Stupak *et al.*, 2008). La classification est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Classification finnoise des sites à risques pour l'exploitation du bois-énergie et recommandations associées.

Classes de sites/peuplements	Recommandations d'exportation		
	Exploitation « arbres entiers »	rémanents	souches
Sites de plateau mésique ou sols plus fertiles	/*	Ok	Ok
Sites sub-xériques et xériques	Non	Uniquement si nécessité d'exploiter les souches	Ok
Sites de plateaux arides avec lichens	Non	Non	Uniquement si infections
Forêts tourbeuses avec végétation herbacée et myrtilles	Non	Non	Non
Forêts tourbeuses avec végétation dominée par l'airelle ou plus pauvre	Non	Non	Non
Peuplements sur sites avec affleurements rocheux	/	Non	Non
Peuplements soumis à des perturbations dans la disponibilité des éléments nutritifs	Non	Ok si fertilisation compensatoire en bore	Ok si fertilisation compensatoire en bore
Zones de conservation des eaux	Pas applicable	Non	Non
Peuplements gérés avec > 75% d'épicéa	Non	/	/
Zones ayant déjà subi une exportation de rémanents ou une exploitation « arbres entiers » précédemment	Non	/	/

* cette classe n'est pas définie pour cette utilisation particulière

Une autre classification existe en finnois (Äijälä *et al.*, 2005). Présentée par Thiffault *et al.* (2009), elle oppose deux catégories de risques (faible, élevé) en se basant sur :

- la végétation dominante ;
- la présence de tourbe ;
- la fertilité ;
- la présence de roches, cailloux ou d'une texture grossière ;
- la xéricité du site.

Danemark

Le Danemark voit un avantage évident à l'exploitation du bois-énergie tout en étant soucieux de l'impact qu'une utilisation accrue des écosystèmes forestiers peut avoir par rapport aux opérations sylvicoles traditionnelles. Ceci est d'autant plus vrai que la plus grosse partie du bois-énergie sur le territoire danois est obtenue dans des peuplements non matures (Centre For Biomass Technology, 2002). Dans ce même rapport écrit au nom de l'Agence énergétique danoise, les auteurs estiment qu'il n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances, d'identifier les zones réellement touchées par une surexploitation du sol. Il signale cependant l'existence d'une gamme d'études réalisées en Suède, Finlande et Norvège pour éclaircir ce point (Centre For Biomass Technology, 2002). Aucun document au-delà de cette date n'a cependant été trouvé pour le Danemark.

Les Danois insistent particulièrement sur deux aspects négatifs de l'exploitation des rémanents :

- l'exportation accrue des minéraux par l'utilisation des parties les plus riches en éléments ;
- la réduction de l'apport en matière organique et les conséquences sur la capacité des sols à supporter la production future de bois.

Les cinq classes de sites identifiées sont présentées dans le Tableau 3 (Stupak *et al.*, 2008).

Tableau 3. Classification danoise des sites à exploitation de rémanents limitée.

Classes de sites	Exploitation des rémanents
Peuplements d'intérêt faunistique et floristique non destiné à l'exploitation forestière	Seulement après évaluation
Lisières forestières exposées	A éviter
Zones de conservation de la nature	Recommandée sauf contre-indication conservatoire
Forêts subalternes en particuliers peuplements de pin montagnard	Recommandée mais avec un usage limité des couronnes et seulement après période de séchage
Autres	A éviter sur sols sableux pour les feuilles Fertilisation compensatoire pour les résineux de faibles classes de production

En pratique, les rémanents sont laissés sur site durant l'hiver et sèchent de 4 à 6 mois, ce qui permet de réduire les exportations minérales. Une fertilisation compensatoire est assurée grâce à des cendres produites par la combustion de bois. Tout comme la Suède, le Danemark s'inquiète des pollutions aux métaux lourds (Cd notamment) dues à leur apport.

Royaume-Uni

L'export de rémanents connaît un regain d'intérêt étant donné la possibilité d'utiliser cette ressource dans le cadre du développement des ressources renouvelables en Europe. Pour 2020, le Royaume-Uni vise une utilisation de la biomasse à hauteur de 30% et 12% pour la génération d'électricité et de chaleur respectivement (Vanguelova *et al.*, 2010). Le pays se positionne à la fois vis-à-vis des impacts des plantations à courte durée de rotation destinée à la production d'énergie et de l'accroissement de l'exploitation des rémanents et des souches. Un centre a d'ailleurs été créé en 2005 pour servir d'interface entre les propriétaires et les chercheurs pour répondre à toutes les questions techniques et pratiques apparues avec l'émergence des nouvelles opportunités pour la filière bois.

Dans le cadre de la gestion durable des forêts, la « Forestry Commission » a d'abord considéré les impacts des opérations sylvicoles sur les propriétés physiques du sol (Nisbet *et al.*, 1997 ; Forestry Commission, 2004) avant d'y adjoindre les risques physico-chimiques sur les sols (perte de fertilité, acidification, perte de carbone) et les eaux (acidification, eutrophisation).

Les recommandations concernant la gestion des rémanents dépendent des contraintes imposées par le site et les objectifs d'exploitation. Une publication publiée en 2007 et modifiée en 2009 (Forestry Commission, 2009a) guide les propriétaires dans le choix des sites où l'exploitation des rémanents est envisageable.

Les critères suivants sont pris en considération (Moffat *et al.*, 2006) :

- charges critiques d'acidité de la zone ;
- position topographique ;
- proximité d'eaux de surfaces sensibles à la pollution ;
- statut azoté de la zone (zones vulnérables à la pollution par les nitrates par exemple) ;
- présence de types de sols plus sensibles (par ex. tourbes, gleys) ;
- impact de la décision sur d'autres fonctions de la forêt ou sur des actions futures.

Le contexte de la problématique de l'exportation accrue des rémanents pour le bois-énergie au Royaume-Uni est un peu particulier puisque ceux-ci sont déjà mobilisés à d'autres fins. En effet, les

branches de faible diamètre servent à la création d'un tapis protecteur sur lequel les machines sont amenées à circuler de manière à réduire les charges appliquées sur le sol et, par là même, prévenir les risques de compaction, d'orniérage et d'érosion. Par ailleurs, l'absence de contact des roues avec la surface préserve la litière et les couches organiques du sol. Une mobilisation accrue des rémanents pour le bois-énergie implique donc une récupération de ces branches formant le tapis protecteur.

En ce qui concerne l'exploitation des souches, un guide pratique a été édité récemment (Forestry Research, 2009b) et une note d'information est en préparation (Vanguelova *et al.*, 2010).

Canada

Au Canada, il a été estimé que l'utilisation de 50% des rémanents pour la production du bois-énergie doublerait la contribution du secteur forestier aux besoins énergétiques nationaux.

Le pays a un long passé en matière de suivi de l'impact de l'exploitation forestière sur la fertilité et l'acidification des sols. Les recommandations ayant été formulées sur base d'outils, les classifications canadiennes sont présentées ultérieurement.

USA

Suite à l'augmentation du nombre de projets recourant à l'utilisation des ressources forestières pour la production d'énergie, une organisation de professionnels du milieu forestier a proposé une série de lignes directrices pour pallier les éventuelles lacunes des pratiques de gestion existantes (« *Best Management Practices* ») dans le cadre d'une augmentation de l'exploitation forestière (Evans and Perschel, 2009). En général, ces dernières ne s'attardent, pour les sols, que sur les risques de compaction.

Le Minnesota a néanmoins ajouté quelques recommandations concernant l'exploitation sur les sols tourbeux, superficiels ou à drainage excessif (Minnesota Forest Council, 2005).

Le Wisconsin dresse la liste de différents types de sols peu susceptibles de supporter l'exportation de rémanents (Herrick *et al.*, 2009) :

- sols pauvres en éléments nutritifs (indicateur : teneur en argile < 3% à 40 cm) ;
- sols superficiels ou sur dépôts sableux, graveleux et/ou riches en silices ;
- sols organiques pauvres (dysic Histosols).

Les zones concernées sont identifiées à l'aide des cartes du Natural Resources Conservation Service (NRCS), disponibles en ligne (<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/>).

Le Massachusset suggère également d'éviter l'exportation des rémanents sur des sols de faible fertilité (sols de textures grossières, superficiels ou tourbeux avec la teneur en calcium comme indicateur principal) ou sous chênaies (Kelty *et al.*, 2008).

D'autres Etats soulèvent la problématique de l'enlèvement de la litière.

I.2. Méthodologies d'évaluation de la sensibilité des sols à l'exportation des rémanents

European Environmental Agency

L'Agence Environnementale Européenne (EEA) a développé une classification des sites en fonction de leur aptitude à supporter l'exportation de rémanents afin de concilier les considérations environnementales avec les objectifs économiques européens.

L'approche européenne a été menée en deux étapes: l'EEA a d'abord simulé les ressources potentielles en rémanents à différentes dates (2005, 2010, 2020, 2030) sous une gamme de contraintes et de scénarios d'évolution (négatifs ou positifs) des potentiels théoriques (Modèle EFISCIEN). La classification proprement dite a été créée dans un second temps. Elle est basée sur un système d'informations géographiques dont les différentes couches reprennent (Tableau 4) :

Tableau 4. Présentation des données sources de l'EEA.

Types de données	Résolution	Source
Base de données des sols	10 x 10 km	European Soil Bureau Network
Données topographiques et géologiques	0.8 x 0.8 km	Shuttle Radar Topography Mission, flown (02/2000) U.S. Geological Survey's GTOPO30
Carte forestière	1 x 1 km	European Forest Institute
Dépôts atmosphériques azotés	50 x 50 km	European Monitoring and Evaluation Programme

Les impacts environnementaux considérés concernent la protection des écosystèmes (indicateurs: zones protégées et biodiversité des sites), le maintien de la fertilité des sites (indicateurs: type de sol et saturation en base), les risques d'érosion (indicateurs: pente et altitude) et de compaction des sols (indicateurs: présence/absence de tourbe et régimes hydriques). L'effet des dépôts et de la fertilisation en azote sur le potentiel d'exploitation des rémanents a été analysé dans une étude de cas. La résolution du produit final est de 1 km, de façon à s'accorder à la carte forestière. Quatre catégories ont été définies en fonction de leur aptitude (Tableau 5).

Tableau 5. Présentation des classes d'aptitudes de l'EEA.

Aptitude	Quantité max exportable (% du type concerné)*	Quantité max exportable (% du total biomasse)*	Hypothèses de base
Elevée	75% tronc et branches	60%	1) Tous les rémanents ne sont pas techniquement exploitables 2) prévention de la compaction 3) exclusion des habitats inaccessibles ou écologiquement sensibles
Moderée	50% tronc et branches	40%	Exploitation d'une partie des rémanents et uniquement dans les zones facilement accessibles
Faible	15% tronc et branches	12%	
Inapte	0%	0%	/

*considérant que le feuillage n'est pas exporté

** dans le cas d'une exportation des feuilles ou épines en supposant que celles-ci représentent 20% de la biomasse aérienne totale.

Les indicateurs ont été choisis et agencés de la manière suivante :

- les types de sols ont été classés suivant leur fertilité présumée. Parce que cette classification n'était toujours pas suffisante, une distinction basée sur le taux de saturation en bases a été appliquée au sein des types reprenant une large gamme de fertilité. Cet indicateur permet de discriminer les sites d'aptitude élevée de ceux d'aptitude moyenne. L'EEA considère qu'une saturation en base de 50% au moins est suffisante pour l'exploitation intensive de rémanents.
- Les risques d'érosion ont été appréhendés via l'utilisation du degré de pente avec des valeurs seuils de 5, 10 et 25 degrés (Brierley *et al.* 2004). Etant donné la plus forte occurrence de pentes fortes dans les régions de plus hautes altitudes, il a été considéré que les forêts au-delà de 1500 m sont inaptes à l'exportation de rémanents ;
- Pour les risques de compaction des sols, outre le cas particulier des tourbières, considérées comme inaptes à la récolte des rémanents quelle que soit leur productivité (approche conservatrice), les sols présentant une saturation en eau dans les 40 premiers cm durant 11 mois ou plus par an, sont également écartés. Les sites humides dans les 80 cm durant 6 mois ou plus sont classés comme faiblement aptes.

Le Tableau 6 présente un résumé des impacts, indicateurs et classifications.

Tableau 6. Valeurs seuils des classes d'aptitude à l'exploration des rémanents (EAA, 2007).

Environmental impact	Highly suitable	Moderately suitable	Marginally suitable	Unsuitable
Level of residue extraction	75 %	50 %	15 %	0 %
<i>Soil erosion</i>				
Slope	< 5° (< 9 %)	5° - 10° (9 % - 18 %)	10° - 25° (18 % - 47 %)	> 25° (> 47 %)
Elevation	< 1 500 m	< 1 500 m	< 1 500 m	> 1 500 m
<i>Soil compaction</i>				
Peat land	No	No	Peat	
Soil water regime	Wet to a depth of 80 cm < 6 months	Wet to a depth of 80 cm < 6 months	Wet to a depth of 80 cm > 6 months	Wet to a depth of 40 cm > 11 months
<i>Soil fertility</i>				
<i>Base saturation</i>				
in topsoil	> 50 %	< 50 %		
in subsoil	> 50 %	< 50 %		
Soil type (FAO85 Lv1)	Cambisol	Podzol	Histosol	Ranker
	Chernozem		Ferralsol	Arenosol
	Podzoluvisol	Water	Planosol	Lithosol
	Kastanozem			Xerosol
	Rendzina			Solonchak
	Gleysol			Regosol
	Phaeozem			Acrisol
	Fluvisol			Solonetz
	Luvisol			Marsh
	Greyzem			
	Andosol			
	Vertisol			
	Town			

Quelques remarques doivent impérativement être prises en compte avant toute utilisation de l'outil cartographique développé par l'EEA :

- Compte tenu de la faible résolution spatiale, les unités considérées comme des villes ou des plans d'eau peuvent parfois contenir des zones boisées non négligeables. Afin de ne pas sous-estimer le potentiel d'exploitation, ces unités ont été classées dans la catégorie d'aptitude élevée ;
- Les étendues d'eau ont été classées comme étant d'aptitude moyenne parce que ces unités sont principalement localisées en Finlande où cette catégorie domine ;
- Les résultats du modèle EFISCEN (Etape 1) n'étant pas des données spatiales, l'EEA a dû les considérer comme homogènes au sein de chaque unité spatiale pour pouvoir les combiner à la carte de sensibilité (Etape 2). Ceci entraîne l'existence d'une certaine incertitude dans l'utilisation des résultats finaux dans les pays où toutes les ressources forestières ne sont pas disponibles pour le bois-énergie (non homogénéité des ressources) ;
- Le modèle EFISCEN n'a pu être appliqué à quatre pays dont le Grand-Duché de Luxembourg en raison du manque de données nationales.

Pays nordiques et baltes

A la pointe en termes d'utilisation des forêts, les pays nordiques ont développé quelques programmes informatiques d'aide à la décision autour des années 2000¹ :

- SNURRAN, en Suède, calcule les quantités de biomasse et d'éléments nutritifs enlevés ainsi que les quantités de cendres nécessaires pour compenser l'effet acidifiant ;
- PRODMOD, en Suède toujours, permet de simuler le développement des peuplements pour différentes espèces, les potentiels de production et calcule les quantités de biomasse et d'éléments nutritifs des rémanents et du peuplement restant sur pied ;
- ESBEN, au Danemark, présente un fonctionnement similaire à SNURRAN ;

Etant uniquement concentrés sur des aspects strictement écologiques, leur utilisation est restée relativement limitée.

Wood-en-Man² (**Wood for energy-** a contribution to the development of sustainable forest **Management**) est un projet sponsorisé par la Commission Européenne (Cinquième Programme Cadre : qualité de vie et gestion des ressources du vivant) qui regroupe des chercheurs de divers pays (Danemark, Estonie, Finlande, Lettonie, Lituanie, Norvège et Suède). L'objectif global est de développer des conseils de gestion opérationnelle et des recommandations au niveau national et régional en réponse à l'utilisation croissante de la biomasse pour le bois-énergie.

Un de leurs objectifs (six au total) concerne la vulnérabilité des écosystèmes à la perte d'éléments nutritifs. Ce sujet a été abordé sous deux angles : via l'estimation de l'équilibre nutritionnel au niveau du peuplement et par le développement de modèles de bilan d'éléments de manière à déterminer l'aptitude des sols à libérer des éléments.

Un programme informatique d'aide à la décision, « EnerTree », a été développé dans ce cadre par Röser *et al.*, (2006). Il se veut être un lien entre la communauté scientifique (par la base scientifique des données) et les utilisateurs finaux (par une utilisation simple et pragmatique), principalement les propriétaires forestiers qui doivent résoudre un dilemme entre aspects économiques et écologiques (y compris biodiversité). Sa conception s'inscrit dans le contexte d'expansion de la pratique d'exportation des rémanents pour le bois-énergie aux dans les pays baltes et d'Europe centrale. EnerTree propose six types de critères décisionnels: « Volume,

¹ Articles de références donnés dans Pasanen *et al.*, (2008)

² Site hébergé par l'université de Copenhague : <http://www.flec.kvl.dk/wood-en-man/>

biomasse et énergie », « aspects économiques », « bilan nutritif », « biodiversité », « insectes et nuisibles » et « carbone ».

En ce qui concerne l'exportation des rémanents, le programme propose une série de recommandations concernant notamment les risques de pertes d'éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) et la fertilisation compensatoire éventuelle. Différents scénarios sont possibles :

- récupération des branches et aiguilles en frais (scénarii « Green 1 et 2 ») ;
- récupération des branches et aiguilles avec fertilisation (scénario « GreenF ») ;
- récupération des branches sèches sans les aiguilles (scénario « Brown ») ;
- pas de récupération de rémanents (« Stems »).

Le programme nécessite une série de données d'entrée à trois niveaux :

- localisation générale : pays, région, dépôt azoté, somme de température ;
- site : type de site, type de sol, stade de développement, surface d'exploitation ;
- peuplement : espèces, surface terrière, hauteur moyenne, diamètre moyen à 1,3 m et âge.

A l'heure actuelle, le programme, basé sur des modèles et fonctions finnois, doit être adapté aux six autres pays. L'incorporation d'une analyse des coûts d'exploitation est également envisagée.

Royaume-Uni

L'évaluation « traditionnelle » des impacts de la récolte sur les sols est basée sur les travaux de Pyatt (1982). Ce dernier décrit la susceptibilité de différents types de sols du Royaume Uni par rapport à deux types d'impacts:

- dégâts liés aux opérations de débardage en trois classes de risques :
 - o faible (sous conditions « sèches ») ;
 - o moyen (restrictions temporelles pour les opérations et usages de mesure de protection physique des sols) ;
 - o haut ;
- épuisement de la fertilité en deux classes de risque :
 - o bas ;
 - o élevé.

La Forestry Commission (Forest Research, 2009) a utilisé ces travaux pour éditer ses propres tableaux de classes de risque pour chacune des trois principales menaces identifiées par leur soin pour les sols : dégâts physiques au sol (Tableau 7), fertilité (Tableau 8) et acidification (Tableau 9).

Tableau 7. Répartition des types de sols en fonction des catégories de risque de dégradation physique des sols (Forest Research, 2009a).

Risk Category	Forestry Commission Soil Types
Low	Brown earths, Podzols (except peaty (3p) type, Rankers (except gley (13g) and peaty (13p) types), Skeletal soils, Calcareous soils and Littoral soils (except sands with shallow (15g) and very shallow (15 w) water-table).
Medium	Peaty gley soils (except deep (6p) phase), Surface-water gleys, Ground-water gleys*, Peaty podzols (3p)*, Ironpan soils*, Gley and Peaty Rankers (13g, 13p).
High	Peatland/bog soils, deep phase peaty gleys (6p) and Littoral sandy soils with shallow (15g) or very shallow water-table (15w).

* Where the depth of surface peat layer in the peaty phases (3p, 4p and 5p) exceeds 25 cm, these should be classed as high risk for ground damage.

Tableau 8. Répartition des types de sols en fonction des catégories de risque de perte de fertilité (Forest Research, 2009a).

Risk Category	Forestry Commission Soil Types
Low	Brown earths (except podzolic type (1z)), Surface-water gleys (except podzolic type (7z)), Ground-water gleys, Calcareous soils, <i>Juncus</i> bogs.
Medium	Podzolic brown earths (1z), Podzolic surface-water gleys (7z), Ironpan soils (except podzolic (4z) and Ericaceous (4e) types), Peaty gley soils (except podzolic (6z) type), <i>Molinia</i> bogs (9a,b).
High	Unflushed peatland/bog soils, <i>Molinia</i> bogs (9c-e), Podzolic peaty gleys (6z), Podzolic (4z) and Ericaceous (4e) ironpan soils, Podzols, Littoral soils, Rankers and Skeletal soils.

Tableau 9. Répartition des types de sols en fonction des catégories de risque liés à l'acidification (Forest Research, 2009a).

Risk Category	Forestry Commission Soil Types
Low	Brown earths (except podzolic type (1z)), Ground-water gleys, Calcareous soils, <i>Juncus</i> bogs.
Medium	Podzolic brown earths (1z), Ironpan soils (except podzolic (4z) and Ericaceous (4e) types), Surface-water gleys, Peaty gley soils (except podzolic (6z) type) and <i>Molinia</i> bogs (9a,b).
High	Unflushed peatland/bog soils, <i>Molinia</i> bogs (9c-e), Podzolic peaty gleys (6z), Podzolic (4z) and Ericaceous (4e) ironpan soils, Podzols, Littoral soils, Rankers and Skeletal soils.

La synthèse de ces différents tableaux permet à la Forestry Commission de donner une série de recommandations pour chaque type de sols en fonction de leur classification la plus sensible. Ces conseils suggèrent une restriction quantitative et temporelle (classe de risque moyen) ou une absence d'exportation pure et simple des rémanents (classe de risque élevé) sauf en cas de traitement compensatoire et dans un contexte bien documenté.

La Forestry Commission insiste sur le fait que ces conseils de gestion sont basés sur un jugement d'expert et dépendent de l'état des connaissances. La classification se veut donc évolutive et est affinée en fonction des avancées scientifiques en la matière.

Tableau 10. Distribution des types de sols par catégories de risque et classification de l'effet combiné de ceux-ci (Forest Research, 2009a).

Soil group	Soil type	Ground damage	Soil fertility	Soil Acidity	Combined Factors
Brown earths	1, 1d, u	L	L	L	L
	1z	L	M	M	M
Podzols	3, 3m	L	H	H	H
	3p	M*	H	H	H
Ironpan soils	4, 4b, 4p	M*	M	M	M*
	4e, 4z	M	H	H	H
Calcareous soils	12a, b, t	L	L	L	L
Ground water gleys	5, 5p	M*	L	L	M*
Peaty gleys	6	M	M	M	M
	6p	H	M	M	H
	6z	M	H	H	H
Surface water gleys	7, 7b	M	L	M	M
	7z	M	M	M	M
<i>Juncus</i> bogs	8a, b, c, d	H	L	L	H
<i>Molinia</i> bogs	9a, b	H	M	M	H
	9c, d, e	H	H	H	H
Unflushed bogs	11a, b, c, d	H	H	H	H
Rankers	13b, r, z	L	H	H	H
	13g, p	M	H	H	H
Skeletal soils	13s	L	H	H	H
Littoral soils	15s, d, e, i	L	H	H	H
	15g, w	H	H	H	H

* The risk category for 3p, 4p and 5p soils should be changed to high for ground damage and thus for the combined factors where the depth of the peaty surface layer is >25 cm.

Dans le contexte d'intensification de l'utilisation des rémanents, une autre étude a été réalisée sous la conduite de l'université de Cranfield (Brierley *et al.*, 2004). Après une revue bibliographique de l'exploitation par « arbres entiers » et de ses conséquences environnementales, une classification des risques liés à l'export de rémanents est proposée en tenant compte de deux échelles :

- l'échelle des massifs forestiers, à laquelle est réalisée l'export des rémanents et à laquelle interviennent des contraintes environnementales et de gestion (économique et durable) ;
- l'échelle nationale, nécessaire à la prise en compte de considérations économiques en lien avec la mobilisation de cette « nouvelle ressource » (coûts, rentabilité, avantages,...).

L'approche choisie consiste en une modélisation des risques physico-chimiques d'une part, et la sélection de sept sites d'étude maximisant la diversité des conditions éco-climatiques et les différents types de boisements au Royaume-Uni (y compris Ecosse et Pays de Galles) d'autre part.

La modélisation est basée sur un SIG, prenant en compte une série de données topographiques, géologiques, pédologiques, climatiques et sylvicoles. Le modèle est alimenté par des ensembles de données dérivées non pas directement des sols mais de cartes existantes (échelle 1 : 250 000). Celles-ci concernent (Tableau 11) :

Tableau 11. Présentation de la classification des risques en fonction des données disponibles.

Sujet des cartes	Risque associé	classes distinguées
fertilité des sols (via utilisation du pH du sol)	fertilité insuffisante des sols pour assurer la croissance des arbres	3
charges critiques d'acidité	acidification des sols	5 (des valeurs allant de 0.2 kmol H ⁺ ha ⁻¹ year ⁻¹ à >2.0 kmol H ⁺ ha ⁻¹ year ⁻¹)
humidité du sol	Compaction, orniérage	6 sur base de caractéristiques hydrologiques des sols intégrées à des données climatiques
potentiel de lixiviation	enrichissement des eaux souterraines en éléments, pollutions	classification à 2 niveaux combinant des caractéristiques lithologiques (3 classes) et pédologiques (3 classes)
risque érosif via une approche topographique	érosion et transport de sédiments dans les eaux de surface	Modèle numérique de terrain (données topographiques, de longueur et de degré de pentes)

Le modèle existe à la fois sous forme vectorielle et matricielle (*rasterisation*).

Le cumul des risques a mené à l'identification de quatre classes d'aptitude par rapport à l'évacuation des rémanents, à savoir, hautement, modérément et faiblement aptes ou inaptes.

Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux d'un système expert afin d'estimer leur pertinence.

France

Dans le cadre du programme bois-énergie 2000-2006, la France, via l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) a souhaité anticiper les répercussions environnementales de l'augmentation de la demande énergétique sur les écosystèmes forestiers, notamment sur la composition et la structure des sols. Une collaboration a été établie entre divers partenaires (ADEME, AFOCEL, IDF, INRA et UCFF)³ pour réaliser une synthèse des impacts possibles dans un premier temps puis pour proposer des conseils visant à limiter ceux-ci (Cacot *et al.*, 2006).

Les enjeux sont bien synthétisés dans la citation suivante : « *Les branches et feuillages ont par nature une teneur en éléments minéraux très élevée, nettement plus que le tronc seul habituellement exploité. La récolte des rémanents, ramassés séparément du tronc ou par arbre entier, s'accompagne donc d'une forte exportation minérale. Il convient alors d'être vigilant aux risques d'appauvrissement des sols forestiers du fait de cette récolte* » (Cacot *et al.*, 2006).

Ce travail a dès lors débouché sur la rédaction du guide pratique de la récolte raisonnée des rémanents destiné aux propriétaires et gestionnaires forestiers. Celui-ci propose une typologie de sensibilité des sols à la récolte de rémanents à partir de quelques critères simples de terrain. Le diagnostic s'obtient en croisant le résultat d'identification du type d'humus avec celui de la texture dominante à 20 cm de profondeur. Deux autres paramètres sont également pris en compte dans le diagramme diagnostic (Figure 1) : il s'agit de la présence de calcaire actif (via effervescence ou non à l'HCl) et du pH de l'horizon de surface.

³ ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Etablissement public à caractère industriel et commercial)
AFOCEL ; Association forêt cellulose (organisme privé de recherche)
IDF : Institut pour le Développement Forestier (Organisme de recherche scientifique et technique)
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique (organisme de recherche scientifique publique finalisée)
UCFF : Union de la Coopération Forestière Française (coopératives forestières et les groupements de gestion)



Figure 1. Diagramme de sensibilité des sols en fonction de la texture et du niveau trophique.

Le diagnostic final est confronté aux observations de terrain, notamment aux groupes phytosociologiques présents.

Le guide propose par ailleurs une série de fiches reprenant des conseils généraux et des recommandations pratiques en cas de récolte des rémanents pour chacune des trois classes de sensibilité (faible, moyenne, forte). Dans certains cas, une fertilisation est conseillée pour compenser les exportations minérales après récolte.

Suite aux questions non résolues lors de la synthèse bibliographique et la rédaction du guide pratique, l'ADEME a lancé une nouvelle étude fin 2005 (Cacot *et al.*, 2007) ayant pour objectifs de :

- valider les tarifs de minéralomasse existants (taillis divers, Douglas) ;
- quantifier précisément les exportations minérales liées à une ou deux récoltes de rémanents sur une sélection de 17 chantiers bois énergie représentatifs (Pin maritime, Douglas, feuillus divers dont Chêne) et les comparer par rapport à une exploitation conventionnelle ;
- évaluer les choix environnementaux de manière économique.

Les conseils donnés pour chaque peuplement étudié confirment ceux présentés dans le guide pour les 3 classes de sensibilité, à l'exception de la classe de sensibilité « moyenne ». Celle-ci a, alors, été subdivisée en trois sous-catégories (Figure 2).

Caractéristiques du sol	1	2	3
pH	< 4,7	[4,7 – 5,3]	> 5,3
Taux de saturation	< 25-30 %	[30% - 55%]	> 55 %
Hydromorphie	Présente		Absente
Antécédent cultural	Appauvrissant (sur-exploitation du taillis)		Fertilisante (amendement)
Conseils de récolte	Identiques à ceux de la classe de sensibilité forte	<ul style="list-style-type: none"> - Taillis : 30 ans entre 2 récoltes des rémanents - Futaie résineuse : une seule récolte des rémanents dans la vie du peuplement - Futaie feuillue : une récolte des rémanents à chaque éclaircie si la rotation est de 20 ans ou une éclaircie sur 3 si la rotation est de 10 ans - Au-delà des niveaux de récolte conseillés, une compensation minérale est à réaliser (amendement de 2 t/ha) 	Identiques à ceux de la classe de sensibilité faible (en veillant à ne pas épuiser le capital éventuel de fertilité héritée)

Figure 2. Subdivision de la classe de sensibilité moyenne du guide ADEME 2006.

La valorisation des résultats sous forme d'articles scientifiques et/ou techniques n'était pas clôturée à l'issue de la rédaction de ce document et ne semble pas encore avoir été finalisée.

Enfin, au cours d'un compte-rendu de réunion en 2009, l'ADEME signale que « les autrichiens ont développé des indices synthétiques permettant d'apprécier la sensibilité physico-chimique des sols à la récolte des rémanents (y compris le tassement) et qu'il pourrait être intéressant de se rapprocher d'eux pour de futures études » (Ademe, 2009). Nous supposons qu'il s'agit du numéro spécial consacré aux équations allométriques de biomasse de l'Austrian Journal of Forest Science de 2006.

Les résultats du guide pratique de l'ADEME sont en cours de valorisation :

- par L'ONF via la réalisation une carte de sensibilité des sols de France aux exportations minérales. Cette carte a pour but de fournir aux gestionnaires forestiers une indication générale concernant la répartition en France des sols des trois classes de sensibilité. Des indications de sensibilité des sols au tassement sont aussi données en marge de celle-ci. Cette carte a ses limites étant donné son échelle de réalisation, sa non exhaustivité et l'existence de certaines incertitudes.
- Par le Lerfob (Laboratoire d'étude des ressources forêt bois, unité mixte de recherche Engref / Inra) avec le concours de l'ONF à plus petite échelle. Une carte des classes de pH des sols du quart Nord Est correspondant aux classes de sensibilité du guide Ademe pour l'exploitation du bois-énergie est présentée à titre illustratif dans un numéro spécial des Rendez-vous techniques de l'ONF (Nicolas *et al.*, 2007). Cette dernière n'a pas été publiée mais fait l'objet d'études régionales plus précises.

Canada-Québec

Dans un article récent, Thiffaut *et al.* (2010) font le point de la problématique de l'utilisation des rémanents pour le bois-énergie et celle, plus globale de la gestion du cycle des éléments dans les écosystèmes forestiers.

Les auteurs rappellent que les inquiétudes canadiennes en matière d'exploitation des ressources forestières à des fins énergétiques ne datent pas d'hier : suite au choc pétrolier des années 1970, le Service Forestier Canadien avait initié le programme *ENFOR* (*ENergy from the FORest*) incluant une série d'outils permettant d'évaluer les exportations admissibles. Les travaux ont notamment débouché sur l'élaboration d'un modèle de prévision des effets de la récolte forestière sur la productivité et le cycle des éléments nutritifs à long terme appelé *FORCYTE* (*FORest nutrient CYcling Trend Evaluation*). D'autres initiatives dans le domaine de la modélisation ont été développées au cours des années. Plusieurs provinces canadiennes se sont également dotées de sites de recherches suivis à long terme pour différents types d'études, dont l'impact de l'exportation minérale par exploitation des rémanents (Titus *et al.*, 2008).

Des méthodes basées sur des bilans statiques ont également été développées en couplant les résultats de ces travaux et l'estimation des apports d'éléments par dépôts atmosphériques et altération. Plusieurs approches distinctes existent :

- Le bilan d'éléments au Nouveau Brunswick (Government of New Brunswick, 2008). Un outil d'aide à la décision pour la répartition durable de la biomasse forestière à l'échelle des peuplements a ensuite été mis sur pied. Le SIG permet d'identifier les zones à hauts risques en ce qui concerne l'export de rémanents. Il s'agit de sols :
 - o tourbeux ;
 - o minces (<30 cm)
 - o rocailleux ou pierreux ;
 - o secs et pauvres.
- La méthode des charges critiques au Québec (mais également retrouvée en Suède) est fondée sur la capacité des sols à résister à un apport acide supplémentaire (pouvoir tampon) (Ouimet & Duchesne, 2009) ;
- Le gradient d'aptitude des sols et des écosystèmes à supporter l'enlèvement des rémanents sur base d'une classification écologique des sites en Ontario et au Québec (Thiffaut *et al.*, 2009).

En Ontario, les recommandations du Ministère des Ressources Naturelles reposent sur le diagramme suivant (Figure 3) :

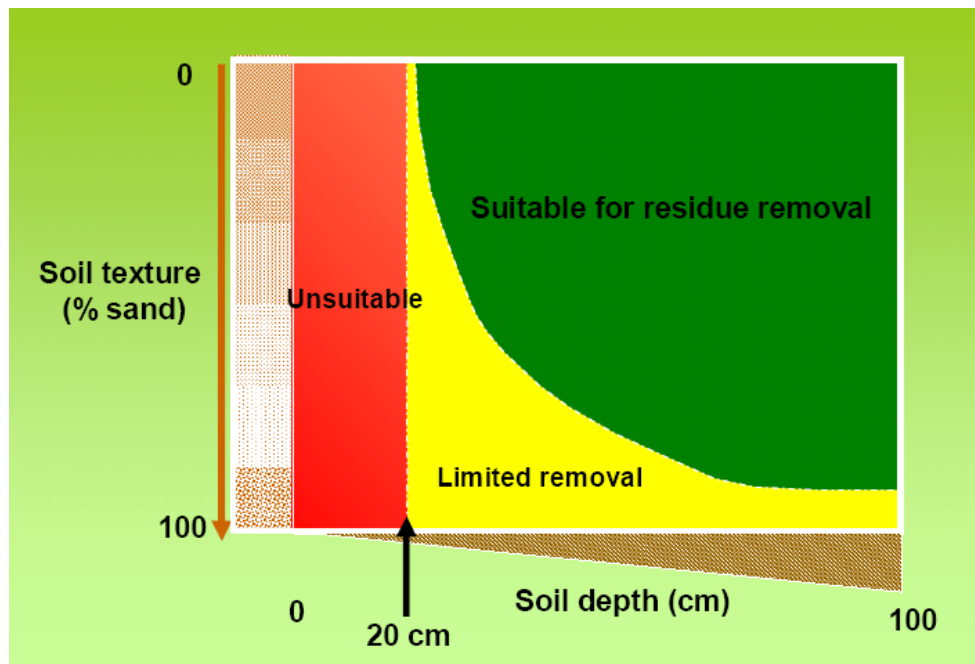


Figure 3. Diagramme d'aptitude des sols à supporter une exportation des résidus (source : Ontario Ministry of Natural Resources).

S'il est superficiel (< 20 cm de profondeur), le sol est impropre à la récolte des résidus, quelle que soit la texture dominante. Les exportations sont limitées sur sols de texture grossière et ce, d'autant plus que la profondeur est faible.

Une équipe de recherche de CERFO (Centre Collégial de Transfert de Technologie en Foresterie) a développé une approche combinée des deux méthodes de bilan présentées ci-dessus pour « aider les praticiens et les propriétaires forestiers à identifier la sensibilité d'un site à la récolte de biomasse résiduelle » en Estrie (Bouffroy *et al.*, 2009). Les auteurs insistent sur l'utilisation d'indicateurs cartographiables.

L'approche « fertilité », basée sur l'évaluation de la fertilité du site à partir de propriétés physiques et chimiques, s'utilise à l'échelle du peuplement forestier. Le diagnostic est posé à l'aide de paramètres simples, faciles à évaluer sur le terrain et disponible sur des cartes éco-forestières. Il s'agit de l'épaisseur du sol, de la texture, du drainage, de la présence de dépôts organiques épais et du pH de l'horizon de surface. Les auteurs attirent l'attention sur le fait que les sols à pH faible sont généralement classés comme sensibles en raison d'un des quatre autres critères.

L'approche « acidité » prend en considération les dépôts atmosphériques acides et se base sur la notion de charges critiques en acidité et plus particulièrement sur le modèle développé à partir de celle-ci. Elle précise, à l'échelle régionale, des zones où la récolte entraînerait un dépassement de la capacité des sols à résister aux dépôts d'acides (classe de sensibilité accrue).

La combinaison de ces deux approches donne trois catégories de sensibilité des sites à la récolte de biomasse : sites robustes, sites robustes avec sensibilité accrue (nuance venant de l'approche acidité), sites sensibles.

La démarche générale s'effectue en trois temps :

- évaluation de terrain, permettant de déterminer la classe de sensibilité via l'approche « fertilité » ;
- confrontation cartographique de la zone d'intérêt avec les secteurs présentant un dépassement de la capacité des sols à résister aux apports atmosphériques acides ;
- application des recommandations de récolte en fonction de la catégorie de sensibilité identifiée. Ces recommandations sont nettement moins étoffées que dans l'étude de l'ADEME.

L'équipe estime que la méthodologie développée est exportable partout ailleurs au Québec.

Une démarche similaire a été employée par Thiffault *et al.*, (2009) dans une autre région du Québec. Elle repose les bases suivantes (Tableau 12):

Tableau 12. Données sources de l'analyse de la sensibilité des sites pour le territoire de l'Abitibi.

Type de données	Informations contenues	Format de données en SIG
cartographique éco-forestière de l'inventaire forestier décennal	dépôts de surface, classe de pente, classe de drainage et phytosociologie	Polygones forestiers
base de données d'observation écologique	données moyennes de texture, obtenues par combinaisons de dépôts de surface/classe de drainage/sous-région écologique	Points
base de données de chimie des roches et des sédiments	Composition chimique de la roche-mère et des sédiments	Points ; interpolation pour des unités de 2km ²

Les classes de sensibilité sont déterminées sur base des caractéristiques des sites (pente, profondeur de développement de profil, présence de tourbe, texture, niveau trophique). Les seuils sont déterminés par jugement d'expert et sont donc entachés d'une certaine subjectivité, étant donné le manque de connaissance actuel de l'impact de l'exportation des rémanents à long-terme.

I.3. Conclusion

Il ressort de ces différents documents que :

- l'intérêt pour la protection des sols est bien présent ;
- l'évaluation des risques concernant la fertilité des sols ne fait pas l'objet d'un consensus et reste approximative à l'heure actuelle ;
- certains documents ont été réalisés dans une approche préventive, d'autres l'ont été dans un contexte où seule l'opportunité économique avait été envisagée préalablement et a débouché sur des impacts négatifs à gérer ;
- les publications relèvent souvent de la littérature grise, sont généralement rédigées dans la langue nationale et sont relativement récentes ;
- deux grandes méthodologies existent : l'une est basée sur les fonctionnalités qu'offre un Système d'Information Géographique (SIG), l'autre sur des critères pragmatiques d'une analyse de terrain. Le SIG peut être utilisé par un décideur pour fixer les portions du territoire pouvant être soumises à l'exportation des rémanents. L'analyse de terrain permet à chaque propriétaire (public ou privé) de déterminer la sensibilité de son terrain et de décider en fonction des différents enjeux auxquels il est confronté. Chacune possède ses limites d'utilisation (échelle spatiale de validité, précision, facilité d'emploi,...) qu'il est nécessaire de prendre en compte en fonction de la finalité attendue ;

I.4. Références bibliographiques relatives à l'Annexe I

ADEME, 2009. Compte rendu de la réunion Centre-Est : « Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour des usages énergétiques », CR-Ademe-Lyon-6mars2009, 4p.

Äijälä, O., Kuusinen, M. and Halonen, M., 2005. Metsäenergiapuun korjuu uudistusaloilta (Energy Wood Harvest From Clear Cuts, Guidelines. Quality project of energy wood harvest in clear cut). Forestry Development. Centre Tapio

Akselsson, C., Westling, O., Sverdrup, H., Holmqvist, J, Thelin, G., Ugglä, E. and Malm G., 2007. Impact of Harvest Intensity on Long-Term Base Cation Budgets in Swedish Forest Soils. Water Air Soil Pollution, Focus n°7: 201–210

Asikainen, A., Björheden, R. and Nousiainen, I., 2002. Cost of woody energy. In: Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. and Smith, C.T. (Eds.). 2002. Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 125-157

Berg, S., 2003. Harvesting technology and market forces affecting the production of forest fuels from Swedish forestry. Biomass and Bioenergy, 24: 381-388

Bohlin, F. and Roos, A., 2002. Wood fuel supply as a function of forest owner preferences and management styles. Biomass and Bioenergy, 22: 237-249

Boulfroy, E., Thiffaut, E., Lessard, L., 2009. Identification des secteurs propices à la récupération de la biomasse résiduelle dans la MRC du Haut-St-François. Rapport 2009-05. Centre de transfert de technologie en foresterie (CERFO), 52p.

Brierley, E., Truckell, I., Brewer, T., Towers, W., Malcolm, A. and Walker, W., 2004. Environmental impacts of the extraction of forestry residues. DTI, Project Report, B/W1/00788/00/00, 04/1080, 86p.

Cacot, E., Charnet, F., Grafijn, A., Pitocchi, S., Ranger, J., 2007. Etude de l'impact du prélèvement des rémanents en forêt. Volet 3. Fiche de synthèse, 4p.

Cacot, E. (coord); Eisner, N., Charnet, F., Leon, P., Rantien, C., Ranger, J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers: ADEME, 36p.

Centre For Biomass Technology. 2002. Wood for Energy production. The Danish Forest and Landscape Research Institute, Second Revised Edition, 25-29

EEA (European Environmental Agency), 2007. Environmentally compatible bio-energy potential from European forests, Copenhagen, 53p.

Evans, A. M. and Perschel, R.T., 2009. An assessment of harvesting biomass guidelines. Forestguild. Santa Fe, 20p.

Forestry Commission, 2004. The UK Forestry Standard; The Government's Approach to Sustainable Forestry. UK, Edinburgh, 75p.

Forestry Research, 2009a. Guidance on site selection for brash removal. 15p.

- Forestry Research, 2009b. Stump harvesting: Interim guidance on site selection and good practice, 18p.
- Government of New Brunswick, 2008. Forest Biomass Harvesting, 9p.
- Heiskala, P.J., Johansson, M., Homberg, M., Mattsson, T., Forsius, M., Kortelainen, P. and Hallin, L., 2003. Long-term base cation balances of forest mineral soils in Finland. *Water, Air, and Soil Pollution* 150: 255–273
- Herrick, S.K., Kovach, J.A., Padley E.A., Wagner, C.R. and Zastrow, D.E., 2009. Wisconsin's Forestland Woody Biomass Harvesting Guidelines. PUB-FR-435-2009. WI DNR Division of Forestry and Wisconsin Council on Forestry; Madison, WI. 51p.
- Kelty, M.J., D'Amato, A. W. and Barten, P.K., 2008. Silvicultural and ecological considerations of forest biomass harvesting in Massachusetts. Massachusetts Division of Energy Resources & Massachusetts Department of Conservation & Recreation, 65p.
- Minnesota Forest Resources Council. 2005. Biomass harvesting on forest management sites. In: *Sustaining Minnesota Forest Resources: Voluntary Site-Level Forest Management Guidelines for Landowners, Loggers and Resource Managers*, Minnesota, 42p.
- Moffat, A., Jones, B.M. and Mason, B., 2006. Managing Brash on Conifer Clearfell Sites. Forestry Commission. Practice Note, 12p.
- National Board of Forestry. 2002. Recommendations for the extraction of forest fuel and compensation fertilising. National Board of Forestry Publishing Company, Meddelande 3, 25p.
- Nicolas, M., Charnet, F., Ranger, J., Rantien C., Brethes A., Mengin-Lecreulx, P., Sardin T., 2007. Bois-énergie: maîtriser les impacts. ONF Rendez-vous techniques n°15: 36-45
- Nisbet, T., Dutch, J. and Moffat, A., 1997. Whole-tree harvesting: a guide to good practice. Forestry Practice Guide, 14p.
- Pasanen, K., Stupak, I., Röser, D., Asikainen A. and Raulund-Rasmussen, K. 2008. EnerTree-decision support tool to analyse forest biomass extraction scenarios. In: D. Röser *et al.* (eds.), *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, 235–255
- Pyatt D.G., 1982. Soil Classification. Forestry Commission Research Information, Note 68/82/SSN. Forestry Commission, Edinburgh.
- Ranta T., 2005. Logging residues from regeneration fellings for biofuel production—a GIS-based availability analysis in Finland. *Biomass and Bioenergy*, 28: 171-182
- Röser D., Pasanen K. and Asikainen A. 2006. Decision-suport program "EnerTree" for analyzing forest residue recovery options. *Biomass and Bioenergy*, 30: 326-333
- Stupak, I., Asikainen, A., Röser, D. and Pasanen, K., 2008. Review of recommendations for forest energy harvesting and wood ash recycling, In: D. Röser *et al.* (Eds.), *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, 155–196
- Sverdrup, H. and Rosén, K. 1998. Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concept of sustainability. *Forest Ecology and Management*, 110: 221-236

Thiffault, E. & Morissette, J., 2009. Analyse de la sensibilité des sites pour le territoire de l'Abitibi – Témiscamingue et de l'unité d'aménagement forestier de Tembec. Service canadien des forêts, Rapport technique, 97p.

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

Titus, B.D., Berch, S.M., Morris, S.M., Fleming, R.L., Hazlett, P.W., Paré, D. and Arp P.A., 2008. Synopsis of on-going Canadian research on biomass harvesting and site productivity. Workshop on The Scientific Foundation for Sustainable Forest Biomass Harvesting Guidelines and Policies, Toronto, Ontario, 18-21 Feb. 2008, 38p.

Vanguelova, E., Pitman, R. and Nisbet, T., 2010. Impacts of energy forestry on soil sustainability in the UK, Centre for Forestry and Climate Change Forest Research. www.forestresearch.go.uk

Annexe II. Intérêt du pH comme indicateur

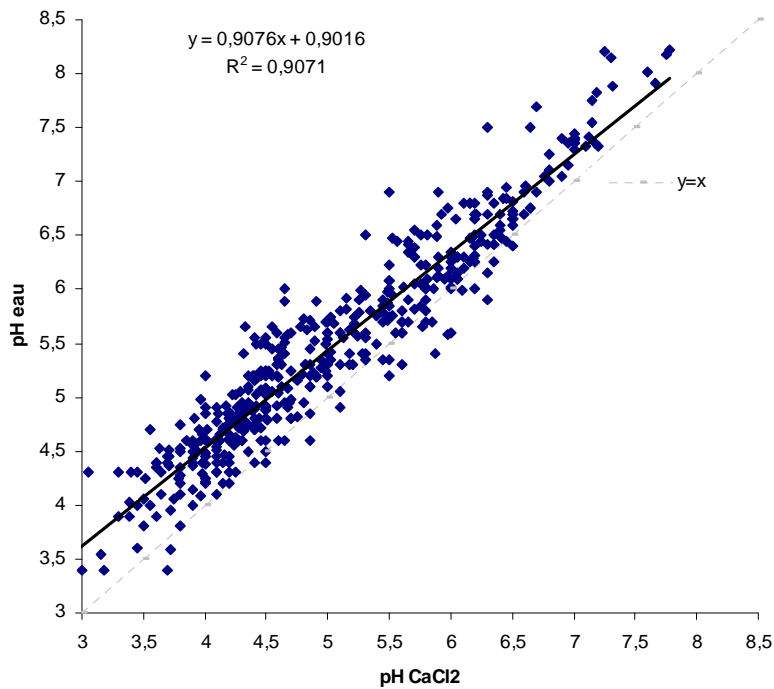


Figure 4. Relation entre les pHeau et pH_{CaCl2} sur base des mesures effectuées par l'ASTA dans des horizons de profondeur < 40-50 cm maximum (n=469 ; r=0,95).

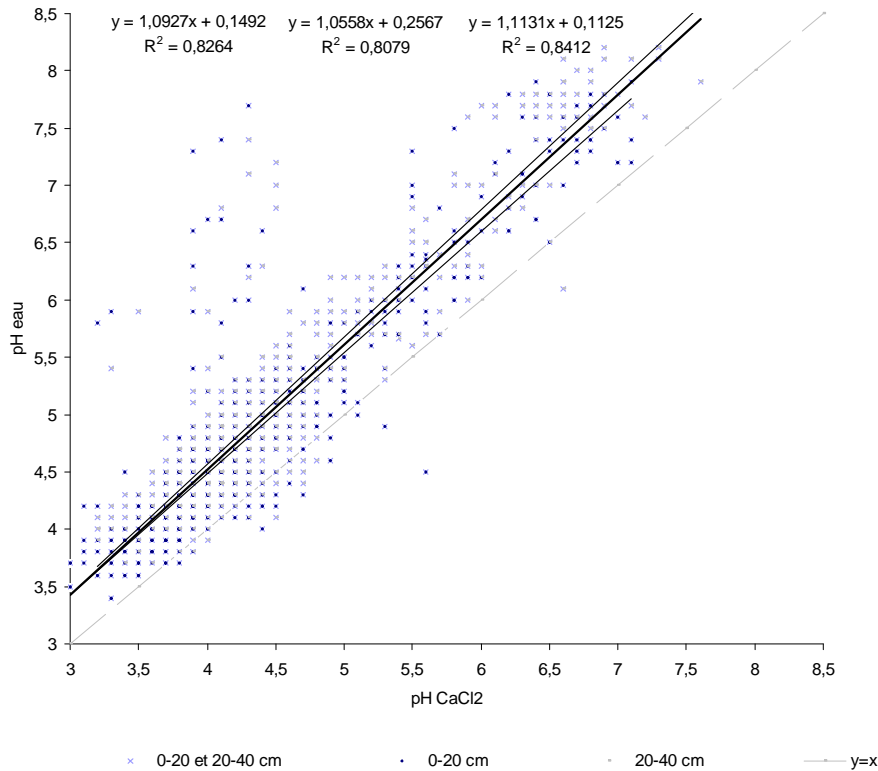


Figure 5. Relation entre les pHeau et pH_{CaCl2} sur base des mesures réalisées sur les unités d'échantillonnage de l'IFL. Les équations concernent, dans l'ordre : 0-40 cm (n=1646), 0-20 cm (n=860) et 20-40 cm (n=786)

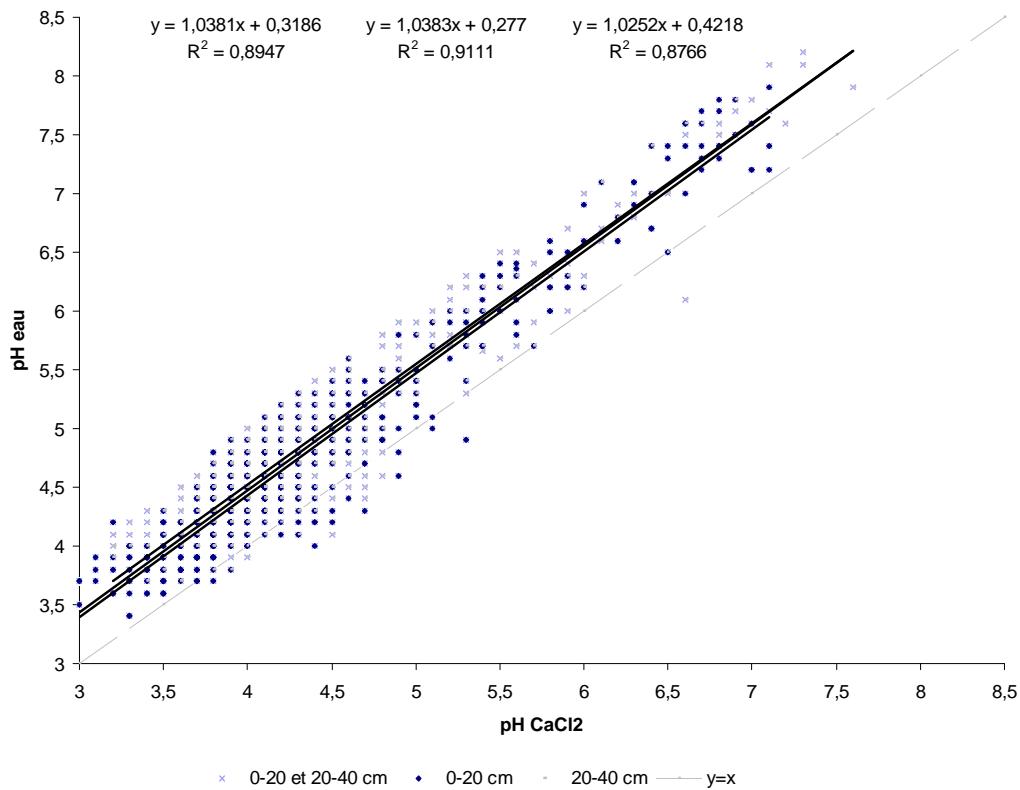


Figure 6. Relation entre les pH_{CaCl2} et pH_{eau} sur base des mesures réalisées sur les unités d'échantillonnage de l'IFL après suppression des points de $\Delta \text{pH} > 1$ ($n=107$). Les équations concernent, dans l'ordre : 0-20 et 20-40 cm ($n=1539$), 0-20 cm ($n=824$), 20-40 cm ($n=715$).

Sur base des différentes relations reprises dans le document, les valeurs seuils de pH pour la clé trophique sont les suivantes :

Tableau 13. Limite de pH pour la clé trophique en fonction des différentes sources consultées.

limites pH (Ahern et al, 1995) ($n=2228$; $F_{1,7893} = 107836$; $p < 0.0001$) $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0.923 * \text{pH}_{\text{eau}} - 0.373$		limites pH (Reuter et al., 2008) ($R^2 = 0.92$, $n=1997$) $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0.9761 * \text{pH}_{\text{eau}} - 0.427$		limites pH clé (base : données profils ASTA) ($R^2 = 0.91$, $n=469$) $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0.9994 * \text{pH}_{\text{eau}} - 0.4329$	
pH eau	pH CaCl2	pH eau	pH CaCl2	pH eau	pH CaCl2
3,8	3,1	3,8	3,3	3,8	3,4
4,2	3,5	4,2	3,7	4,2	3,8
5	4,2	5	4,5	5	4,6
7,5	6,5	7,5	6,9	7,5	7,1

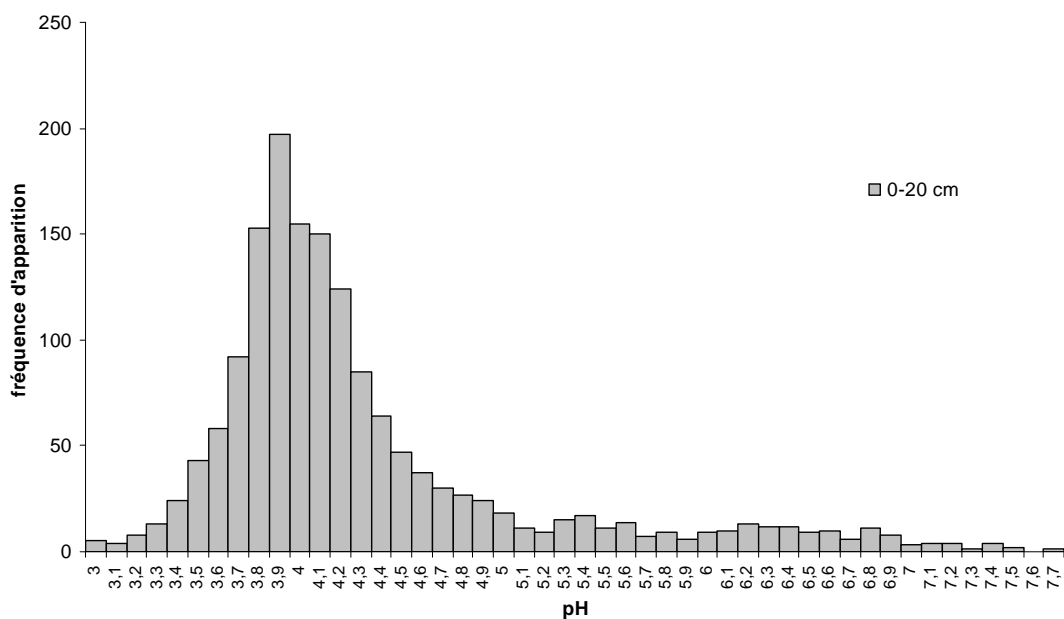


Figure 7. Fonction de distribution des pH_{CaCl2} pour la couche de sol 0-20 cm ; n= 1576 (échantillon IFL 0-20 cm avec mesure du pH_{CaCl2} après élimination des points aberrants).

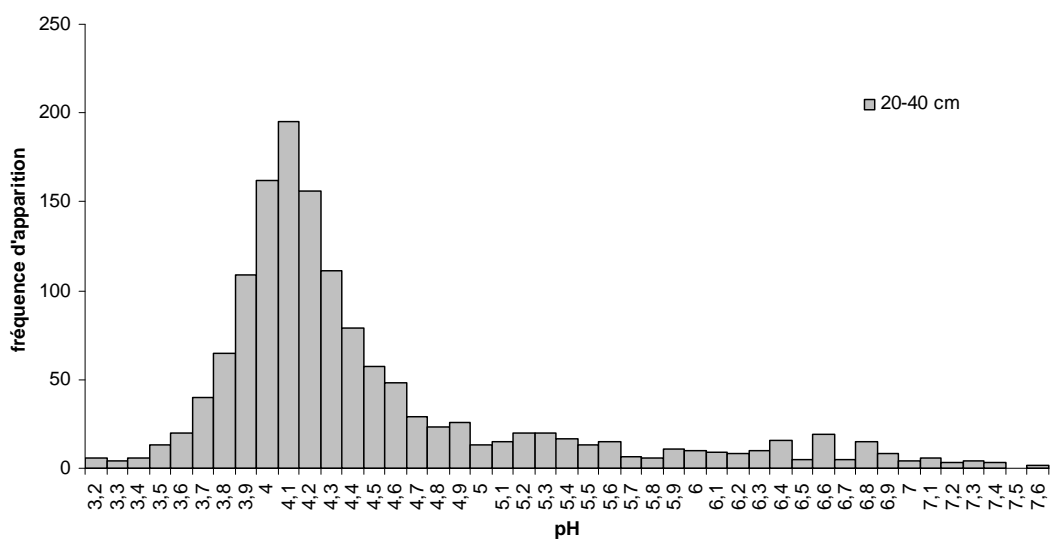
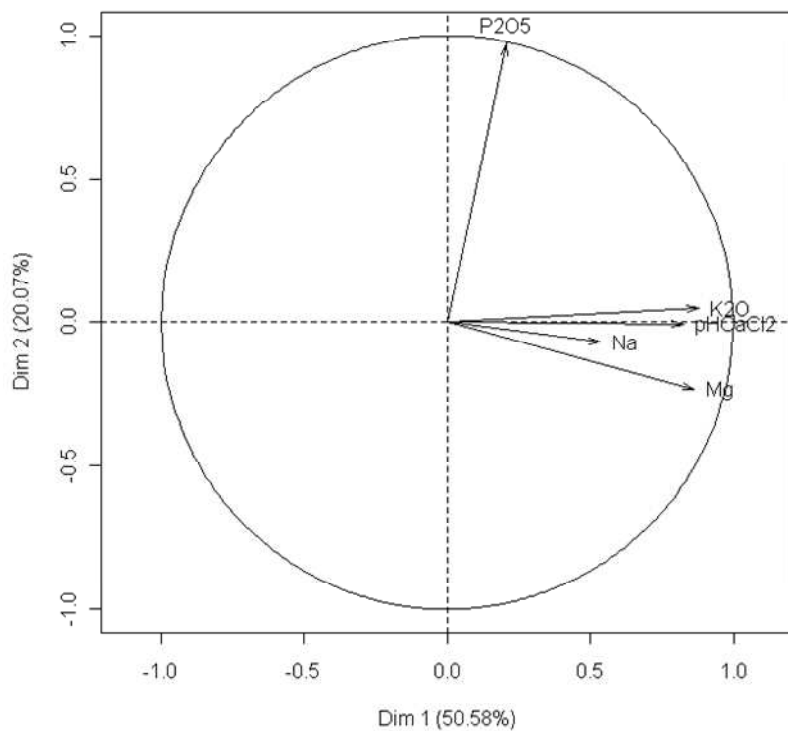


Figure 8. Fonction de distribution des pH_{CaCl2} pour la couche de sol 20-40 cm ; n= 1413 (échantillon IFL 20-40 cm avec mesure du pH_{CaCl2} après élimination des points aberrants).



Variables factor map (PCA)

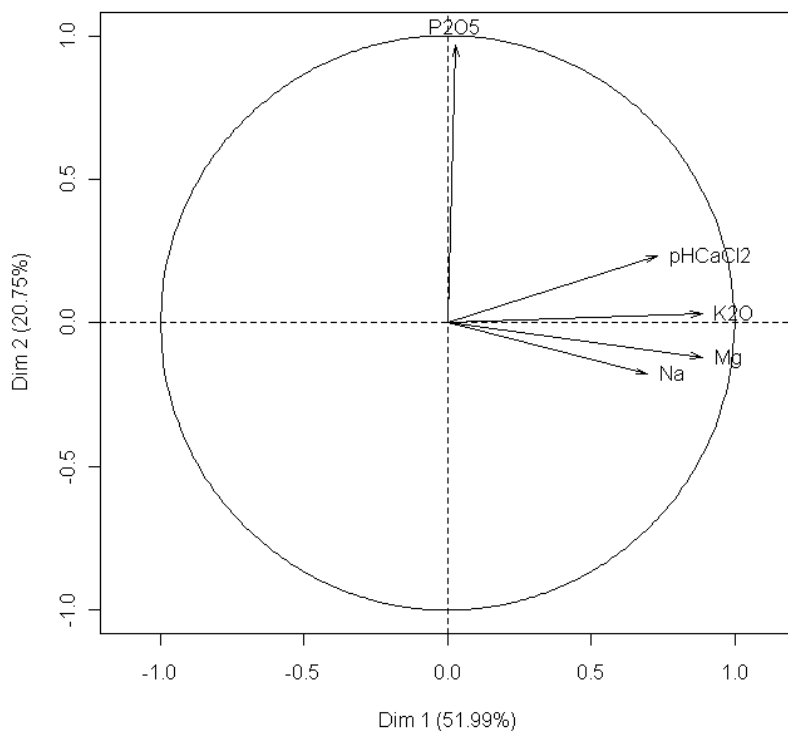


Figure 9. ACP réalisée à partir des paramètres physico-chimiques de l'échantillonnage IFL. En haut : profondeur 0-20 cm ; en bas : profondeur 20-40 cm (analyse voir document (2.3 diagnostic de fertilité)).

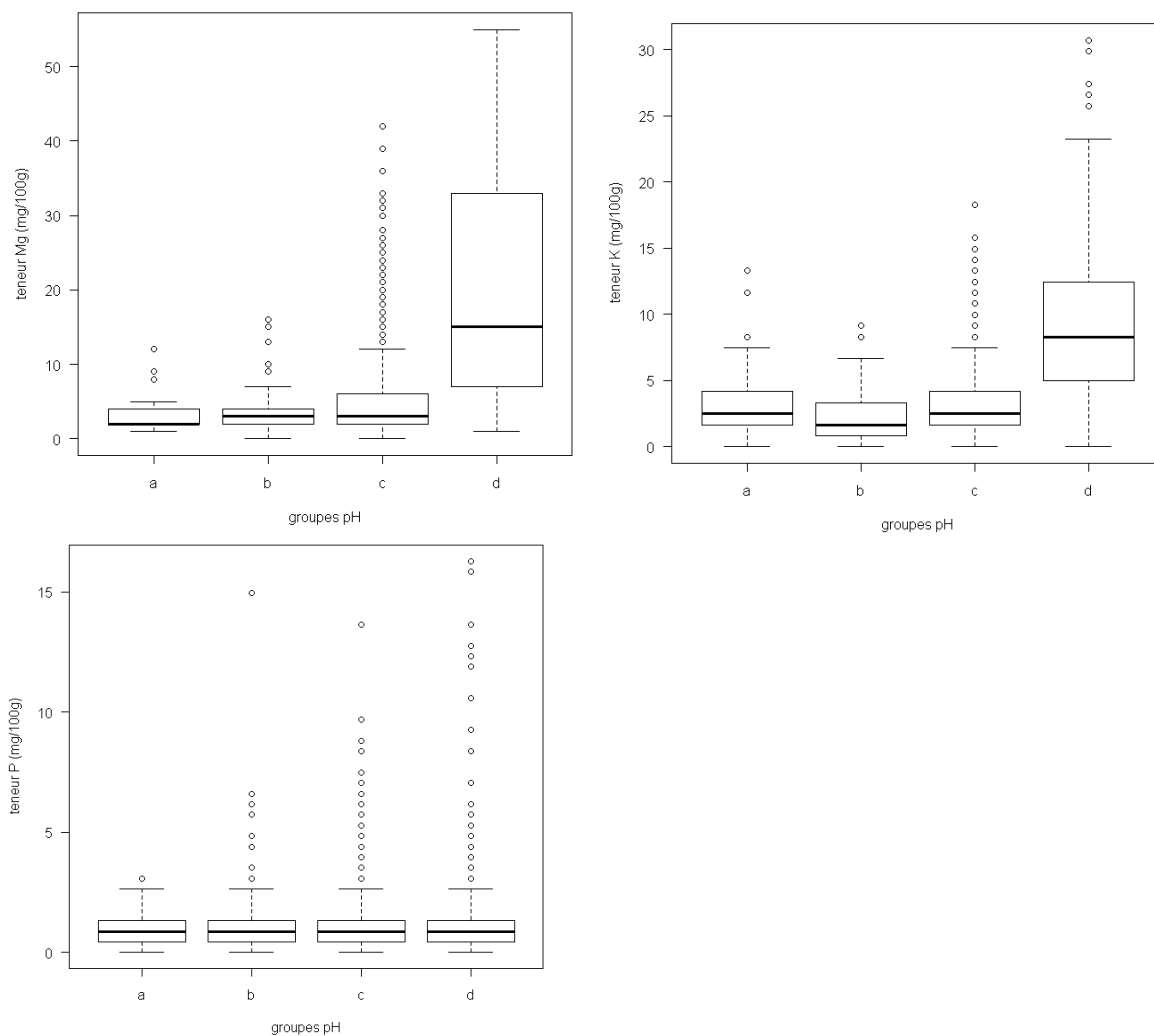


Figure 10. Boîtes de dispersion⁴ des teneurs en Mg, K et P pour les 4 groupes de pH (valeurs seuils de détermination des groupes précisées dans le texte ; les cercles présentent des valeurs atypiques).

⁴ Représentation schématique de la distribution statistique des teneurs en Mg, K, P en intégrant des paramètres de tendance centrale (médiane représentée par un trait horizontal au sein de la boîte) et de dispersion (1^{er} et 3^{ème} quartiles représentés par les traits inférieurs et supérieurs de la boîte et les « moustaches » inférieure et supérieures déterminées à partir de l'écart interquartile (Q₃-Q₁)

Annexe III. Intérêt de la texture comme indicateur

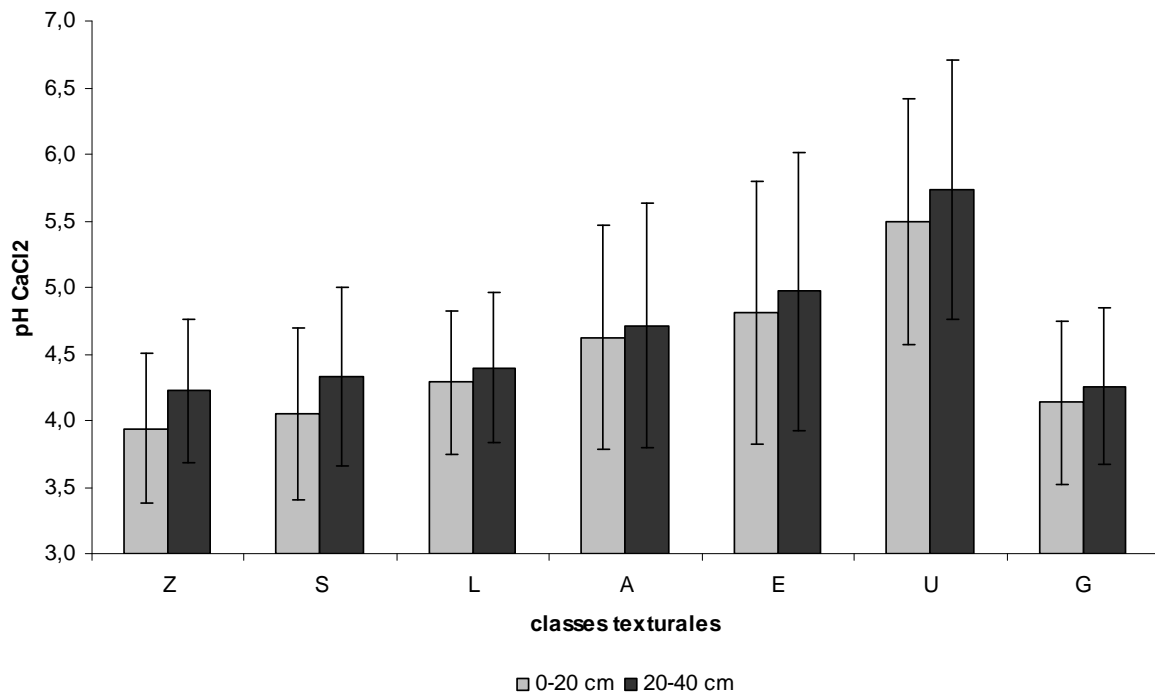


Figure 11. Moyennes et écart-types des valeurs de pH_{CaCl_2} par classes texturales et profondeur d'échantillonnage (échantillon IFL).

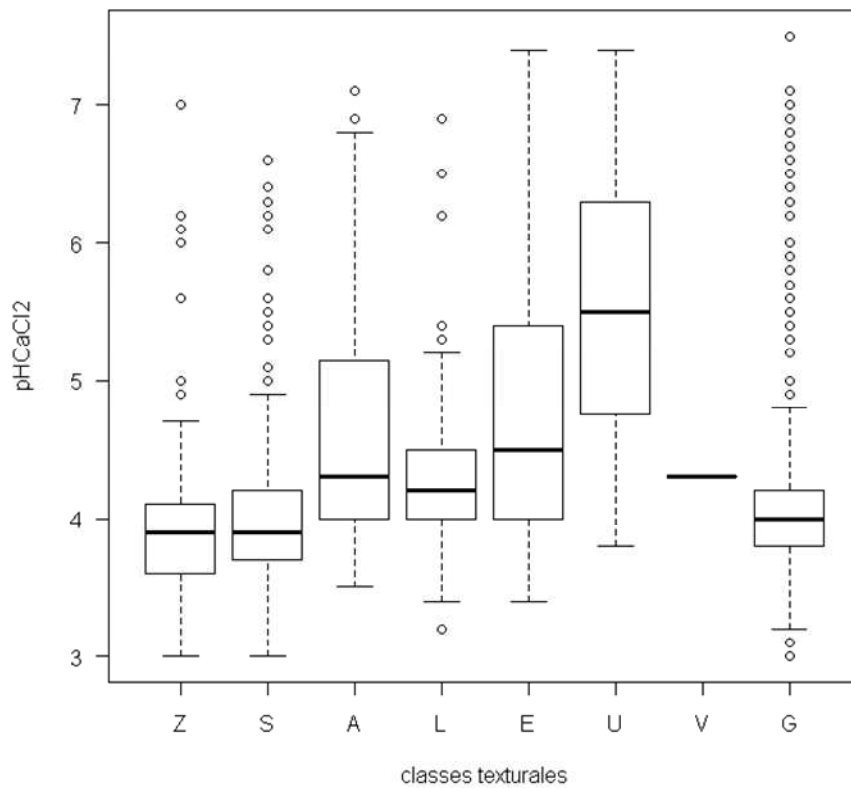


Figure 12. Boîtes de dispersion des valeurs de pH (échantillon IFL ; pH_{CaCl_2} entre 0-20 cm) par classe de texture ; les ronds présentent des valeurs atypiques.

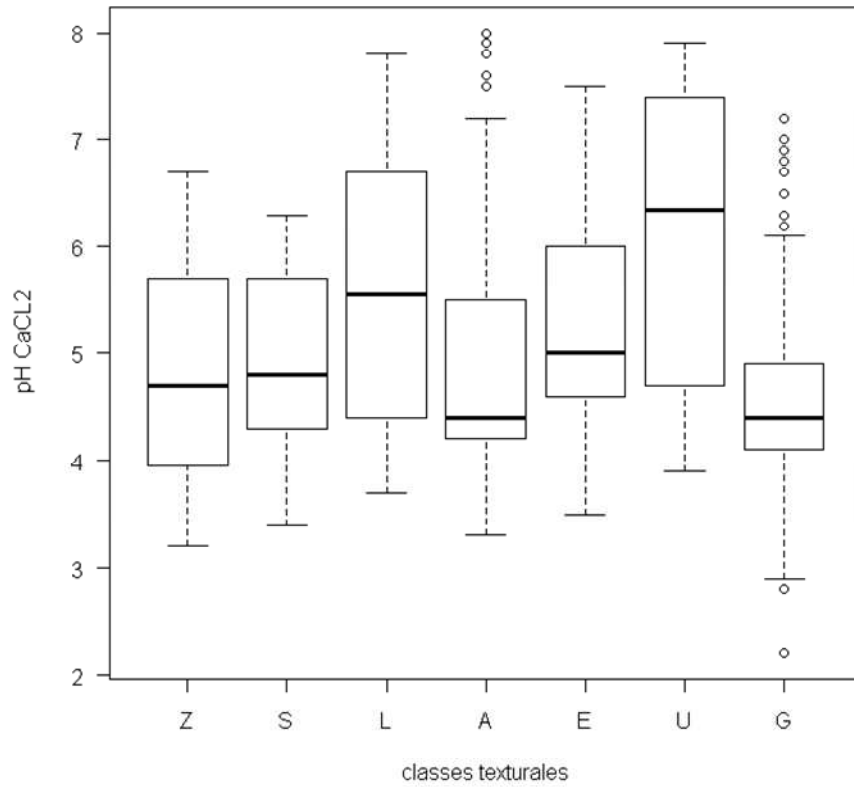


Figure 13. Boîtes de dispersion des valeurs de pH (horizons des profils ASTA de profondeur <40-50 cm) par classe de texture.

Annexe IV. Intérêt de la « roche-mère » comme indicateur

Tableau 14. Présentation des 14 ensembles géologiques de départ.

Ensemble	Formation(s) géologique(s)	Type de roche	Nombre d'unités d'échantillonnage ⁵
1	Sg2	Grès et schistes gréseux	10
2	Sg3	Schistes	233
3	Sg3a et Sg3s	Schistes gréseux et ardoisiers	14
4	E1a et E1b	Phyllades et quartzophyllades	253
5	E2	Schistes bigarrés et grès	33
6	q et E3	Quartzite et schistes	81
7	so	Grès	29
8	mu, mm et mo	Calcaire coquiller	50
9	ku, km et km2s	Dolomies et marnes	272
10	ko	Argiles rouges	20
11	li1	Marnes	36
12	Li2	Grès du Luxembourg	339
13	li3-4 et lm	Marnes et calcaires	124
14	lo1-5, dou, lo6, lo7 et do	Minerai de fer, (calcaire)	53

Tableau 15. Résultats des tests de comparaisons multiples (test HSD de Tukey-Kramer) pour les groupes de formations géologiques (échantillons IFL de profondeur 0-20 cm).

moyennes (0-20 cm)							niveaux (Tukey-Kramer) (0-20 cm)				
groupes ⁶ / paramètres ⁷	pH	P	K	Mg	Na	groupes/ paramètres	pH	P	K	Mg	Na
	/	mg* 100 g ⁻¹									
1	4,0	1,0	2,2	3,0	0,8	1	C	BC	D	D	C
2	4,0	1,7	3,3	4,7	1,2	2	C	A	C	C	B
3	4,6	0,7	6,2	8,0	1,2	3	B	C	B	B	AB
4	5,1	1,4	8,4	20,3	1,3	4	A	AB	A	A	A

Les groupes présentant une même lettre n'ont pas de différence significative selon le test de Tukey Kramer HSD au seuil p = 0,05

Tableau 16. Résultats des tests de comparaisons multiples (test HSD de Tukey-Kramer) pour les groupes de formations géologiques (échantillons IFL de profondeur 20-40 cm).

moyennes (20-40 cm)						niveaux (Tukey-Kramer) (20-40 cm)					
groupes/ paramètres ⁸	pH	P	K	Mg	Na	groupes/ paramètres	pH	P	K	Mg	Na
	/	mg* 100 g ⁻¹									
1	4,1	2,0	1,9	2,0	1,0	1	C	A	C	C	C
2	4,2	2,1	2,3	3,2	1,1	2	C	A	C	C	C
3	4,6	1,3	5,8	7,9	1,4	3	B	B	B	B	B
4	5,2	2,0	8,7	22,9	1,5	4	A	A	A	A	A

Les groupes présentant une même lettre n'ont pas de différence significative selon le test de Tukey Kramer HSD au seuil p = 0,05

⁵ Nombre total pour cette analyse : 1577 (échantillon IFL avec données stationnelles, analyses chimiques entre 0-20 cm après éliminations des points aberrants)

⁶ Référence des groupes voir Tableau 3 du document principal

⁷ Méthodes physico-chimiques voir Tableau 1 du document principal

⁸ Idem Tableau 15

Tableau 17. Résultats des tests de comparaisons multiples (test HSD de Tukey-Kramer) pour les groupes de substrats (échantillons IFL de profondeur 0-20 cm).

moyennes (0-20 cm)							niveaux (Tukey-Kramer) (0-20 cm)					
groupes/ paramètres ¹⁰	#	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Na	groupes/ paramètres	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Na
	/	mg* 100 g ⁻¹										
a	36	5,7	1,7	6,7	12,6	1,2	a	A	A	AB	B	AB
b	446	4,8	0,9	7,7	16,5	1,4	b	B	B	A	A	A
c	845	4,0	1,3	2,7	3,8	1,0	c	C	A	C	C	B
d	13	3,8	1,1	4,2	4,7	1,4	d	C	AB	BC	C	A
(e)	21											

Les groupes présentant une même lettre n'ont pas de différence significative selon le test de Tukey Kramer HSD au seuil p = 0,05

Tableau 18. Résultats des tests de comparaison multiple (test HSD de Tukey-Kramer) pour les groupes de substrats (échantillons IFL de profondeur 20-40 cm).

moyennes (20-40 cm)							niveaux (Tukey-Kramer) (20-40 cm)					
groupes/ paramètres ¹¹	#	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Na	groupes/ paramètres	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Na
	/	mg* 100 g ⁻¹										
a	36	5,9	1,3	4,9	11,4	1,3	a	A	A	B	B	B
b	446	4,9	0,7	6,7	18,7	1,5	b	B	B	A	A	A
c	845	4,2	0,9	1,9	3,0	1,1	c	C	AB	C	C	B
d	13	4,1	0,6	2,3	2,8	1,0	d	C	AB	C	C	B
(e)	21											

Les groupes présentant une même lettre n'ont pas de différence significative selon le test de Tukey Kramer HSD au seuil p = 0,05

⁹ Référence des groupes voir Tableau 4 du document principal

¹⁰ Méthodes physico-chimiques voir Tableau 1 du document principal

¹¹ Idem Tableau 17

Tableau 19. Résumé des valeurs des différents paramètres physico-chimiques de base disponibles via l'inventaire forestier permanent wallon pour les différents substrats rencontrés au Grand-Duché de Luxembourg (profondeur : 0-20 cm ; nombre d'unités d'échantillonnage par type de substrat indiqué en gras dans le tableau)

Région Wallonne

Sables et grès mésozoïques									
	31								
min	4,1	3,1	1,4	0,6	1,0	0,3	1,8	0,1	12
max	6,5	5,9	9,8	31,0	256,0	13,4	4,5	0,3	36
moyenne	4,6	3,9	3,9	3,1	33,6	3,5	2,8	0,1	20
écart-type	0,6	0,6	2,1	5,8	65,1	2,9	0,7	0,0	6
Q1	4,3	3,6	2,7	0,8	5,1	1,6	2,3	0,1	16
médiane	4,4	3,7	3,2	1,2	7,4	2,8	2,6	0,1	19
Q3	4,7	3,9	4,4	2,0	15,5	4,4	3,1	0,2	23
Marnes cénozoïques et mésozoïques									
	5								
min	4,5	3,6	4,1	0,8	2,3	0,2	2,5	0,1	15
max	5,7	4,7	11,7	23,0	126,0	6,9	3,8	0,2	26
moyenne	5,0	4,0	7,1	8,3	44,9	3,6	3,1	0,2	19
écart-type	0,5	0,5	3,1	9,1	50,3	3,0	0,5	0,0	4
Q1	4,6	3,7	4,4	1,0	3,2	1,5	3,0	0,1	17
médiane	4,9	3,8	7,4	7,1	45,8	2,9	3,1	0,2	17
Q3	5,4	4,3	8,1	9,4	47,0	6,6	3,3	0,2	21
Calcaires jurassiques									
	4								
min	5,1	3,8	7,8	7,4	71,0	0,1	2,2	0,2	12
max	7,5	6,7	15,0	12,0	290,5	3,1	4,7	0,3	15
moyenne	6,2	5,3	10,1	10,6	191,8	1,6	3,7	0,3	14
écart-type	1,0	1,2	3,3	2,1	91,7	1,5	1,1	0,1	2
Q1	5,7	4,5	8,3	10,3	156,1	0,5	3,5	0,3	14
médiane	6,1	5,3	8,8	11,5	202,9	1,6	4,0	0,3	15
Q3	6,6	6,0	10,6	11,7	238,5	2,7	4,2	0,3	15
	pH eau	pH KCl	K	Mg	Ca	Mn	C	N	C/N
				mg/100g			g/100 g		

grès	34									
min	3,7	2,9	2,7	0,9	1,7	0,1	2,7	0,1	13	
max	4,9	3,9	13,7	14,0	63,0	21,8	20,4	0,8	31	
moyenne	4,2	3,5	5,3	2,8	9,7	4,3	6,0	0,3	21	
écart-type	0,3	0,2	2,4	2,4	12,5	4,4	3,2	0,1	5	
Q1	4,1	3,3	3,9	1,4	3,3	1,2	4,4	0,2	18	
médiane	4,2	3,5	4,8	2,0	4,3	2,8	5,2	0,3	21	
Q3	4,3	3,7	5,8	3,3	12,0	6,2	6,4	0,3	25	

grès-schistes	29								
min	3,6	3,0	2,6	0,8	1,5	0,1	3,2	0,2	15
max	4,8	3,9	7,6	6,6	43,0	19,1	9,6	0,4	28
moyenne	4,1	3,5	4,7	1,9	5,8	3,5	5,9	0,3	20
écart-type	0,2	0,2	1,3	1,2	8,1	3,5	1,8	0,1	3
Q1	4,0	3,4	4,0	1,2	2,3	1,4	4,4	0,3	17
médiane	4,2	3,6	4,6	1,6	3,2	2,9	5,9	0,3	20
Q3	4,3	3,7	5,5	2,3	5,9	4,3	7,1	0,3	22

schistes	69								
min	3,9	3,0	1,7	0,8	0,9	0,4	2,9	0,2	11
max	5,0	4,1	12,0	4,6	37,4	8,5	10,5	0,6	28
moyenne	4,3	3,6	4,7	2,0	7,0	3,1	6,1	0,3	18
écart-type	0,2	0,2	1,7	0,8	7,5	2,0	1,4	0,1	4
Q1	4,1	3,5	3,7	1,5	2,6	1,4	5,1	0,3	15
médiane	4,2	3,7	4,4	1,8	3,6	2,7	6,2	0,3	18
Q3	4,4	3,8	5,3	2,3	8,0	4,4	6,9	0,4	21

schistes-grès	62								
min	3,9	3,1	2,5	0,9	1,2	0,5	3,0	0,2	13
max	4,9	4,0	7,3	5,7	73,0	19,0	9,3	0,7	28
moyenne	4,2	3,6	4,6	1,8	6,6	3,9	6,0	0,3	19
écart-type	0,2	0,2	1,1	0,9	10,8	3,7	1,5	0,1	4
Q1	4,1	3,5	3,8	1,3	2,6	1,4	4,7	0,3	17
médiane	4,2	3,6	4,5	1,7	3,6	2,6	6,3	0,3	19
Q3	4,3	3,7	5,4	2,0	4,7	4,5	7,0	0,4	21

	pH eau	pH KCl	K	Mg	Ca	Mn	C	N	C/N
				mg/100g			g/100 g		

Tableau 20. Résumé des valeurs des différents paramètres physico-chimiques de base disponibles via les analyses de profils réalisées dans le cadre de la typologie stationnelle du Gutland (profondeur : <22 cm ; nombre d'unités d'échantillonnage par type de substrat indiqué en gras dans le tableau).

EFOR-ERSA

Substrat gréseux	28								
min	3,9	3,0	0,7	0,2	1,4	0,0	0,3	0,1	1
max	5,8	4,6	6,6	8,2	56,0	19,8	26,0	0,1	26
moyenne	4,6	3,7	1,7	1,3	12,0	3,1	6,1	0,1	11
écart	0,4	0,4	1,4	1,8	14,5	5,0	7,9	0,0	7
Q1	4,3	3,4	0,9	0,5	4,2	0,3	0,8	0,1	3
médiane	4,7	3,6	1,1	0,8	6,1	0,7	1,4	0,1	12
Q3	4,8	4,1	2,1	1,0	10,6	2,7	9,3	0,1	15

Substrat marneux	67								
min	3,8	3,2	2,1	0,4	2,1	0,1	0,6	0,1	2
max	7,9	7,1	16,1	204,5	590,0	21,6	47,0	0,3	20
moyenne	5,0	4,3	6,9	19,2	71,8	2,5	15,0	0,2	12
écart	0,9	1,0	3,6	34,4	93,4	3,4	13,7	0,1	5
Q1	4,5	3,7	4,0	2,5	9,5	0,2	2,8	0,1	9
médiane	4,8	3,9	6,4	6,5	38,4	1,9	7,0	0,2	14
Q3	5,2	4,5	8,7	13,7	92,8	3,4	23,6	0,2	15

tt substrat fond de vallée	9								
min	4,4	3,6	0,9	0,5	2,2	0,1	0,5	0,1	1
max	7,9	7,3	6,9	31,0	122,8	9,5	9,0	0,7	20
moyenne	5,5	4,7	2,8	5,2	47,4	1,8	2,7	0,2	11
écart	1,2	1,3	1,8	9,8	46,5	3,0	3,0	0,2	8
Q1	4,6	3,9	1,7	0,8	8,4	0,3	1,2	0,1	5
médiane	5,2	4,1	2,2	0,9	43,9	0,7	1,5	0,1	13
Q3	5,9	5,1	3,2	4,6	74,3	1,7	2,9	0,3	15
	pHeau	pHKCl	K	Mg	Ca	Mn	Corg	%N	C/N
			mg/100g				g/kg		

Annexe V. Estimation des concentrations en éléments dans différents compartiments de l'arbre

Tableau 21. Synthèse des documents reprenant une information concernant la minéralomasse en Europe (addendum du Tableau 8 du document).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
André & Ponette, 2003	Belgique	Fagnes-Famenne	250 m	800-1300 mm de pluie avec 320-470 mm entre mai et septembre	8.5°C en moyenne annuelle	Schistes argileux (shales) du Dévonien	sol brun acide (Dystrochrept USDA)		non mais pouvant être obtenue	Limitée glyfication modérée entre 40-60 cm	Oui pH _{eau} 0-40 cm ≤4,5; BS≤14% ECEC
André <i>et al.</i> , 2010	Belgique	Fagnes-Famenne	~300 m	1044 mm	8°C en moyenne annuelle	Dévonien, schistes et grès+loess périglaciaire	sol brun acide (Dystric Cambisol FAO/ Dystrochrept USDA)	(eu) moder			non mais pouvant être obtenue; pH 4.3 à 20 cm et 4.5 vers 80 cm BS≤15-20%
Ranger & Bonneau, 1986	France	France									

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement									Minéralomasse					méthodes analytiques
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.	types compart.	
André & Ponette, 2003	1	Chêne 76/ha Charme 978/ha	Taillis-sous-futaie (chêne en futaie équienne)		Chêne 48-208 (moy=163,5) Charme 10-77 (moy=30,2)	chêne 15,6-23,5 charme 4,5-22,9	Chêne 16,8 Charme 8,0	Chêne 183 Charme 32	chêne (+charme)	chênes 21 charmes 8	oui (mg/kg)	oui	10	branches vivantes de Φ: <1 cm 1-4 cm 4-7 cm 7-14 cm 14-21 cm > 21 cm branches mortes écorce duramen/ aubier	N: Kjeldhal P, K, Mg, Na calcination puis solubilisation dans HCl, mesure ICP
André <i>et al.</i> , 2010	1		Chêne: futaie équienne (prov. Taillis) Hêtre: futaie inéquienne	chêne: 62-129 ans hêtre: 43-86 ans	Chêne 111,5 Hêtre 98		23,7 (total)		chêne, hêtre	16 chênes et 12 hêtres	oui (mg/kg)	oui	10	branches vivantes de Φ: <1 cm 1-4 cm 4-7 cm 7-14 cm 14-21 cm > 21 cm branches mortes écorce duramen/ aubier	N: combustion sèche (CN analyser) P, K, Mg, Na, digestion dans HNO ₃ , mesure ICP
Ranger & Bonneau, 1986									épicéa, hêtre, (chêne)		oui (%MS) ou kg/ha	non	variable suivant exemple		

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006	Espagne	NO	450-510 m		11°C	Granite (2 peupl.) et schistes (2 peupl)			fraction grossière	oui (faible capacité de rétention)	texture, CEC (16-46 cmolc/kg, pH (3,6-4,1), BS (37-85%)
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	Suède, Danemark, Lituanie	entre 54 et 56°N					Arénosol, Cambisol, Planosol, Alisol, Luvisol		oui		oui
Rademacher <i>et al.</i> , 2001	Allemagne	NO					Podzol et Dystric Cambisol				
Ranger <i>et al.</i> 1995	France	Beaujolais	650 m	1000 mm +/- bien distribués	7°C	roches volc. Devono-Dinantien	Typic dystrochrept		texture fine		pH 4,1-4,4 CEC:4-8 cmolc/kg BS:4,7-8,2

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs (mg/g) et (kg/ha)	Equ.	# compart.		types compart.
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006	4	427 à 665	à taillis	80-140	au moins 4 classes de diamètres		27,81 à 55,92		chêne	31	oui (mg/g) et (kg/ha)		8	tronc, écorce, branches (d>7cm), grosses branches, fines branches, rameaux, feuilles, racines	N par combustion, autres par digestion dans HNO ₃ , mesure ICP
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	6		Forêt mélangée	37 à 45 ans					chêne, épicéa, hêtre (+ bouleau, charme, tilleul)	4	oui (mg/g)	non	2	feuillage, tronc (y compris écorce)	N: Kjeldhal P, K, Mg, Na calcination puis solubilisation dans HNO ₃ , mesure ICP
Rademacher <i>et al.</i> , 2001	2			115 ans					chêne, pin	6 chênes, 35 pins	oui (kg/ha)	non	8	feuilles, tronc, écorce, branches <7cm, écorce et bois branches >7cm, racines (2 classes)	
Ranger <i>et al.</i> 1995	3	922-490-312		20-40-60	57,0± 15,3 104,7± 27,1 163,7± 39,1				douglas	12 par peuplement	oui (% MS)	oui	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	N: Kjeldhal puis colorimétrie P, K, Mg, Na digestion acide, mesure ICP

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Ranger <i>et al.</i> 1996	France	Beaujolais	750 m	1000 mm avec petit max en été	7°C	tuf volcanique Devono-Dinantien	brun acide		texture fine		pH 4,1-4,4 CEC:4-8 cmolc/kg BS: 5-9
Ranger <i>et al.</i> 1997	France	Beaujolais	750 m	1000 mm	7°C	roches volc. Devono-Dinantien	Alocrisol	mull/moder			pH 4,2-4,4 CEC:3,5-7 cmolc/kg
Marques <i>et al.</i> 1997	France	Beaujolais	750 m	1000 mm avec petit max en été	7°C		Typic Dystrochrept		oui		oui
Ponette et Ranger 2000	France	Creuse, Hérault, Orne, Rhône, Saône et Loire	375-520-610-650-700	de 695 mm à 1025 mm	10,3-10,4-10,9-10,9-13,5	colluvion granitique, arène granitique, altération gneiss, altération grès, altération schiste	Brunisol-Podzols-Alocrisols				oui
Augusto <i>et al.</i> , 2000											

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement									Minéralomasse					méthodes analytiques
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs (kg/ha)	Equ.	# compart.	types compart.	
Ranger <i>et al.</i> 1996	3	922-490-312		20-40-60	57,0± 15,3 104,7± 27,1 163,7± 39,1				douglas	12 par peuplement	oui (kg/ha)	non	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	N: Kjeldhal puis colorimétrie P, K, Mg, Na digestion acide, mesure ICP
Ranger <i>et al.</i> 1997		922-490-312		20-40-60	57,0± 15,3 104,7± 27,1 163,7± 39,1	14-28-36 (moyenne avant éclaircie)	24,2-47,4-64,8		douglas	12 par peuplement	oui (% MS)	oui	6	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes rameaux, vieilles branches, écorce du tronc; bois du tronc	
Marques <i>et al.</i> 1997	3	922-350-225		20-40-60	56,9-104,6-163,7 (moyenne)			250,670,1100	douglas	12 par peuplement	oui (kg/ha)	non	3	branches, tronc, aiguilles	
Ponette et Ranger 2000	5	de 243 à 640		26-29, 36 et 54 ans	de 9,1 à 69,2		de 31,5 à 49,0		douglas	14 par peuplement	oui (g/kg)	oui	4	bois de tronc, écorce, bois des branches, aiguilles	N: Kjeldhal P, K, Mg, Na calcination puis solubilisation, mesure ICP
Augusto <i>et al.</i> , 2000									douglas, épicéa, hêtre (+ pin)	de 6 à 20 suivant essences	moyennes (kg/t)	oui	1	tronc (écorce incluse)	

Tableau 21. (Suite).

noms	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	info écoclim.		Géol	Type sol	humus	info texture	info drainage	info anal.
				précip. (mm)	temp. (°C)						
Ponette et al, 2001	France	Creuse, Hérault, Orne, Rhône, Saône et Loire	375 à 700 m	de 695 mm à 1025 mm	10,3-10,4-10,9-10,9-13,5	colluvion granitique, arène granitique, altération gneiss, altération grès, altération schiste	WRB: Cambisol-Podzols-Luvisol-Leptosol		oui		pH 3.9-4,7, ECEC:5,1-11,1; BS: 10-50%
Ranger et Gelhaye, 2001	France	Beaujolais	750	1000 mm	7°C	tuff volcanique du Viséen	Typic Dystrochrept		oui		oui
Ranger <i>et al.</i> , 2002	France	Beaujolais	750		oui						
Sicard <i>et al.</i> , 2006	France	Vosges	650	1280 mm avec pic de pluie d'avril à juillet	9°C (moyenne) (5.4°C-12,5°C)	granite de la Pierre qui Vire couverte de loess (composition granite donnée)	Alcrosols podzolisants	mull à moder	sablo-argileux		pH: 4-4.5 BS: 5-15%
Alriksson et Eriksson, 1998	Suède	NE		662 mm	2,9°C		Cambisol				pH: ~5 BS: >50%

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.		types compart.
Ponette et al, 2001	5	de 243 à 640	futaies équiennes	26-29, 36 et 54 ans	de 9,1 à 69,2		de 31,5 à 49,0		douglas	14 par peuplement	oui (g/kg)	oui	4	bois du tronc, écorce, bois des branches, aiguilles	
Ranger et Gelhaye, 2001	1	350		47 ans			46		douglas	12	oui (kg/ha)	oui	8	aiguilles, branches, écorce, bois, souche, racines (3 classes)	
Ranger et al., 2002		850-275-206			74-136-166 (moyenne)	22-35-40 (moyenne)			douglas		oui (kg/ha)	non	5	feuilles, branche, tronc, écorce, racines	N: Kjeldhal puis spectro moléculaire P, K, Mg, Na digestion H ₂ O ₂ -HClO ₄ , mesure ICP
Sicard et al., 2006	2 (fertilisé et non fertilisé) par peuplement	épicéa 1306 douglas 1527 (pour les parcelles non fert.)		plantation en 1976, arbres de 4 ans	Epicéa non fertilisé 57 douglas non fertilisé 69,3	épicéa 14,7 douglas 18,2 (moy.)			douglas, épicéa	10 par lot	oui (t/ha)	oui	4	aiguilles, branches, tronc, écorce	
Alriksson et Eriksson, 1998				26			32		épicéa (+ pins, bouleau, mélèze)	2	g/kg	non	4	feuillage, branches, tronc, racines	N: combustion P, K, Mg, Na, digestion dans HNO ₃ -HClO ₄ , mesure ICP

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Eriksson et Rosen, 1994	Suède	SO	75-85	1040 mm	6,4°C	sédiment glaciaire	Dystric regosol/Typic Dystrochrept	mor			oui
Ingerslev et Hallbäckn, 1999	Danemark					sable fluvio-glaciaire	Haplic Podzol	mor	sableux	bien drainé	pH:4,04
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	France	Vosges	1060	1770 mm	6°C	granite	sol brun ocreux (Distrochrept)				
Nihlgard, 1972	Suède	Kongalund		800 mm	6-7°C	schistes cambrien et grès	sol brun acide				oui via autre article

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs (kg/ha)	Equ.	# compart.		types compart.
Eriksson et Rosen, 1994	1			35-36 ans					épicéa (+ pins, mélèze)	2	oui (kg/ha)	non	2	feuillage, tronc (y compris écorce)	N, P: FIA cations: AAS
Ingerslev et Hallbäckn, 1999	1 mais 5 lots	~800	futaie équienne	59 ans		16 m en moyenne			épicéa	5 par lot	oui (kg/ha)	oui	7	tronc, écorce branches (vivantes & mortes) aiguilles (jeunes et vieilles) cônes	
Le Goaster et al., 1991	2	4444 à la plantation, 2222 actuellement		30 ans (en 1988)		12,6 m en moyenne			épicéa	5 par type (sain, malade)	oui (% MS)	non	3	tronc branches aiguilles	
Nihlgard, 1972	2	hêtre 240 épicéa 880		hêtre: 90 ans épicéa: 55 ans	hêtre 12-64 (Φ moy : 39 cm) épicéa 15-38 (Φ moy 28 cm)	25 m en moyenne pour chaque essence	hêtre 31,4 épicéa 55,6		hêtre	8 de chaque	oui (kg/ha)	non	7	tronc écorce branches rameaux + 3 classes de racines	N: Kjeldahl P, K, Mg, Na, digestion dans HNO ₃ -HClO ₄ , mesure AAS

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Oren <i>et al.</i> , 1988	Allemagne	Bavière			oui	phyllites	Podzol et Cambisol podzologique				
Ranger <i>et al.</i> , 1992	France	Vosges	650 m	1200 mm	8,5°C	granito-gneiss	brun acide		oui		pH 3,5-4,1 en surface, CEC: <15 cmolc/kg BS <15%
Reynolds <i>et al.</i> , 2000	UK	Pays-de-Galle	285-523			schistes et sables du primaire	podzol tourbeux			Oui	non
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i>	Europe		oui		oui		oui		oui	Oui	oui
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	République Tchèque	Ouest	1000-1400 m		non	granite	leptosols, podzols ou dystric cambisols	non	non	Non	pH _{CaCl2} : 2,5-3,1 BS <15%

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V commercial (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.		types compart.
Oren <i>et al.</i> , 1988	2								épicéa	5	oui (mol/g MS)	non	15	aiguilles (≠ âges), bois et écorce des rameaux (≠ âges), bois tronc, écorce, racines (2 classes)	N: combustion P, K, Mg, Na, digestion dans HNO ₃ , mesure ICP
Ranger <i>et al.</i> , 1992	1	450-500		~85 ans		proche de 40 m	59		épicéa	15	oui (kg/ha et par an)	non	9	jeunes et vieilles aiguilles, jeunes et vieilles branches, écorce et bois du tronc + 3 classes racines	
Reynolds <i>et al.</i> , 2000	1 mais 3 lots	2500-2800-2900		12 ans	30-46 cm	3,1-3,8-6	19,4-30,5-50,3		épicéa	9	oui (kg/ha) (K, Ca, Mg)	non	3	tronc, branches, aiguilles	
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i>	épicéa 7 hêtre 5			de 15 à >100 ans					épicéa, hêtre		oui (kg/ha)	non	4	feuillage, tronc, branches, racines	
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	2			entre 84 et 177 ans	88-200	14,1-38,7			épicéa	3 par peuplement	oui (mmol/kg)	non	7	tronc, écorce, feuillage, branches, écorce branches, racines	

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Nihlgard, & Lindgren, 1977	Suède	Sud	60-150 m		oui	oui Schistes ou grès cambrien	Sol brun acide-podzol-sol brun gleyfié	oui	oui		
Ranger et Bonneau, 1984	Allemagne	Centre									
Bauer <i>et al.</i> , 2000	Europe				oui		oui				oui
Cole et Rapp, 1981	Europe (et Am. Du N)		oui	oui	oui	oui	oui				non
Bouchon <i>et al.</i> , 1985	France	Ardennes	460 m	1100 mm	8°C en moyenne annuelle	phyllade gris-bleu du Revinien sup	sols bruns acides (stagnogley podolique dans station C)	non	oui	hydromorphie sur une des stations	oui

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement									Minéralomasse					méthodes analytiques
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V commercial (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.	types compart.	
Nihlgard, & Lindgren, 1977	3	180-240-320		80-100, 80-130, 80-120	de 12 à 64		29,7-31,1-31,4		hêtre	10 par peuplement	oui (g/kg et t/ha)	non	4	tronc, écorce, branches, rameaux/feuillage	
Ranger et Bonneau, 1984				120		26,7 en moyenne			hêtre		oui (kg/ha)	non	5	feuilles, tronc, écorce, branches+rameaux, racines+souche	
Bauer <i>et al.</i> , 2000	12			de 30 à 145 ans					épicéa, hêtre		oui (mg/g)	non	7	feuillage, rameaux, branches, aubier; écorce, racines (grosses, fines)	
Cole et Rapp, 1981	11 peuplements retenus pour ds ce cadre	voir fichier XLS		voir fichier XLS		voir fichier XLS	voir fichier XLS		épicéa, hêtre, (douglas, chêne) (+ pins, tsuga)		oui (kg/ha)	non	4	feuillage, tronc, branches, racines	
Bouchon <i>et al.</i> , 1985	3			41-31-31	oui				chêne (+ bouleau, sorbier, coudrier, pommier sauvage)	20 par essence et par station	oui (%MS et kg/ha)	oui part.(N)	9	feuilles, branches (écorce+bois), écorce du tronc (3 classes), bois du tronc (3 classes), branches mortes	

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
précipitation (mm)				Température (°C)							
Freer-Smith et Kennedy, 2002	Europe et Am. Du N confondus										
Penninckx <i>et al.</i> , 1999	Belgique	Centre	120 m		oui	plateau loessique du Quaternaire	sols lessivés et sols lessivés hydromorphes	non			oui
Stupak et al, 2008	Danemark		33 et 48 m	813 et 842 mm	7,5 et 7,8°C	sable glaciaires			oui		pH _{CaCl2} : 3,9-4,0
Marion, 1979	Europe et Am. Du N										
Morrison et Foster, 1979	Monde	dont Europe									
Alban, 1979	UK	dont UK									

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement									Minéralomasse					méthodes analytiques
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V _{commercial} (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.	types compart.	
Free-Smith et Kennedy, 2002									épicéa, hêtre, chêne (+ pins, mélèze)		oui (g/kg)	non	2	Tronc écorce	
Penninckx <i>et al.</i> , 1999	2		futaies équiennes	135 et 40					hêtre	4 ou 5 par peuplement	oui (g/kg) concentrations moyennes	non	1	tronc (après analyse dendro)	
Stupak et al, 2008	2	2400 et 2500	futaies équiennes	39 et 48 ans			29 et 26		épicéa	5	oui (mg/g)	oui (mais assez complexes)	1	tout	ICP-OES pour P, Ca, K, Mg, Analyser pour N
Marion, 1979									chêne, hêtre (épicéa, douglas) (+ pins, érables)		kg/ha	non		peuplements	
Morrison et Foster, 1979									épicéa (+ peupliers, pins)					variable suivant les sources	
Alban, 1979				39 à 47 ans					épicéa, douglas, hêtre, chêne (+ pins, mélèze, châtaigner)		kg/ha	non		peuplements	

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
précipitation (mm)				Température (°C)							
Belkacem <i>et al.</i> , 1992	France	Ardennes	480 m	1300 mm	oui	limon sur schistes du Revinien	sol brun acide	moder			
Nys <i>et al.</i> 1983	France	Ardennes	390 m	oui (via Ranger <i>et al.</i> 1981) 1100 mm	8°C en moyenne annuelle	phyllade gris-bleu du Revinien sup + limons de couverture	sol brun acide chimiquement pauvre				
Rennie, 1955	Europe						oui				
Ranger et Nys, 1996	France										oui

Tableau 21. (Suite).

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age (an)	C ₁₃₀ (cm)	Ht (m)	G (m ² /ha)	V commercial (m ³ /ha)	Essences	# arbres éch.	teneurs (kg/ha)	Equ.	# compart.		types compart.
Belkacem <i>et al.</i> , 1992	1	585		60 ans	83 cm en moyenne			36,8	épicéa	8 par traitement	oui (kg/ha)	oui part.(Ca, Mg)	3	aiguilles, branches, tronc	N: Kjeldhal modifié P, Ca, K, Mg digestion HClO puis dosage ICP
Nys <i>et al.</i> 1983			taillis sous futaie//pessière	réserve 150 ans, taillis 28-30 ans, pessière 48 ans		chêne (90%) de la futaie			hêtre, épicéa (chêne) (+ bouleaux, sorbiers)	max 5				écorce tronc, bois tronc, branches mortes feuilles, bois des branches	
Rennie, 1955									hêtre, chêne			kg/ha		racines, bois du tronc, écorce du tronc, aiguilles,	
Ranger <i>et Nys</i> , 1996			taillis	oui			oui	oui	chêne (+sorbier, bouleau, peuplier châtaignier)		kg/ha	oui pour tous les taillis intensifs/extensifs confondus; sur base de paramètres du sol!!	3	Φ>7cm, Φ > 4 cm, tronc total aérien	

Tableau 21. (Suite).

Référence	Données géographiques					Milieu					
	Pays	Région	Altitude	information éco-climatique		Géologie	Type de sol	humus	information texture	information drainage	information analytique
				précipitation (mm)	Température (°C)						
Denaeyer-De Smet, 1971	Belgique	Famenne				calcaire du frasnien	rendzine	mull calcique			oui via article Duvigneaud <i>et al.</i> , 1970

Référence	Peuplement								Minéralomasse					méthodes analytiques	
	# étudiés	Densité	Régime	Age	C ₁₃₀	Ht	G	V	Essences	# arbres éch.	teneurs	Equ.	# compart.		types compart.
				(an)	(cm)	(m)	(m ² /ha)	commercial (m ³ /ha)							
Denaeyer-De Smet, 1971		1446	jeune futaie	35-75		13-20	21,2			chêne, hêtre		% MS	non		feuilles, bourgeons, rameaux écorce des branches, bois des branches, écorce du tronc, bois du tronc, écorce des racines, bois des racines

Annexe VI. Concentrations en éléments dans différents compartiments de l'arbre

Dans les tableaux suivants, lorsque des auteurs apparaissent à plusieurs reprises, il s'agit, dans la grande majorité des cas, de plusieurs peuplements traités de manière distincte. Il existe quelques cas (articles ayant pour auteur principal André, Ponette et certains de Ranger) où les deux lignes de valeurs concernent les mêmes peuplements mais sont issues de plusieurs tableaux ne donnant pas tout à fait les mêmes estimations¹².

Lorsqu'un écart-type est indiqué, il s'agit d'une analyse de variabilité de l'échantillon réalisé par les auteurs eux-mêmes. (Il peut par exemple s'agir d'une comparaison entre peuplements pour laquelle seule la concentration moyenne est indiquée et non celle de chaque peuplement).

a. Feuillage

Tableau 22. Concentrations en éléments nutritifs dans le feuillage du chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Rademacher <i>et al.</i> 2001	28913	1913	8087	5217	1739
Nys <i>et al.</i> , 1983	25400	2300	11100	2800	1100
Denayer-De Smet, 1971	22000	1500	12000	12000	1200
Cole & Rapp, 1981	23714	1714	11429	9714	2000
Cole & Rapp, 1981	21110	1359	10411	15616	1330
Cole & Rapp, 1981	24451	1312	11098	11954	2710
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	29170±1810	2400±460	11630±2150	8480±1360	1710±310

Tableau 23. Concentrations en éléments nutritifs dans le feuillage du taillis de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Ranger & Bonneau, 1986	15300	2900	12400	3800	1200
Nys <i>et al.</i> , 1983	15300	2900	12400	3800	1200
Hölscher <i>et al.</i> , 2001	22831		8093	3407	1264
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006	23410±1294	1230±820	5540±2610	4390±890	1250±590
Bouchon <i>et al.</i> 1985	25000	1900	8200	4500	1300
Bouchon <i>et al.</i> 1985	25800	1900	7200	4300	1200
Bouchon <i>et al.</i> 1985	22300	1900	7600	3600	1200

¹² Dans ces cas particuliers, une seule ligne a été employée pour le calcul de la concentration médiane. Il s'agit généralement de celle reprenant les concentrations issues des analyses physico-chimiques.

Tableau 24. Concentrations en éléments nutritifs dans le feuillage de hêtre.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Rennie, 1955		1350	10000	17000	
Ranger & Bonneau, 1986	27000	1700	8500	5500	800
Denayer-De Smet, 1971	20000	1300	11000	16000	1300
Hölscher <i>et al.</i> , 2001	21011		7350	4729	1167
Cole et Rapp, 1981	30779	2058	8518	4528	792
Cole et Rapp, 1981	28992	1730	9532	5313	759
Cole et Rapp, 1981	27420	1494	7992	3606	715
Cole et Rapp, 1981	24200	1400	5340	4900	1500
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	23607	750	11214	9214	1607
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	26750	1821	9286	2964	679
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	26171	1114	3657	4200	600
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	10919	811	6757	5351	432
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	27723	1362	7000	7170	1596
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	27370 ± 2270	1630±60	9420±1390	10140±4410	1640±370

Tableau 25. Concentrations en éléments nutritifs dans le feuillage d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	13780±1210	1800±70	6350±1040	8890±4960	1200±390
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	13989	1012	6630	3696	739
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	14560	1000	6958	6229	560
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	15248		5278	4789	692
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	12560	607	7460	4373	1560
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	12057	1983	3771	2021	621
Cole et Rapp, 1981	13132	1569	7006	3206	949
Cole et Rapp, 1981	12752	772	6644	3932	313
Cole et Rapp, 1981	12749	1051	6643	3878	3160
Morrison, 1979	12222	1222	6778	4667	556
Belkacem <i>et al.</i> 1992	13443	1114	5724	2499	320
Nys <i>et al.</i> , 1983	12482	1006	4589	4800	732
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14987	1093	5153	4401	559
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14147	1205	5196	3839	545
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	16388	1738	6897	3900	1085
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14427	1158		3839	616
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14007	1072	3675	3807	490
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14287	1230	3879	4617	614
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	15548	1561	4899	3888	943
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	14007	1168		4597	538
Reynolds <i>et al.</i> 2000			4739	2733	400
Ranger <i>et al.</i> , 1992	11288	1631	3821	3093	982
Ranger <i>et al.</i> , 1992	12060	1715	4053	3088	1013
Nilhgard, 1971	12222	1211	6778	4667	533
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	12200	1470	5400	3800	400
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	11800	1420	5300	4500	400
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	12200	1500	5100	2100	300
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	11800	1340	4900	2200	200
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	12216	1692	4461	7439	1698
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	12987	1299	5714	7013	1948
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	12500	1250	5667	5333	1667
Sicard <i>et al.</i> , 2006	13710	742	5161	2129	387
Ranger <i>et al.</i> , 1992	13000±1300	1730±470	3300±700	5100±1200	1030±260

Tableau 26. Concentrations en éléments nutritifs dans les jeunes aiguilles d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Ranger <i>et al.</i> , 1992	15300±1500	2150±290	4000±1100	2800±500	1280±270
Ranger <i>et al.</i> , 1992	16494	2158	5412	3060	1192
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	15128	1573	7417	2256	779
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	15268	1688	7245	2252	841
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	15688	1769	8179	3118	931
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	16248	1800	6576	2361	818
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	17509	1998	6654	2220	954
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	16528	1750	5267	3094	1000
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	13500	1610	5800	3000	500
Le Goaster <i>et al.</i> , 1991	13300	1500	5100	1900	400
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	14109	1763	6974	1500	1500
Ingerslev & Hallbäcken, 1999	12000	1225	6250	2750	1325

Tableau 27. Concentrations en éléments nutritifs dans le feuillage de douglas.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Sicard <i>et al.</i> 2006	18889	833	4944	3333	833
Ranger <i>et al.</i> , 2002	16882	1000	4882	9529	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	15000	929	4157	5786	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	14063	1000	4938	8063	
Ranger et Gelhaye 2001	15221	949	4279	4875	1037
Ponette et Ranger, 2000	15510	1070	5180	3310	1240
Ponette et Ranger, 2000	19920	900	4740	3320	960
Ponette et Ranger, 2000	15130	980	5330	6510	1190
Ponette et Ranger, 2000	16310	970	4890	3000	980
Ponette et Ranger, 2000	15680	1000	4670	6110	1260
Ranger <i>et al.</i> , 1995	16148	937	5178	9266	1243
Ranger <i>et al.</i> , 1995	15600±1900	900±100	5200±800	7500±3100	1100±300
Ranger <i>et al.</i> , 1995	16600±2200	1000±100	4300±700	6600±2100	1100±300
Ranger <i>et al.</i> , 1995	14000±1400	900±100	4400±1000	9000±2100	1200±300

b. tronc entier

Tableau 28. Concentrations en éléments nutritifs dans le tronc de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André et Ponette, 2003	1653,9±76,5	108,1±14,4	993,9±105,7	3031,8±405,4	99,4±23,9
André et Ponette, 2003	1635	90	919	3766	68
André <i>et al.</i> , 2010	3249 ?	83	839	2880	129
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	1270±80	90±30	1000±130	1450±220	120±20
Nys <i>et al.</i> , 1983	4600	300	1700	2000	200
Cole & Rapp, 1981	1838	81	1043	3661	276
Cole & Rapp, 1981	1760	111	1490	3965	112

Tableau 29. Concentrations en éléments nutritifs dans le tronc de hêtre.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Hagen-Thorn <i>et al.</i> , 2004	1130	130±40	1070±120	1010±50	320±60
André <i>et al.</i> , 2010	6991?	94	1112	1147	147
André <i>et al.</i> , 2010	969,1	98,2	150,7	496,5	221,9
Augusto <i>et al.</i> 2000	1459,5	122,5	1014	1300	243,5
Nilhgard, 1971	6667	558	2303	3848	413
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	1370	103	1310	1690	230
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	1129	111	1314	2037	176
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	1270	90	1280	1560	270
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	1129	111	1314	2037	176
Cole & Rapp, 1981	1864	289	661	1737	163
Cole & Rapp, 1981	1632	144	1032	1669	138
Cole & Rapp, 1981	1543	23	862	903	238

Tableau 30. Concentrations en éléments nutritifs dans le tronc d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Augusto <i>et al.</i> 2000	1108	100	585	1193	162
Alriksson <i>et Eriksson</i> , 1998	1800	210	1100	1800	170
Eriksson <i>et Rosen</i> , 1994	1757	527	608	1318	159
Ingerslev <i>et Hallbäcken</i> , 1999	1558	130	753	1429	234
Nilhgard, 1971	9200	1208	4480	3440	728
Ranger <i>et al.</i> , 1992	842	76	406	1032	168
Reynolds <i>et al.</i> 2000			1676	824	161
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	607	183	773	1983	139
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000.	1180	50	620	1330	140
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000.	1128	113	713	1340	139
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000	1480	113	558	926	162
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000.	1239	112	713	1340	139
Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> , 2000.	1247	125	899	1119	215
Cole & Rapp, 1981	1031	109	656	1080	148
Cole & Rapp, 1981	972	60	1000	1859	214
Cole & Rapp, 1981	1302	40	501	1349	155
Cole & Rapp, 1981	1303	189	501	1350	155
Nys <i>et al.</i> , 1983	1073	35	550	1161	157
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	900	130	800	500	100
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	800	90	600	500	100
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	1000	130	800	400	100
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	900	110	600	500	100

Tableau 31. Concentrations en éléments nutritifs dans le tronc de douglas.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Augusto <i>et al.</i> , 2000	1001	142	640	1214	110
Ranger & Gelhaye, 2001	1035	80	1013	528	93
Ranger <i>et al.</i> , 2002	1424	106	1818	530	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	1034	77	1013	511	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	991	82	469	651	
Freer-Smith & Kennedy, 2002	1100±570		480±400	1120±650	150±90

c. bois du tronc

Tableau 32. Concentrations en éléments nutritifs dans le bois de tronc de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André et Ponette, 2003	1227,6±43,6	70,6±12,1	806,4±95,9	435,4±49,5	52,1±12,9
André <i>et al.</i> 2010	2770	53	984	344	66
Nys <i>et al.</i> , 1983	1300	30	1000	400	4
Freer-Smith et Kennedy, 2002	1250±160		1000±240	1210±1370	100±50
Rademacher <i>et al.</i> 2001	1402	136	722	525	80
Rennie, 1955		280	1040	720	
Rennie, 1955		172	968	753	
Rennie, 1955		33	869	381	
Rennie, 1955		48	252	1724	

Tableau 33. Concentrations en éléments nutritifs dans le bois de tronc dans des taillis de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006	2570±1780	210±140	1570±860	630±240	280±240
Ranger & Bonneau, 1986	1500	100	600	1100	100
Nys <i>et al.</i> , 1983	1500	100	600	1100	100
Bouchon <i>et al.</i> 1985	1300-2300	100-200	800-100	400-500	100-200
Bouchon <i>et al.</i> 1985	1300-2100	100-200	800-1200	500-600	100
Bouchon <i>et al.</i> 1985	900-1500	100-200	1000-1300	500-700	100

Tableau 34. Concentrations en éléments nutritifs dans le bois de tronc de hêtre.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André <i>et al.</i>	5661 ?	67	981	502	120
Nilhgard, 1971	991	83	858	524	243
Nilhgard & Lindgren, 1977	1154	71	1094	880	292
Nilhgard & Lindgren, 1977	991	83	858	524	243
Nilhgard & Lindgren, 1977	1013	105	1209	557	306
Nilhgard & Lindgren, 1977	1160	70	1100	880	
Nilhgard & Lindgren, 1977	1120	80	860	520	
Nilhgard & Lindgren, 1977	1000	110	1200	560	
Freer-Smith et Kennedy, 2002	2000		910±150	1260±400	210±60
Denayer-De Smet, 1971	1600	70	1500	900	540
Rennie, 1955		149	1030	701	
Rennie, 1955		111	1412	881	
Rennie, 1955		91	784	1119	
Rennie, 1955		45	414	1552	
Rennie, 1955		71	776	839	
Ranger & Bonneau, 1986	1200	150	900	800	200

Tableau 35. Concentrations en éléments nutritifs dans le bois de tronc d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg	
	mg*kg ⁻¹					
Sicard <i>et al.</i> 2006		279	58	731	519	144
Ingerslev et Hallbäcken, 1999		1118	95	611	734	175
Ingerslev et Hallbäcken, 1999		1071	90	543	700	143
Ingerslev 1999 (part I)		900	94	670	750	181
Ingerslev 1999 (part I)		1000	98	660	730	191
Le Goaster <i>et al.</i> 1991		800	100	600	600	100
Nilhgard, 1971		708	62	429	479	73
Ranger <i>et al.</i> , 1992		600±100	50±10	400±300	600±100	130±30
Ranger <i>et al.</i> , 1992		652	52	324	669	131
Freer-Smith et Kennedy, 2002		1370±530		650±280	1290±400	170±20
Morrison, 1979		708	63	429	479	75
Belkacem <i>et al.</i> 1992		1058	132	1660	1259	125
Nys <i>et al.</i> , 1983		687	30	381	632	110
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		840	12	532	717	133
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		980	28	489	681	94
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		840	22	430	697	85
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		980	31	469	733	94
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1261	81	676	725	115
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1821	19	512	810	113
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1681	15	497	753	108
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1681	19	516	717	97
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1681	31	508	709	94
Svoboda <i>et al.</i> , 2006		1961	53	563	737	110

Attention ! Pour Svoboda *et al.*, 2006, il s'agit exceptionnellement d'une concentration *par arbre*.

Tableau 36. Concentrations en éléments nutritifs dans le bois de tronc de douglas.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Ranger <i>et al.</i> , 1995	690±50	50±10	540±100	400±40	70±10
Ranger <i>et al.</i> , 1995	600±30	20±10	340±40	280±40	100±100
Ranger <i>et al.</i> , 1995	610±40	30±1	230±30	290±40	50±60
Ranger <i>et al.</i> , 1995	644	18	483	302	?
Ponette & Ranger, 2000	1020	45	320	230	67
Ponette & Ranger, 2000	870	33	230	220	50
Ponette & Ranger, 2000	860	35	290	240	40
Ponette & Ranger, 2000	950	34	260	190	47
Ponette & Ranger, 2000	400	27	130	230	32
Ranger & Gelhaye, 2001	615	21	748	306	54
Ranger <i>et al.</i> , 2002	649	18	1298	298	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	616	20	749	296	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	635	29	215	306	
Sicard <i>et al.</i> , 2006	201	44	308	214	57

d. écorce du tronc

Tableau 37. Concentrations en éléments nutritifs dans l'écorce de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André & Ponette, 2003	6180,1±422,6	504,9±51,2	3035,5±301,6	30971,1±7806,3	577±114,9
André & Ponette, 2003	5676	479	2718	40056	423
André <i>et al.</i> 2010	2816	114	589	9149	211
Nys <i>et al.</i> , 1983	5000	300	1700	13400	300
Freer-Smith et Kennedy, 2002	4710±2830		1840±510	17600±10380	600±13
Rademacher <i>et al.</i> 2001	6757	324	1478	20824	441
Rennie, 1955		500	2700	23000	
Rennie, 1955		1231	2462	46923	
Rennie, 1955		817	1500	20358	
Rennie, 1955		711	1400	35111	
Denayer-De Smet, 1971	4000	240	2300	34000	3000

Tableau 38. Concentrations en éléments nutritifs dans l'écorce de taillis de chêne.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Balboa-Murias <i>et al.</i> , 2006	13280±5650	830±360	3450±720	9750±3900	1480±320
Ranger & Bonneau, 1986	7000	300	2100	6800	600
Nys <i>et al.</i> , 1983	7000	300	2100	6800	600
Bouchon <i>et al.</i> , 1985	5500-6700	300-400	2100-2500	6700-8900	400-500
Bouchon <i>et al.</i> , 1985	6300-7100	300-500	2400-2700	6300-9600	400-500
Bouchon <i>et al.</i> , 1985	4900-5700	300-400	2300-2400	6400-11190	400-500

Tableau 39. Concentrations en éléments nutritifs dans l'écorce de hêtre.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
André <i>et al.</i> , 2010	21044	358	826	7438	823
Nilhgard, 1971	8889	522	2111	10000	611
Nilhgard & Lindgren, 1977	6364	400	2464	25000	545
Nilhgard & Lindgren, 1977	8889	522	2111	10000	611
Nilhgard & Lindgren, 1977	7500	425	2075	14000	650
Ranger & Bonneau, 1986	7500	800	2300	9000	400
Rennie, 1955		429	1429	18857	
Rennie, 1955		1588	1706	13824	
Rennie, 1955		522	4275	23043	
Rennie, 1955		500	2500	33500	
Rennie, 1955		656	4827	25333	
Denayer-De Smet, 1971	4800	260	2200	44000	460
Freer-Smith et Kennedy, 2002	5370±890		2340±1470	5550±780	400

Tableau 40. Concentrations en éléments nutritifs dans l'écorce d'épicéa.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Sicard <i>et al.</i> 2006	5417	667	3833	4917	833
Ingerslev et Hallbäcken, 1999	5228	782	3113	8312	1264
Ingerslev et Hallbäcken, 1999	5616	562	2740	8219	1082
Ingerslev 1999 (part I)	4400	500	2800	8400	1170
Ingerslev 1999 (part I)	5500	720	2800	6300	1260
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	5200	770	4100	6700	700
Le Goaster <i>et al.</i> 1991	5500	800	4600	6100	700
Nilhgard, 1971	4545	618	3136	7636	973
Ranger <i>et al.</i> , 1992	4800±700	580±90	2200±500	9100±2900	980±150
Ranger <i>et al.</i> , 1992	4829	569	2130	8661	961
Freer-Smith et Kennedy, 2003	5480±180		3222±20	5350±390	910±90
Morrison 1979	4545	636	3136	7636	955
Nys <i>et al.</i> , 1983	4874	88	2181	6446	627
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	4622	437	2362	7266	777
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	4902	489	2299	8833	724
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	5323	554	2709	8068	828
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	5883	616	2913	7386	949
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	9245	951	4430	6040	1069
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	5043	421	1931	8565	632
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	5043	446	2303	8481	669
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	5463	499	2514	7903	853
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	6303	632	2991	7839	869
Svoboda <i>et al.</i> , 2006	8404	864	3636	7018	1053

Tableau 41. Concentrations en éléments nutritifs dans l'écorce de douglas.

	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
Ranger <i>et al.</i> , 1995	5700±540	670±70	4200±1300	870±530	530±120
Ranger <i>et al.</i> , 1995	4200±390	490±80	2700±550	1990±380	380
Ranger <i>et al.</i> , 1995	3300±230	420±60	2200±460	1110±320	320±60
Ranger <i>et al.</i> , 1995	6739	716	5458	1230	?
Ponette et Ranger, 2000	4760	450	2330	1570	380
Ponette et Ranger, 2000	4560	320	1740	2030	320
Ponette et Ranger, 2000	3860	380	2300	1960	230
Ponette et Ranger, 2000	3600	320	1530	1170	240
Ponette et Ranger, 2000	3350	300	1350	2580	270
Ranger et Gelhaye 2001	3906	485	2828	2061	360
Ranger <i>et al.</i> , 2002	6333	667	5111	2000	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	3867	467	2800	1967	
Ranger <i>et al.</i> , 2002	3422	444	2200	3000	
Sicard <i>et al.</i> 2006	4400	560	3600	1520	440

Annexe VII. Concentrations en éléments dans différents compartiments par essence

Tableau 42. Concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments du chêne.

compartiment	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
tronc entier	1760	90	1000	3032	120
bois du tronc	1300	62	968	525	66
écorce du tronc	5000	489	1700	23000	441
branches	3394	298	1821	4607	296
feuillage	24451	1714	11100	9714	1710

Tableau 43. Concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments du hêtre.

compartiment	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
tronc entier	1320	111	1070	1560	222
bois du tronc	1157	82	981	839	243
écorce du tronc	7500	500	2250	16429	545
branches	3965	478	1984	3495	279
feuillage	26750	1400	8509	5332	800

Tableau 44. Concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments de l'épicéa.

compartiment	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
tronc entier	1128	113	685	1255	155
bois du tronc	990	52	524	717	114
écorce du tronc	5228	575	2800	7839	869
branches	4910	517	1895	3123	400
feuillage (<1 an)	12994	1230	5278	3900	616
feuillage (année)	15284	1757	6413	2555	943

Tableau 45. Concentrations en éléments nutritifs dans différents compartiments de douglas.

compartiment	N	P	K	Ca	Mg
	mg*kg ⁻¹				
tronc entier	1035	82	827	590	110
bois du tronc	639	30	314	285	53
écorce du tronc	4053	458	2565	1963	340
branches	3918	416	2247	3137	406
feuillage (<1 an)	15640	959	4886	6310	1100
feuillage (année)	16000	1100	5300	4700	1200

Annexe VIII. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse des branches

Tableau 46. Equations de biomasse des branches pour le chêne.

	Zone géographique	Origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)			
							a	b	c	d
André <i>et al.</i> , 2010	Belgique	article original	$a*dbh^b*H^c*Dd^d$	16	17-57		0,0000013	3,123	1,491	1,097
Broadmeadow & Matthews, 2004	UK	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^2$?	≤7		0,00021612			
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^b*H^c$?	> 7	?	0,00054224	2,35	-1,022	
Cienciala <i>et al.</i> , 2008	République Tchèque	article original	$\exp(a+ b*\ln(dbh))$	51	6-59	6-32	-3,687	2,363		
		article original	$\exp(a+ b*\ln(dbh)+ c*\ln(H))$	51	6-59	6-32	-2,707	2,949	-0,94	
Gschwantner & Schadauer, 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+b*\ln(dbh))$	186	20,3-75,9	12,4-26,3	-9,8231	3,99492		
Hochbichler <i>et al.</i> , 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh))$	30	6,5-61		-5,33002	3,04628		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh)+ c*\ln(H))$	30	6,5-61	9,5-19	-3,85999	3,1926	-0,754	
Ledermann & Neumann, 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh)+ \ln(c))$	96	3,6-26,3	6,6-22,4	-2,60326	1,91283	1,199	
Yuste <i>et al.</i> , 2005	Belgique	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^b$	9	?	?	0,0021	3,3064		

dbh: « diameter at breast height » ; H : hauteur

Dd: rapport entre le diamètre moyen du houppier et diamètre de la tige à 1,30 m

Tableau 47. Equations de biomasse des branches pour le hêtre.

	Zone géographique	Origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)				
							a	b	c	f	g
André <i>et al.</i> , 2010	Belgique	article original	$a*dbh^b*H^c*Dd^f$	12	9-50		0,035	2,568	/	/	
Bartelink, 1997	Pays-Bas	article original	$a+b*dbh^c$	38			0,375	0,002	3,265		
		article original	$a*dbh^b*H^c$	38			0,0114	3,682	-1,031		
		article original	$a*dbh^b$	38			0,002	3,265			
Bartelink, 1998	Pays-Bas	article original	$a*dbh^b*H^c$?			0,0114	3,682	-1,031		
Broadmeadow & Matthews, 2004	UK	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^2$?	?	?	0,0002595				
Cienciala <i>et al.</i> , 2004	République Tchèque	article original	$a*dbh^b$	20	5,7-62,1	9,2-33,9	0,021	2,471			
		article original	$a*(dbh^2*H)^b$	20			0,001	1,192			
		article original	$a*dbh^b*H^c$	20			5,137	2,665	-1,878		
Duvigneaud <i>et al.</i> , 1977	Belgique	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\log(dbh))$	6	35-78,8		0,41439	3,18522			
Genet <i>et al.</i> , in press	Europe centrale	article original	$\alpha+ (\beta_1+ \beta_2*\hat{age}+ \beta_3*\exp(\beta_4*\hat{age}))*(d^2*H)^{(\gamma_1+\gamma_2*\hat{age})}+ \epsilon$	372			$\alpha= 0,093$	$\beta_1=42,3$	$\beta_3=188,7$	$\beta_4=-0,0372$	$\gamma_2=1,3$
Grote, 2002	Allemagne	article original	$(a+b)*\pi/4*dbh^2$	6	<31		0,077	0,099			
		article original	$a*\exp(b*(\pi/4*dbh^2))+ c*\exp(f*(\pi/4*dbh^2))$	6	<31		5,476	0,0033	2,714	0,0046	
Gschwantner & Schadauer, 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh))$	606	12,8-68,7	11,9-38,6	-10,02932	3,98035			
Heller, 1986	Allemagne	via Hölscher <i>et al.</i> , 2001	$a+ b*\exp(c*dbh)$		<0,7		-22,5485	21,4402	0,0471		
		via Hölscher <i>et al.</i> , 2001	$a+ b*\exp(c*dbh)$		>0,7		-71,3104	47,0308	0,0798		

dbh: « diameter at breast height » ; H : hauteur

Dd: rapport entre le diamètre moyen du houppier et diamètre de la tige à 1,30 m

Tableau 47. Equations de biomasse des branches pour le hêtre (suite).

	Zone géographique	Origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)				
							a	b	c	f	g
Joosten <i>et al.</i> , 2004	Allemagne	article original	$\exp(a+ b*\ln(dbh))$	198	<70		-3,0366	2,5395			
		article original	$\exp(a+ b*\ln(dbh)+ c*\ln(H))$	198	<70	<35	-3,7378	2,1596	0,6338		
Hochbichler <i>et al.</i> , 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh))$	36	6,6–52	9–40,1	-4,82606	2,69521			
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+ b*\ln(dbh)+ c*\ln(h))$	36	6,6–52	9–40,1	-3,54015	3,93514	1,59363	-	
Ledermann & Neumann, 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+b*\ln(dbh)+\ln(c))$	4213	2,0–67,1	3,6–39	-4,21566	2,57726	1,162		
Le Goff & Ottorini, 2000	France	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$\exp(a+b*\ln(dbh))$	23	?	?	-6,2524	3,328			
Muukkonen, 2007	Europe	article original	$a*dbh^b$	167			0,00498	3,045			
Muukkonen, 2007	Europe	article original	$\exp(a+ b*dbh/(dbh+c))$	167			-2,128	13,295	26,095		
Pellinen, 1986	Allemagne	via Joosten <i>et al.</i> 2004	$a*(10^{-3}*(b+c*dbh*h^2+f*dbh^3))^g$	20			602,48	16,64	0,00072	0,0025	1,01938
Wutzler <i>et al.</i> , 2008	Europe	article original	$a*dbh^b*h^c$	443	2-64	3-37	0,123	3,09	-1,17		
Wutzler <i>et al.</i> , 2008 (brushwood)	Europe	article original	$a*dbh^b*h^c$	443	2-64	3-37	0,466	1,85	-0,349		

dbh: « diameter at breast height » ; H : hauteur

Tableau 48. Equations de biomasse des branches pour l'épicéa.

	Zone géographique	origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)			
							a	b	c	d
Cerný,1990	République Tchèque	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^b$	25	11-47	14-33	0,0042229	2,7044		
			$a*(dbh^2*H)^b$	25	11-47	14-33	0,00045394	1,1262		
Grote, 2002	Allemagne	article original	$(a+b)*(\pi/4)*dbh^2$	6	<31		0,016	0,04		
			$a*e(b*(\pi/4*dbh^2) + c*e(f*(\pi/4*dbh^2))$		<31		3,872	0,0014	6,844	0,0018
Fiedler, 1987	Allemagne	article original	$a+ b*dbh+ c*dbh^2$	19	17-39		17,6	-2,87	0,141	
Hochbichler <i>et al.</i> , 2006	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$exp(a+ b*ln(dbh))$	82	9,2-43,2	12,2-31,2	-5,1689	2,69049		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$exp(a+ b*ln(dbh)+ c*ln(H))$	82	9,2-43,2	12,2-31,2	-5,04936	2,73927	0,0886	-
Ilg, 2002	Allemagne	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^b$	5	23-52	32,-38,9	0,000999	2,833374		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*dbh^b$	5	23-52	32-38,8	0,00684	2,0603		
Mund, <i>et al.</i> , 2002	Allemagne	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*(H*dbh^2)^b$	32	0-50	5-30	11,74	1,2		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*(H*dbh^2)^b$	10	0-10	5-10	33,53	0,916		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*(H*dbh^2)^b$	7	20-30	18-21	10,81	1,05		
		via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a*(H*dbh^2)^b$	15	30-50	24-30	3,98	1,306		

Tableau 48. Equations de biomasse des branches pour l'Épicéa (suite).

	Zone géographique	Origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)			
							a	b	c	d
Muukkonen, 2007	Europe	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a \cdot dbh^b$	265			0,000989	3,187		
			$\exp(a + b \cdot dbh / dbh + c)$	265			-0,537	10,093	40,426	
Neumann, Jandl, 2002	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a \cdot \exp(b \cdot dbh)$	12	3,2-20,7		5,3727	0,00876		
			$a \cdot \exp(b \cdot dbh)$	12	2,5-17,9		1,325	0,0135		
Ranger <i>et al.</i> , 1981	France	article original	$\log(Y) = (a + b \cdot \log(dbh))$	23	55 pour arbre moyen ($\sigma = 15,83$)	13,5 (h arbre de dbh moyen)	-4,143	3,018		
Schwarzmeier, 2000	Autriche	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a \cdot dbh^b$	7	26-60	30,-36,27	0,000135	3,453183		
			$a \cdot dbh^b$	7	27-55,8	22,-29,80	0,0000196	4,0576		
			$a \cdot dbh^b$	7	26-60	30-36,26	0,0021994	2,4392		
			$a \cdot dbh^b$	7	26-55,7	22-29,79	0,0004947	2,9487		
Sicart <i>et al.</i> , 2006	France	article original	$a \cdot (\pi \cdot dbh)^b$	10	20-100		0,000213	2,81		
Wirth <i>et al.</i> , 2004	Europe	article original	$\exp(a + b \cdot \ln(dbh))$	384	1,8-67,6	2,1-42,8	-3,96201	2,2552		
			$\exp(a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln H + d \cdot (\ln H)^2)$	384	1,8-67,6	2,1-42,8	-0,64565	2,85424	-	2,98493

Tableau 49. Equations de biomasse des branches pour le douglas.

	Zone géographique	Origine de l'équation	Modèle	n	dbh (cm)	H (m)	Paramètres (ordre d'apparition)			
							a	b	c	d
Bartelink, 1996	Pays-Bas	article original	$\exp(a + b \cdot \ln(\text{dbh}) + c \cdot \ln(h))$	23	3-38	6,7-25,9	-2,675	4,42	-2,784	
Bartelink, 1998	Pays-Bas	article original	$a \cdot \text{dbh}^b \cdot h^c$	23	3-38	6,7-25,9	0,069	4,42	-2,784	
Broadmeadow & Matthews, 2004	UK	via Zianis <i>et al.</i> , 2005 et Muukkonen & Maakipää, 2006	$a \cdot \text{dbh}^b \cdot H^c$?	?	?	0,0003461	2,71692894	-	1,26060595
Ranger <i>et al.</i> , 1995	France	article original	$(a + b \cdot \hat{\text{age}} + c \cdot \hat{\text{age}}^2) \cdot (\text{dhh} \cdot \pi)^d$	36	40-200	<40	0,3424	-0,0114	0,000116	2,86
Sicard <i>et al.</i> , 2006	France	article original	$a \cdot (\pi \cdot \text{dbh})^b$	10	4-41		0,0000528	3		

Annexe IX. Scénarios d'exploitation

Tableau 50. Scénarios d'exploitation pour le chêne de niveau de fertilité 0.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
Exportation « de base »		7,44		0,52		4,82		12,81		0,61	
scénario 1		2,19	2,16	0,19	0,19	1,14	1,13	2,73	2,73	0,16	0,15
scénario 2	a	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00
	b	0,16	0,12	0,01	0,01	0,08	0,06	0,20	0,15	0,01	0,01
	c	0,10	0,13	0,01	0,01	0,05	0,07	0,12	0,16	0,01	0,01
scénario 3	a	0,18	0,15	0,02	0,01	0,09	0,08	0,23	0,18	0,01	0,01
	b	0,12	0,15	0,01	0,01	0,06	0,08	0,15	0,00	0,01	0,01
	c	0,25	0,25	0,02	0,02	0,13	0,13	0,32	0,31	0,02	0,02
scénario 4		0,28	0,27	0,02	0,02	0,16	0,14	0,35	0,34	0,02	0,02
scénario 5		1,34	1,64	0,12	0,14	0,70	0,86	1,68	2,06	0,10	0,12

Tableau 51. Scénarios d'exploitation pour le chêne de niveau de fertilité 1.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		6,26		0,44		4,06		10,78		0,51	
scénario 1		1,80	1,58	0,16	0,14	0,94	0,82	1,98	1,98	0,13	0,11
scénario 2	a	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
	b	0,13	0,10	0,01	0,01	0,07	0,05	0,16	0,12	0,01	0,01
	c	0,08	0,11	0,01	0,01	0,04	0,06	0,11	0,13	0,01	0,01
scénario 3	a	0,13	0,11	0,01	0,01	0,07	0,06	0,16	0,13	0,01	0,01
	b	0,09	0,12	0,01	0,01	0,05	0,06	0,11	0,00	0,01	0,01
	c	0,21	0,20	0,02	0,02	0,11	0,11	0,26	0,25	0,01	0,01
scénario 4		0,22	0,21	0,02	0,02	0,12	0,11	0,27	0,27	0,02	0,02
scénario 5		1,17	1,47	0,10	0,13	0,61	0,77	1,46	1,84	0,08	0,10

Tableau 52. Scénarios d'exploitation pour le chêne de niveau de fertilité 2.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		4,95		0,35		3,21		8,53		0,40	
scénario 1		1,36	1,26	0,12	0,11	0,71	0,66	1,58	1,58	0,10	0,09
scénario 2	a	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
	b	0,09	0,08	0,01	0,01	0,05	0,04	0,12	0,10	0,01	0,01
	c	0,07	0,08	0,01	0,01	0,04	0,04	0,09	0,11	0,00	0,01
scénario 3	a	0,10	0,09	0,01	0,01	0,05	0,05	0,12	0,11	0,01	0,01
	b	0,07	0,09	0,01	0,01	0,04	0,05	0,09	0,00	0,01	0,01
	c	0,16	0,16	0,01	0,01	0,08	0,08	0,20	0,20	0,01	0,01
scénario 4		0,17	0,17	0,01	0,01	0,10	0,09	0,21	0,21	0,01	0,01
scénario 5		0,99	1,25	0,09	0,11	0,52	0,65	1,24	1,56	0,07	0,09

Tableau 53. Scénarios d'exploitation pour le chêne de niveau de fertilité 3.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		3,52		0,25		2,28		6,06		0,29	
scénario 1		0,85	0,73	0,07	0,06	0,44	0,38	0,91	0,91	0,06	0,05
scénario 2	a	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	b	0,05	0,04	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,05	0,00	0,00
	c	0,06	0,07	0,01	0,01	0,03	0,03	0,07	0,08	0,00	0,00
scénario 3	a	0,06	0,05	0,00	0,00	0,03	0,03	0,07	0,06	0,00	0,00
	b	0,06	0,07	0,01	0,01	0,03	0,04	0,08	0,00	0,00	0,01
	c	0,11	0,11	0,01	0,01	0,06	0,06	0,14	0,14	0,01	0,01
scénario 4		0,11	0,12	0,01	0,01	0,06	0,06	0,14	0,15	0,01	0,01
scénario 5		0,82	1,01	0,07	0,09	0,43	0,53	1,03	1,27	0,06	0,07

Tableau 54. Scénarios d'exploitation pour le chêne de niveau de fertilité 4.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		2,38		0,17		1,55		4,11		0,19	
scénario 1		0,40	0,34	0,03	0,03	0,21	0,17	0,41	0,41	0,03	0,02
scénario 2	a	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	b	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	0,05	0,03	0,00	0,00
	c	0,05	0,04	0,00	0,00	0,03	0,02	0,07	0,05	0,00	0,00
scénario 3	a	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02	0,02	0,05	0,04	0,00	0,00
	b	0,06	0,05	0,00	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00
	c	0,09	0,07	0,01	0,01	0,05	0,04	0,11	0,09	0,01	0,00
scénario 4		0,09	0,08	0,01	0,01	0,04	0,04	0,12	0,10	0,01	0,01
scénario 5		0,73	0,62	0,06	0,05	0,38	0,32	0,91	0,77	0,05	0,04

Tableau 55. Scénarios d'exploitation pour le hêtre de niveau de fertilité 0.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		7,35		0,62		5,95		8,68		1,23	
scénario 1		2,63	2,48	0,32	0,30	1,31	1,24	2,32	2,18	0,18	0,17
scénario 2	a	0,05	0,07	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	<0,005	<0,005
	b	0,30	0,28	0,04	0,03	0,15	0,14	0,27	0,24	0,02	0,02
	c	0,29	0,28	0,03	0,03	0,14	0,14	0,25	0,25	0,02	0,02
scénario 3	a	0,35	0,34	0,04	0,04	0,18	0,17	0,31	0,30	0,02	0,02
	b	0,34	0,35	0,04	0,04	0,17	0,17	0,30	0,31	0,02	0,02
	c	0,59	0,55	0,07	0,07	0,30	0,28	0,52	0,49	0,04	0,04
scénario 4		0,64	0,62	0,08	0,08	0,32	0,31	0,56	0,55	0,05	0,04
scénario 5		2,67	1,97	0,32	0,24	1,34	0,99	2,35	1,74	0,19	0,14

Tableau 56. Scénarios d'exploitation pour le hêtre de niveau de fertilité 1.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		6,34		0,53		5,14		7,49		1,07	
scénario 1		2,22	2,28	0,27	0,28	1,11	1,14	1,96	2,01	0,16	0,16
scénario 2	a	0,02	0,07	0,00	0,01	0,01	0,04	0,02	0,06	0,00	0,00
	b	0,25	0,23	0,03	0,03	0,12	0,12	0,22	0,20	0,02	0,02
	c	0,26	0,23	0,03	0,03	0,13	0,12	0,22	0,21	0,02	0,02
scénario 3	a	0,27	0,30	0,03	0,04	0,13	0,15	0,23	0,27	0,02	0,02
	b	0,27	0,31	0,03	0,04	0,14	0,15	0,24	0,27	0,02	0,02
	c	0,50	0,47	0,06	0,06	0,25	0,23	0,44	0,41	0,04	0,03
scénario 4		0,52	0,54	0,06	0,06	0,26	0,27	0,46	0,47	0,04	0,04
scénario 5		2,35	2,21	0,28	0,27	1,18	1,11	2,07	1,95	0,17	0,16

Tableau 57. Scénarios d'exploitation pour le hêtre de niveau de fertilité 2.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		5,29		0,44		4,28		6,25		0,89	
scénario 1		1,78	1,89	0,21	0,23	0,89	0,94	1,57	1,66	0,13	0,13
scénario 2	a	0,01	0,06	<0,005	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	<0,005	<0,005
	b	0,19	0,19	0,02	0,02	0,10	0,10	0,17	0,17	0,01	0,01
	c	0,22	0,21	0,03	0,02	0,11	0,10	0,19	0,18	0,02	0,01
scénario 3	a	0,21	0,25	0,02	0,03	0,10	0,13	0,18	0,22	0,01	0,02
	b	0,23	0,27	0,03	0,03	0,12	0,13	0,20	0,23	0,02	0,02
	c	0,41	0,40	0,05	0,05	0,21	0,20	0,37	0,35	0,03	0,03
scénario 4		0,43	0,46	0,05	0,06	0,21	0,23	0,38	0,41	0,03	0,03
scénario 5		2,03	2,19	0,24	0,26	1,02	1,10	1,79	1,93	0,14	0,15

Tableau 58. Scénarios d'exploitation pour le hêtre de niveau de fertilité 3.

	N		P		K		Ca		Mg		
	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	
$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$											
exportation "de base"	4,20		0,35		3,41		4,97		0,71		
scénario 1	1,31	1,47	0,16	0,18	0,66	0,73	1,16	1,29	0,09	0,10	
scénario 2	a	0,02	0,05	<0,005	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	<0,005	<0,005
	b	0,15	0,16	0,02	0,02	0,07	0,08	0,13	0,14	0,01	0,01
	c	0,18	0,18	0,02	0,02	0,09	0,09	0,15	0,16	0,01	0,01
scénario 3	a	0,16	0,20	0,02	0,02	0,08	0,10	0,14	0,18	0,01	0,01
	b	0,19	0,23	0,02	0,03	0,10	0,11	0,17	0,20	0,01	0,02
	c	0,32	0,34	0,04	0,04	0,16	0,17	0,29	0,30	0,02	0,02
scénario 4		0,34	0,38	0,04	0,05	0,17	0,19	0,30	0,34	0,02	0,03
scénario 5		1,72	1,95	0,21	0,23	0,86	0,97	1,51	1,72	0,12	0,14

Tableau 59. Scénarios d'exploitation pour le hêtre de niveau de fertilité 4.

	N		P		K		Ca		Mg		
	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	
$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$											
exportation "de base"	3,22		0,27		2,61		3,80		0,54		
scénario 1	0,91	1,14	0,11	0,14	0,46	0,57	0,81	1,00	0,06	0,08	
scénario 2	a	0,01	0,04	<0,005	<0,005	0,01	0,02	0,01	0,03	<0,005	<0,005
	b	0,10	0,12	0,01	0,01	0,05	0,06	0,09	0,11	0,01	0,01
	c	0,13	0,16	0,02	0,02	0,07	0,08	0,12	0,14	0,01	0,01
scénario 3	a	0,11	0,16	0,01	0,02	0,06	0,08	0,10	0,14	0,01	0,01
	b	0,14	0,19	0,02	0,02	0,07	0,10	0,13	0,17	0,01	0,01
	c	0,24	0,28	0,03	0,03	0,12	0,14	0,21	0,24	0,02	0,02
scénario 4		0,25	0,31	0,03	0,04	0,12	0,16	0,22	0,28	0,02	0,02
scénario 5		1,40	1,76	0,17	0,21	0,70	0,88	1,24	1,55	0,10	0,12

Tableau 60. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 0.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation coupe +BF éclaircie	exportation "de base"	7,77		0,77		4,71		8,64		1,07	
scénario 1		2,30	2,28	0,24	0,24	0,87	0,87	1,38	1,38	0,19	0,19
scénario 2	a	0,25	0,20	0,03	0,02	0,09	0,08	0,15	0,12	0,02	0,02
	b	0,23	0,22	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,13	0,02	0,02
	c	0,21	0,25	0,02	0,03	0,08	0,09	0,13	0,15	0,02	0,02
scénario 3	a	0,47	0,42	0,05	0,04	0,18	0,16	0,28	0,25	0,04	0,03
	b	0,46	0,45	0,05	0,05	0,17	0,17	0,28	0,01	0,04	0,04
	c	0,44	0,47	0,05	0,05	0,17	0,18	0,26	0,28	0,04	0,04
scénario 5		2,51	2,45	0,26	0,26	0,95	0,93	1,51	1,48	0,20	0,20

Tableau 61. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 1.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		7,10		0,71		4,31		7,90		0,97	
scénario 1		2,04	1,81	0,22	0,19	0,78	0,69	1,09	1,09	0,17	0,15
scénario 2	a	0,21	0,18	0,02	0,02	0,08	0,07	0,13	0,11	0,02	0,01
	b	0,20	0,18	0,02	0,02	0,08	0,07	0,12	0,11	0,02	0,01
	c	0,19	0,18	0,02	0,02	0,07	0,07	0,11	0,11	0,02	0,01
scénario 3	a	0,42	0,35	0,04	0,04	0,16	0,13	0,25	0,21	0,03	0,03
	b	0,40	0,35	0,04	0,04	0,15	0,13	0,24	0,01	0,03	0,03
	c	0,39	0,35	0,04	0,04	0,15	0,13	0,24	0,21	0,03	0,03
scénario 5		2,28	2,44	0,24	0,26	0,86	0,93	1,37	1,47	0,19	0,20

Tableau 62. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 2.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		6,30		0,63		3,82		7,01		0,86	
scénario 1		1,78	1,57	0,19	0,17	0,68	0,60	0,95	0,95	0,15	0,13
scénario 2	a	0,18	0,16	0,02	0,02	0,07	0,06	0,11	0,10	0,01	0,01
	b	0,18	0,15	0,02	0,02	0,07	0,06	0,11	0,09	0,01	0,01
	c	0,17	0,16	0,02	0,02	0,06	0,06	0,10	0,10	0,01	0,01
scénario 3	a	0,36	0,31	0,04	0,03	0,14	0,12	0,22	0,19	0,03	0,03
	b	0,35	0,32	0,04	0,03	0,13	0,12	0,21	0,01	0,03	0,03
	c	0,35	0,32	0,04	0,03	0,13	0,12	0,21	0,19	0,03	0,03
scénario 5		2,04	2,16	0,22	0,23	0,78	0,82	1,23	1,30	0,17	0,18

Tableau 63. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 3.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		5,32		0,53		3,23		5,91		0,73	
scénario 1		1,41	1,26	0,15	0,13	0,53	0,48	0,76	0,76	0,11	0,10
scénario 2	a	0,16	0,14	0,02	0,01	0,06	0,05	0,09	0,08	0,01	0,01
	b	0,16	0,14	0,02	0,01	0,06	0,05	0,10	0,09	0,01	0,01
	c	0,15	0,14	0,02	0,01	0,06	0,05	0,09	0,09	0,01	0,01
scénario 3	a	0,32	0,28	0,03	0,03	0,12	0,11	0,19	0,17	0,03	0,02
	b	0,31	0,28	0,03	0,03	0,12	0,11	0,18	0,01	0,02	0,02
	c	0,31	0,28	0,03	0,03	0,12	0,11	0,19	0,17	0,03	0,02
scénario 5		1,82	1,94	0,19	0,20	0,69	0,74	1,10	1,17	0,15	0,16

Tableau 64. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 4.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		4,41		0,44		2,68		4,91		0,60	
scénario 1		1,08	0,98	0,11	0,10	0,41	0,37	0,59	0,59	0,09	0,08
scénario 2	a	0,13	0,13	0,01	0,01	0,05	0,05	0,08	0,08	0,01	0,01
	b	0,14	0,12	0,01	0,01	0,05	0,05	0,08	0,07	0,01	0,01
	c	0,13	0,12	0,01	0,01	0,05	0,05	0,08	0,07	0,01	0,01
scénario 3	a	0,27	0,25	0,03	0,03	0,10	0,09	0,16	0,15	0,02	0,02
	b	0,26	0,25	0,03	0,03	0,10	0,09	0,16	0,01	0,02	0,02
	c	0,27	0,25	0,03	0,03	0,10	0,09	0,16	0,15	0,02	0,02
scénario 5		1,60	1,60	0,17	0,17	0,61	0,61	0,96	0,96	0,13	0,13

Tableau 65. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 5.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		3,58		0,36		2,17		3,98		0,49	
scénario 1		0,80	0,75	0,08	0,08	0,30	0,29	0,45	0,45	0,07	0,06
scénario 2	a	0,12	0,11	0,01	0,01	0,04	0,04	0,07	0,06	0,01	0,01
	b	0,12	0,11	0,01	0,01	0,04	0,04	0,07	0,07	0,01	0,01
	c	0,11	0,11	0,01	0,01	0,04	0,04	0,07	0,06	0,01	0,01
scénario 3	a	0,23	0,22	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,13	0,02	0,02
	b	0,23	0,21	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,01	0,02	0,02
	c	0,23	0,22	0,02	0,02	0,09	0,08	0,14	0,13	0,02	0,02
scénario 5		1,37	1,42	0,14	0,15	0,52	0,54	0,83	0,85	0,11	0,12

Tableau 66. Scénarios d'exploitation pour l'épicéa de niveau de fertilité 6.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		3,06		0,27		1,77		3,28		0,42	
scénario 1		0,94	0,55	0,09	0,06	0,57	0,21	0,33	0,33	0,13	0,04
scénario 2	a	0,10	0,09	0,01	0,01	0,04	0,03	0,06	0,05	0,01	0,01
	b	0,10	0,09	0,01	0,01	0,04	0,03	0,06	0,05	0,01	0,01
	c	0,09	0,09	0,01	0,01	0,04	0,03	0,06	0,05	0,01	0,01
scénario 3	a	0,19	0,18	0,02	0,02	0,07	0,07	0,12	0,11	0,02	0,01
	b	0,19	0,18	0,02	0,02	0,07	0,07	0,11	0,01	0,02	0,01
	c	0,19	0,18	0,02	0,02	0,07	0,07	0,11	0,11	0,02	0,01
scénario 5		1,14	1,21	0,12	0,13	0,43	0,46	0,69	0,73	0,09	0,10

Tableau 67. Scénarios d'exploitation pour le douglas de niveau de fertilité o.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		10,07		0,80		8,05		5,75		1,07	
scénario 1		2,11	2,54	0,22	0,27	1,21	1,46	2,03	2,03	0,22	0,26
scénario 2	a	0,27	0,42	0,03	0,04	0,15	0,24	0,21	0,34	0,03	0,044
	b	0,25	0,26	0,03	0,03	0,14	0,15	0,20	0,21	0,03	0,03
	c	0,17	0,18	0,02	0,02	0,10	0,11	0,14	0,15	0,02	0,02
scénario 3	a	0,51	0,68	0,05	0,07	0,29	0,39	0,41	0,55	0,05	0,07
	b	0,44	0,60	0,05	0,06	0,25	0,35	0,35	0,04	0,05	0,06
	c	0,42	0,45	0,04	0,05	0,24	0,26	0,33	0,36	0,04	0,05
scénario 5		3,23	2,88	0,34	0,31	1,85	1,65	2,59	2,31	0,33	0,30

Tableau 68. Scénarios d'exploitation pour le douglas de niveau de fertilité 1.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		9,37		0,75		7,49		5,35		1,00	
scénario 1		2,02	2,36	0,21	0,25	1,16	1,35	1,89	1,89	0,21	0,24
scénario 2	a	0,12	0,33	0,01	0,03	0,07	0,19	0,09	0,26	0,01	0,03
	b	0,23	0,22	0,02	0,02	0,13	0,12	0,18	0,17	0,02	0,02
	c	0,19	0,16	0,02	0,02	0,11	0,09	0,15	0,13	0,02	0,02
scénario 3	a	0,34	0,54	0,04	0,06	0,20	0,31	0,27	0,44	0,04	0,06
	b	0,30	0,49	0,03	0,05	0,17	0,28	0,24	0,03	0,03	0,05
	c	0,41	0,38	0,04	0,04	0,24	0,22	0,33	0,31	0,04	0,04
scénario 5		2,95	2,76	0,31	0,29	1,69	1,58	2,36	2,21	0,31	0,29

Tableau 69. Scénarios d'exploitation pour le douglas de niveau de fertilité 2.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		kg*ha ⁻¹ *an ⁻¹									
exportation "de base"		8,24		0,66		6,58		4,70		0,88	
scénario 1		1,69	1,92	0,18	0,20	0,97	1,10	1,54	1,54	0,18	0,20
scénario 2	a	0,10	0,23	0,01	0,02	0,06	0,13	0,08	0,18	0,01	0,02
	b	0,21	0,22	0,02	0,02	0,12	0,12	0,16	0,17	0,02	0,02
	c	0,20	0,19	0,02	0,02	0,12	0,11	0,16	0,15	0,02	0,02
scénario 3	a	0,31	0,44	0,03	0,05	0,18	0,25	0,25	0,35	0,03	0,05
	b	0,30	0,41	0,03	0,04	0,17	0,24	0,24	0,02	0,03	0,04
	c	0,41	0,41	0,04	0,04	0,23	0,23	0,33	0,32	0,04	0,04
scénario 5		2,68	2,62	0,28	0,28	1,54	1,50	2,14	2,10	0,28	0,27

Tableau 70. Scénarios d'exploitation pour le douglas de niveau de fertilité 3.

		N		P		K		Ca		Mg	
		BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation	BEF	équation
		$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$									
exportation "de base"		7,39		0,59		5,91		4,22		0,79	
scénario 1		1,51	1,82	0,16	0,19	0,87	1,05	1,46	1,46	0,16	0,19
scénario 2	a	0,03	0,14	0,00	0,01	0,02	0,08	0,03	0,11	0,00	0,01
	b	0,20	0,22	0,02	0,02	0,11	0,13	0,16	0,18	0,02	0,02
	c	0,21	0,20	0,02	0,02	0,12	0,12	0,16	0,16	0,02	0,02
scénario 3	a	0,23	0,36	0,02	0,04	0,13	0,21	0,18	0,29	0,02	0,04
	b	0,24	0,34	0,03	0,04	0,14	0,19	0,19	0,01	0,02	0,04
	c	0,40	0,42	0,04	0,04	0,23	0,24	0,32	0,34	0,04	0,04
scénario 5		2,41	2,48	0,26	0,26	1,38	1,42	1,93	1,99	0,25	0,26