

# Méthode pragmatique d'évaluation de la réserve en eau des stations forestières et cartographie à l'échelle régionale (Wallonie, Belgique)

François Ridremont, Philippe Lejeune, Hugues Claessens

Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : francois.ridremont@ulg.ac.be

L'évaluation de la disponibilité en eau des stations forestières constitue une préoccupation grandissante suite à la prise de conscience de l'impact potentiel des changements climatiques sur le régime hydrique des sols. À l'heure actuelle, les gestionnaires forestiers restent assez démunis en matière d'outils d'évaluation chiffrée de la réserve en eau. Cet article présente une méthode simple d'estimation de cette réserve qui soit appropriable par les agents de terrain et puisse mener à une carte à l'échelle de la station forestière pour la Wallonie. Après inventaire des méthodes possibles, c'est la « méthode des textures », basée sur les classes de fonctions de pédotransfert de Jamagne et al. (1977), qui a été utilisée. Les profils de sol de la base de données *Aardewerk* ont facilité la transposition des résultats de Jamagne et al. (1977) au système textural belge. Pour sa part, la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW), par l'intermédiaire de la typologie des Principaux Types de Sols, a servi de support à la cartographie de la réserve en eau à l'échelle régionale. Le caractère bioindicateur des plantes herbacées et arbustives forestières a été confronté aux données cartographiques produites comme premier élément de validation. Les résultats de la régression indiquent une relation significative entre les deux variables, mais aussi que la réserve en eau ne suffit pas à expliquer à elle seule le niveau hydrique exprimé par la flore. Il ressort également que la caractérisation des matériaux parentaux de Wallonie constituerait un appui indéniable au développement de la méthode proposée, la transposition de résultats étrangers pouvant conduire à certains biais. Les perspectives d'utilisation de ce type de carte thématique sont multiples : intégration comme données de base à la modélisation autécologique, évaluation du bilan hydrique pour la caractérisation hydrique des stations forestières et construction des catalogues de stations ; autant d'outils permettant d'orienter les gestionnaires forestiers dans leurs démarches d'aménagement.

**Mots-clés.** Station forestière, profil de sol, texture du sol, capacité de rétention en eau, fonction de pédotransfert par classe, développement d'outil, cartographie à grande échelle, plante indicatrice.

**Pragmatic assessment of the water reserve of the forest sites and mapping at the regional scale (Wallonia, Belgium).** The assessment of the forest sites water availability constitutes a growing concern following the awareness of the potential impact of climate change on the soil moisture regime. At the present time, the forest managers lack tools for a quantitative estimation of the soil water reserve. This paper presents a simple estimation method that can be adopted on field by foresters. A map of this soil water reserve at the forest site scale has been established for the Southern Belgium. After the inventory of the possible techniques, the “textural method”, based on the pedotransfert classes of Jamagne et al. (1977), has been used. The soil profiles from the *Aardewerk* database have eased the translation of the Jamagne et al. (1977)'s results in the Belgian textural system. Moreover, the geodatabase of the Digital Soil Map of Wallonia (DSMW), through the typology of the major soil types, has been used as mapping support of the water reserve at the regional scale. Like a first attempt of validation, the result has been compared with the bioindicator character of forest understory vegetation. The regression results show a significant relationship between the soil water reserve and the vegetation estimate, but they also indicate that the water reserve does not explain alone the moisture level expressed by the flora. It emerges that the characterization of the Walloon parent materials will constitute an undeniable support for the development of the proposed method, the transposition of foreign results leading to some bias. The use prospects of this thematic map are multiple: integration as inputs for the autecological modelling, assessment of the moisture regime for the water availability of forest sites and building of sites catalogs; as many tools to guide forest managers in their planning measures.

**Keywords.** Forest site, soil profile, soil texture, water-holding capacity, class pedotransfer function, tool development, large-scale mapping, indicator plant.

## 1. INTRODUCTION

En regard des perturbations climatiques annoncées, il faut s'attendre à ce que les peuplements forestiers soient soumis à un nombre croissant d'aléas climatiques qui les affectent et les affaiblissent progressivement (Lindner et al., 2008). La question est alors de savoir comment renforcer leur résilience pour qu'ils puissent faire face à ces bouleversements. Dans cette démarche, l'évaluation de l'adéquation « essence forestière-station » est essentielle. Elle doit s'appuyer sur une bonne connaissance de l'autécologie des essences et sur des moyens efficaces de caractérisation des stations forestières (Claessens et al., 2002). Dans ce contexte, de nombreuses études stationnelles et autécologiques se sont focalisées sur l'estimation de la disponibilité en eau pour les végétaux, considérée comme un facteur clé de l'impact des changements climatiques sur la forêt (Legay et al., 2005). La complexité de l'évaluation du facteur hydrique, dépendant de nombreux paramètres (climat, géomorphologie, sol, végétation), a conduit à la réalisation de bilans hydriques (Granier et al., 1999) ou, plus complexe encore, de bilans hydrologiques (Schwärzel et al., 2009) qui trouvent de multiples applications pointues en foresterie. Ils peuvent participer à l'explication des phénomènes de dépérissement forestier (Bréda et al., 1999) et à la définition de l'aptitude des stations à la sylviculture de différentes essences par une évaluation du risque hydrique qui leur est associé (Bœuf et al., 2009 ; Grigoryan et al., 2010). Cette approche peut soutenir la construction de catalogues des stations (Franc, 1989) et de modèles cartographiques de description des stations forestières (Iverson et al., 1997 ; Claessens et al., 2002). Les études autécologiques cherchant à mettre en relation la distribution ou la croissance des différentes essences avec leur milieu incluent généralement la réserve en eau au pool de descripteurs abiotiques utilisés (Claessens et al., 1999 ; Seynave et al., 2005 ; Nigh, 2006). En particulier, les modèles « dendroécologiques », qui tentent d'expliquer la largeur de cerne des arbres, très sensible aux variations mensuelles de l'humidité du sol, nécessitent une estimation fine du bilan hydrique et hydrologique de la station (Sohier et al., 2010). La réserve en eau peut également s'inscrire dans une optique sylvicole pour la définition du compromis « densité du couvert – ressources en eau ». Cet équilibre s'avère nécessaire pour une gestion réfléchie des éclaircies permettant de prémunir les arbres d'une concurrence trop importante pour les ressources en eau (Bréda et al., 1995 ; Misson et al., 2003).

D'autre part, dans le contexte plus pragmatique de la mise à disposition d'outils d'aide à la décision en gestion forestière, Weissen et al. (1994) ont développé, au sein du Guide de Boisement, un outil

de diagnostic des stations forestières de Wallonie à l'usage des sylviculteurs de terrain. Il s'agit de clés de détermination du niveau trophique des sols et de la disponibilité en eau des stations. Ces clés font appel à des paramètres de détermination aisée, demandant des observations sommaires au départ d'un sondage pédologique et d'une interprétation géomorphologique de la station. Par construction, une bonne part de ces paramètres peut être extraite de la Carte des Sols de la Belgique dans un but évident de simplification des besoins d'expertise des utilisateurs. Désormais, la carte des sols ayant été numérisée et les modèles numériques de terrain étant de plus en plus précis, il devrait être possible d'envisager de spatialiser les disponibilités en eau des sols à l'échelle de la Wallonie avec un niveau de précision correspondant à la station forestière. Dans ce cadre, cet article s'attache à quantifier la réserve en eau, élément qui participe, avec l'identification des flux d'eau, à l'évaluation de la disponibilité en eau. Il se limite à une méthode pragmatique en liaison directe avec la Carte Numérique des Sols de Wallonie, avec pour objectif de fournir un outil simple de diagnostic à l'usage des gestionnaires forestiers et, d'autre part, de produire une carte de la réserve en eau du sol à l'échelle de la station pour tout le territoire de la Wallonie.

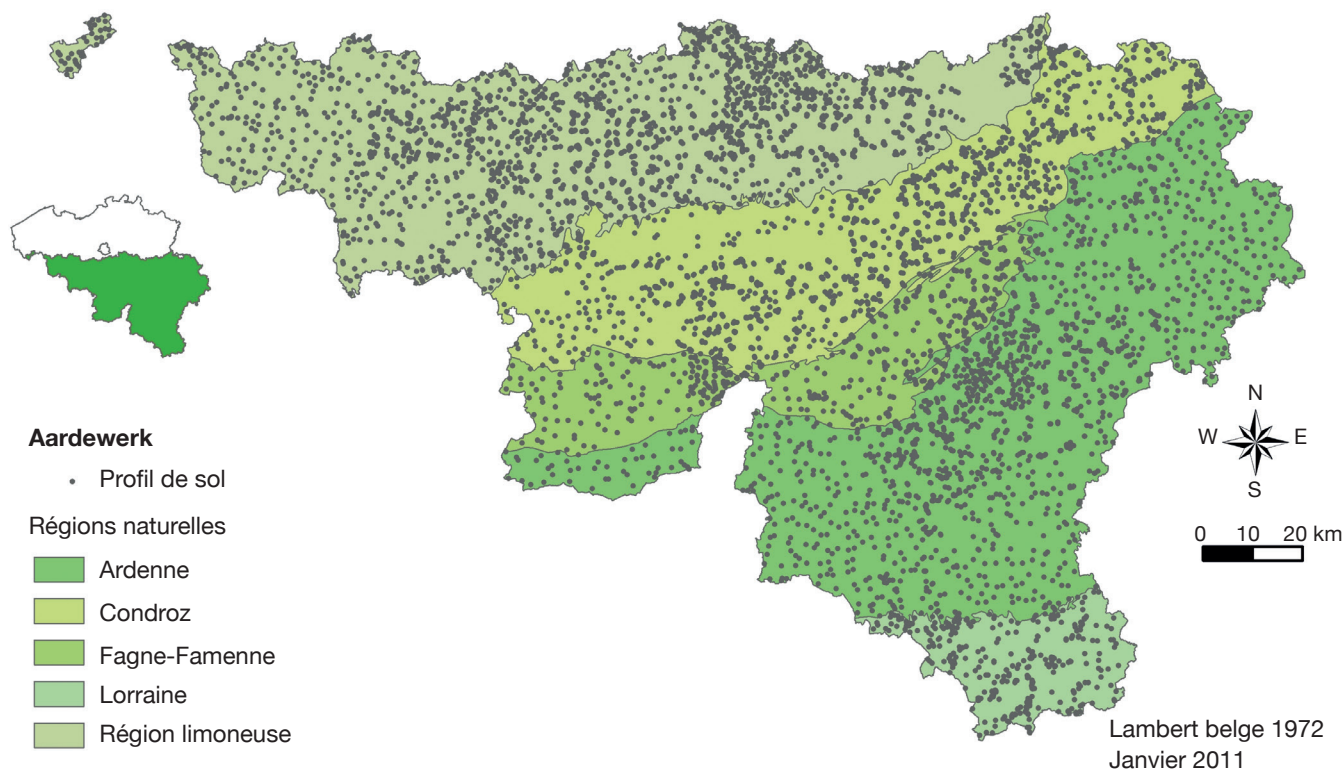
## 2. CADRE DE L'ÉTUDE

L'échelle de l'étude concerne l'entièreté de la surface forestière de la Wallonie (partie sud de la Belgique, **figure 1**), soit près de 553 000 hectares de forêts et milieux associés correspondant à 33 % du territoire wallon. Le contexte pédologique wallon, davantage décrit par Avril (1982), est dominé par les Principaux Types de Sols caillouteux (38,5 %) et limoneux (30,7 %), respectivement au Sud et au Nord du sillon Sambre et Meuse (Bah et al., 2007a). Les peuplements forestiers wallons occupent préférentiellement les sols nettement caillouteux (64 % pour une teneur en charge supérieure à 15 %, **tableau 1**).

## 3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 3.1. Données disponibles

Les informations requises par l'étude sont essentiellement d'ordre pédologique et s'appuient sur deux sources de données principales. D'une part, la base de données *Aardewerk*, qui compile l'ensemble des descripteurs et des résultats d'analyses en laboratoire des profils de sol ayant servi à l'édification et à la caractérisation de la Carte des Sols de la Belgique (Legrain, 2005). D'autre part, la base de données géographiques contenant la Carte Numérique des



**Figure 1.** Distribution spatiale des profils de sol Aardewerk en surimposition des régions naturelles de Wallonie — *Spatial distribution of Aardewerk soil profiles superimposed on the ecoregions of Southern Belgium.*

**Tableau 1.** Principaux types de sols forestiers en Wallonie — *Major forest soil types in Southern Belgium.*

Description	Wallonie		Forêts productives	
	10 <sup>3</sup> ha	%	10 <sup>3</sup> ha	%
Sols tourbeux ou tourbières	6	0,4	2	0,5
Sols sableux ou limono-sableux	35	2,1	20	4,1
Sols sablo-limoneux	68	4,0	11	2,3
Sols limoneux	519	30,7	45	9,3
Sols argileux	49	2,9	13	2,7
Sols limoneux peu caillouteux	134	7,9	59	12,2
Sols limono-caillouteux	650	38,5	309	64,2
Regroupement de complexes de sols et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux	52	3,1	14	2,9
Sols artificiels ou non cartographiés	177	10,5	9	1,8
<b>Total</b>	<b>1 690</b>	<b>100,0</b>	<b>481</b>	<b>100,0</b>

Sols de Wallonie (CNSW, 1/20000), qui constitue la couche pédologique de référence. Les relevés phytosociologiques de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie (IPRFW) ont été

utilisés pour valider l'approche en calculant le niveau hydrique stationnel bioindiqué par la flore et en le confrontant avec la réserve en eau des sols.

### 3.2. Définition de la réserve en eau

La capacité de stockage en eau du sol est le reflet de l'eau contenue dans la microporosité de celui-ci. Elle se décline généralement en deux types d'eau : les eaux capillaires absorbable et non absorbable par le système racinaire des végétaux (Baize et al., 1995). L'eau absorbable est communément appelée « réserve en eau utile ou réserve utile » du sol et est définie comme la quantité d'eau retenue par un certain volume de sol entre ses valeurs d'humidités caractéristiques limites

correspondant à ses états de « capacité au champ ( $pF \approx 2,5$ ) » et de « point de flétrissement ( $pF \approx 4,2$ ) » (Baize, 2000). Pour faciliter son intégration dans l'estimation d'un bilan hydrique, la réserve utile est exprimée en

millimètres, tout comme les précipitations et les évapotranspirations. Elle doit dès lors être perçue comme une lame d'eau pour une épaisseur de sol donnée et son calcul suit généralement la formulation présentée aux équations 1 et 2 (Baize, 2000 ; Quentin et al., 2001) :

$$RU_{\text{sol}} = \sum_{i=1}^n RU_{\text{horizon}_i} \quad (1)$$

$$RU_{\text{horizon}} = (Hcc - Hpf) * Da * Ep * (1 - Tc) \quad (2)$$

où  $RU$  est la réserve utile (mm),  $Hcc$  et  $Hpf$  les humidités pondérales à la capacité au champ et au point de flétrissement ( $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ),  $Ep$  l'épaisseur de l'horizon considéré (dm),  $Da$  la densité apparente ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) et  $Tc$  le taux de charge en éléments grossiers (%).

L'échelle d'observation est soit celle du profil complet, soit celle des différents horizons diagnostics du profil considérés individuellement.

Précisons que dans le cadre de cette étude, la notion de réserve utile perd quelque peu de son sens. En effet, elle suppose la connaissance de la profondeur maximale de prospection racinaire et donc des freins et obstacles au développement des racines généralement propres à chaque essence (Drénou, 2006). L'étude ne s'intéressant pas à une essence en particulier, il en a été fait abstraction et la profondeur maximale du profil de sol a été considérée comme seuil maximal de développement racinaire. Les expressions de « réserve en eau » et de « capacité de rétention en eau » seront donc préférées à celui de réserve utile.

### 3.3. Outils d'évaluation de la réserve en eau

L'équation 2 d'évaluation de la réserve en eau peut être décomposée en trois composantes principales :

- l'humidité ( $Hcc$ ,  $Hpf$  et  $Da$ ),
- l'épaisseur ( $Ep$ ),
- l'importance de la charge en éléments grossiers, si elle existe ( $Tc$ ).

L'appréciation du facteur humidité est celui qui nécessite le plus d'investigations et sur lequel se focalise la présente étude.

L'évaluation de la quantité d'eau retenue par le sol passe généralement soit par des mesures réelles directes (sondes à neutrons ou sondes *TDR*) (Robinson et al., 2003), soit par l'utilisation de fonctions de pédotransfert définies comme des outils de prédiction des propriétés hydriques des sols (Al Majou et al., 2007). Ces dernières se déclinant en deux catégories :

- les fonctions de pédotransfert continues qui cherchent à relier, généralement par régression linéaire

multiple, les propriétés hydriques à certaines des caractéristiques du sol déterminées en routine par les laboratoires d'analyse (composition granulométrique, teneur en matière organique, densité apparente, etc.) (Weissen et al., 1970 ; Vereecken et al., 1989) ou issues d'inventaire de terrain (Lexer et al., 1998),

- les classes de fonctions de pédotransfert qui associent les propriétés hydriques à des classes de composition de sols, généralement les classes texturales. En effet, on admet généralement que c'est la texture du sol qui conditionne principalement les valeurs d'humidités caractéristiques (Duchaufour, 1991). L'évaluation de  $RU$  prend alors le nom de « méthodes des textures » (Baize, 2000) et sa formulation se résume à celle présentée par l'équation 3.

$$RU_{\text{sol ou horizon}} = RUM * Ep * (1 - Tc) \quad (3)$$

où  $RUM$  est le Réservoir Utilisable Maximal d'une classe texturale donnée, soit la quantité maximale d'eau pouvant être retenue par la terre fine du sol exprimée en millimètres d'eau par centimètre de terre fine.

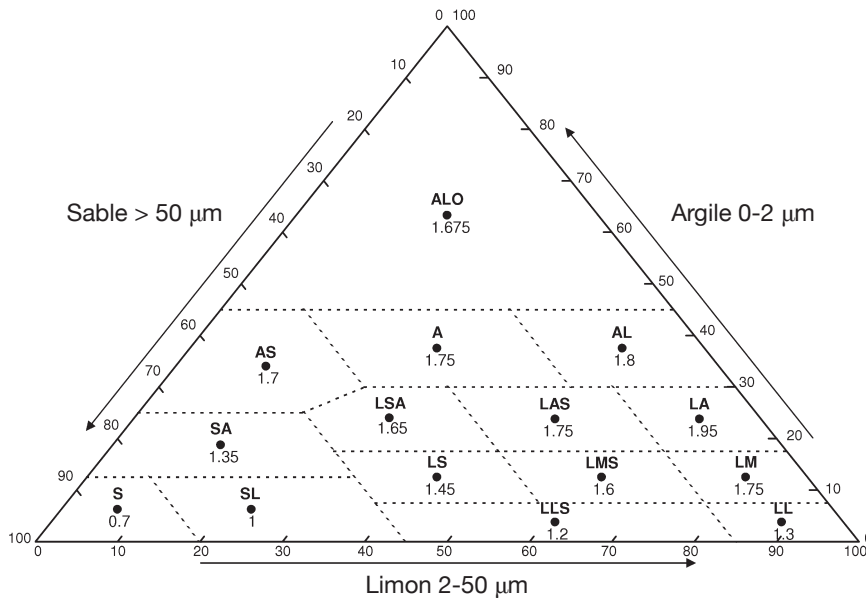
La qualité des prédictions par utilisation des classes de fonctions de pédotransfert est similaire à celle obtenue avec des fonctions de pédotransfert continues (Al Majou et al., 2007). De plus, selon les mêmes auteurs : « En dépit de leur possible imprécision, les classes de fonctions de pédotransfert restent des outils faciles à utiliser car elles exigent peu d'informations sur le sol. Elles sont par conséquent bien adaptées à prédire les propriétés de rétention en eau à l'échelle d'un pays, échelle à laquelle les données disponibles sur les sols sont au mieux des caractéristiques moyennes ou des appartenances à des classes de composition ». En regard des données disponibles à l'échelle wallonne et dans l'optique de se cantonner à des développements accessibles aux gestionnaires forestiers, il a été choisi d'utiliser les classes de fonctions de pédotransfert.

À l'heure actuelle, il n'a été recensé aucune classe de fonctions de pédotransfert propre à la Wallonie et les trois sources identifiées sont toutes d'origine étrangère :

- les tableaux publiés par Jamagne et al. (1977) pour le département de l'Aisne en France (**Figure 2**), repris par Baize (2000), et les travaux de Hall et al. (1977) en Angleterre,
- la base de données *SolHydro 1.0* de l'INRA d'Orléans (Bruand et al., 2004) sur des sols principalement issus du bassin de Paris et secondairement des marais de l'Ouest et du Piémont pyrénéen,
- la base de données européenne *Hypres* (Wösten et al., 1999).

Plusieurs raisons ont motivé l'utilisation des données de Jamagne et al. (1977), bien que non sans reproches pour toute une série de raisons évoquées dans la discussion. Il est tout d'abord préférable de choisir une base de données dont la gamme de variation de sols est relativement étroite et proche de la zone

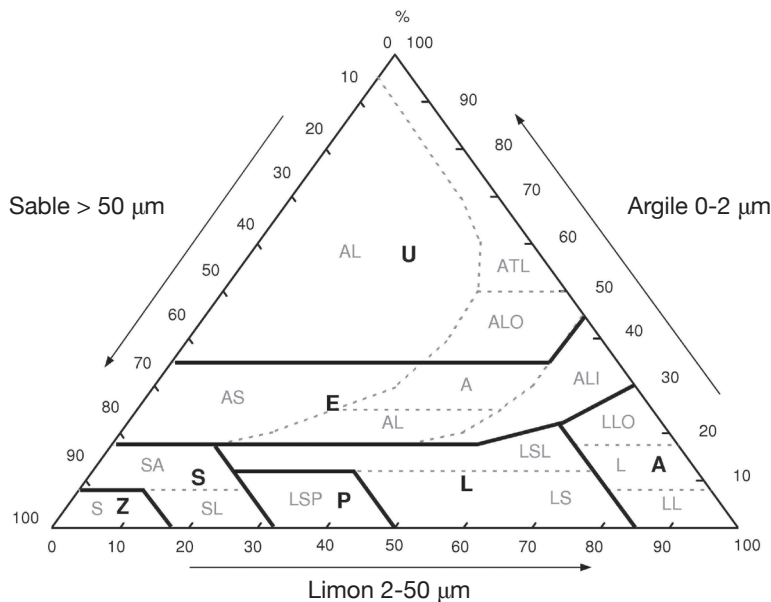
d'étude au risque de voir chuter les performances des prédictions (Trouche et al., 1999). Bien que les classes de fonctions de pédotransfert de Jamagne et al. (1977) fassent abstraction de la structure du sol en considérant la densité apparente comme constante pour chacune des classes texturales, la qualité des prédictions n'est que sensiblement améliorée par la considération de celle-ci (Al Majou et al., 2007). De plus, elle n'est pas de détermination aisée sur le terrain et est indisponible dans la CNSW et la base de données *Aardewerk*. Bien que potentiellement très intéressante, la base de données *Solhydro 1.0* et la table de la station de Rothamsted sont encore incomplètes pour certaines classes texturales assez bien représentées en Wallonie. En plus de ces critères, la table de Jamagne et al. (1977) a le mérite d'être d'une facilité d'utilisation indéniable.



**Figure 2.** Triangle textural de la carte des sols du département de l'Aisne (France) et réservoirs utilisables maximaux associés (mm d'eau·cm<sup>-1</sup> de sol) (d'après Jamagne et al., 1977 ; Baize, 2000) — *Textural triangle of the soil map of the Aisne Department (France) and the associated maximum usable reservoirs (mm of water·cm<sup>-1</sup> of soil) (according to Jamagne et al., 1977; Baize, 2000).*

### 3.4. Transposition de la méthode des textures au contexte pédologique wallon

La principale contrainte pour la transposition de la « méthode des textures » au contexte des sols wallons réside dans l'attribution des réservoirs utilisables maximaux pour les différentes classes texturales belges (Figure 3). L'application du triangle textural de la carte des sols de l'Aisne dans le système belge de classification des textures de sol ne peut se faire directement par superposition. En effet, les délimitations et le nombre de classes texturales définies par chacun des deux systèmes ne sont pas identiques, ceux-ci ayant été conçus dans des contextes pédologiques qui leur sont propres (Richer de Forges et al., 2008). L'information requise pour établir le lien entre les deux triangles est la connaissance de la composition granulométrique (argile, limon et sable) des différents types de sols wallons. La base de données *Aardewerk* renferme cette information, en plus de l'épaisseur et du taux de charge, pour chacun



**Figure 3.** Classes (trait gras) et sous-classes du triangle textural de la Carte des Sols de la Belgique — *Classes (thick line) and subclasses of the textural triangle of the Soil Map of Belgium (Bah et al., 2007b).*

des horizons de sols des profils pédologiques qu'elle contient. Une importante étape de préparation de la base de données *Aardewerk* a donc été opérée et a finalement permis d'extraire 6221 profils de sol pour le territoire wallon (**Figure 1**). La profondeur de description des profils de sol est généralement limitée à 1,5 m suivant la profondeur du sol prospecté, exception faite de certains sondages plus profonds sur les épais placages limoneux hennuyers. Cette limite de description s'ajuste aux observations de Drénou (2006) qui place la concentration des activités racinaires de prélèvements en eau dans le premier mètre du sol, les racines charpentières profondes n'initiant que peu de racines fines spécialisées dans le prélèvement de l'eau.

Une fois les profils de sol prêts à l'emploi, la composition granulométrique moyenne de chacun d'eux a été évaluée comme la moyenne de la composition granulométrique des différents horizons diagnostics pondérée par leur épaisseur respective (équation 4). Ensuite, une valeur de réservoir utilisable maximal a été dérivée par interpolation linéaire pondérée par l'inverse de la distance, élevée au carré, entre la position du profil dans le triangle et chacun des différents centres des classes texturales du triangle de Jamagne (équation 5). La valeur de réservoir utilisable maximal d'une classe texturale belge est finalement la moyenne des réservoirs utilisables maximaux de tous les profils de sol dont le symbole de la texture dans le sigle pédologique fait référence à cette classe de texture (équation 6).

$$ALS_{\text{profil}} = \frac{\sum_{i=1}^n ALS_i * Ep_i}{\sum_{i=1}^n Ep_i} \quad (4)$$

$$RUM_{\text{profil}} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{RUM_i * (1/d_i^2)}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^2} \right\} \quad (5)$$

$$RUM_{\text{classe texturale}} = \frac{\sum_{j=1}^N RUM_{\text{profil } j}}{N} \quad (6)$$

où  $RUM_i$  est le réservoir utilisable maximal de la  $i^{\text{ème}}$  classe texturale selon le triangle de Jamagne,  $d_i$  est la distance entre le centre de la  $i^{\text{ème}}$  classe texturale selon le triangle de Jamagne et la position du profil dans le triangle suivant sa composition granulométrique moyenne,  $n$  le nombre d'horizon d'un profil de sol donné et  $N$  le nombre total de profils de sol appartenant à une classe texturale donnée.

Afin de mieux couvrir la variabilité granulométrique des profils pédologiques *Aardewerk*, d'autres critères de stratification territoriale de détermination aisée pour les gestionnaires forestiers ont été envisagés. Il s'agissait principalement des cartes des régions naturelles (Noirfalise, 1988) et des territoires écologiques (Delvaux et al., 1962). Les cinq grandes régions naturelles de Wallonie (**Figure 1**) ont été préférées aux territoires écologiques car ceux-ci, relativement nombreux (27), risquaient d'être représentés par un effectif trop faible de profils pédologiques. L'intérêt est donc, par exemple, de pouvoir distinguer les limons de Lorraine et ceux de la région limoneuse ou les argiles du Condroz et celles de Fagne-Famenne. Une vérification préalable de la représentativité de chacune des régions naturelles en termes d'un rapport surface/nombre de profils de sol a été opérée préalablement aux traitements. La classe texturale « G », spécifique aux sols limono-caillouteux renfermant une gamme de sols de granulométrie diverse, a été traitée séparément des autres classes texturales. En effet, le critère de stratification territoriale ne suffit *a priori* pas à couvrir à lui seul la variabilité granulométrique importante observée pour ces sols, contrairement à celle des autres classes texturales. Or, l'importance de la représentation des sols caillouteux en milieu forestier induit dès lors la nécessité d'une caractérisation plus fine de leur composition. Les critères complémentaires choisis pour nuancer les valeurs de réservoir utilisable maximal attribuées à ces sols étaient liés à la charge en éléments caillouteux. Il s'agissait de son importance (5-15 % ou > 15 %, exprimée dans le sigle pédologique par la mise entre parenthèses ou non du symbole renseignant la nature lithologique de la charge caillouteuse) et de sa nature lithologique (regroupée en huit classes selon la typologie développée pour la détermination des Principaux Types de Sols de Wallonie). En effet, la décomposition d'un grès ou d'un calcaire conduit à une composition granulométrique variable de la terre fine. Le but final était de fournir une table de valeurs moyennes de réservoir utilisable maximal pour les différentes modalités envisagées, valeurs exploitables directement dans la formule de la « méthode des textures ».

### 3.5. Spatialisation régionale de la réserve en eau

La spatialisation a été effectuée à l'aide du logiciel ArcGIS© 9.2 d'ESRI© à partir des profils de sol *Aardewerk* et de la carte des Principaux Types de Sols de Wallonie. La base de données *Aardewerk* a servi au calcul de la réserve en eau de chacun des profils pédologiques selon les formules présentées en équation 1, soit en calculant la réserve en eau de chacun des horizons de sols du profil puis en sommant celle-ci pour obtenir la réserve en eau du profil complet. Les Principaux Types de Sols sont issus d'un regroupement

de sols établi selon trois critères majeurs (Bah et al., 2007a) : la texture, le drainage naturel et la nature de la charge caillouteuse si celle-ci est supérieure à 15 % (sols limono-caillouteux). La phase de profondeur a été ajoutée à cette typologie car la profondeur du sol intervient directement dans l'évaluation de la réserve en eau (équation 2). La réserve en eau de chacun des Principaux Types de Sols est définie comme la moyenne de la réserve en eau des profils de sol appartenant à un même Principal Type de Sol, le sigle pédologique des profils *Aardewerk* servant de point de liaison avec la typologie de ces Principaux Types de Sols. Certains cas particuliers ont été traités séparément tels que les sols tourbeux, les complexes de fortes pentes et sols à gros blocs caillouteux. En dépit de l'intérêt que représentent les méthodes d'inférence spatiale (*krigeage*) pour la phase de spatialisation, la méconnaissance de la qualité du positionnement cartographique des profils de sol, l'importante variabilité spatiale des plages de sols et l'existence de la CNSW ont favorisé l'application de la méthode proposée.

### 3.6. Validation par le bioindicateur floristique

Les espèces végétales herbacées, par leur caractère bioindicateur, montrent un intérêt éprouvé dans l'évaluation du niveau hydrique stationnel. Les phytosociologues considèrent les espèces individuellement (Ellenberg et al., 1992) ou les rassemblent selon la similarité de leurs exigences en « groupes socio-écologiques » (Duvigneaud, 1974) ou en « *phytometers* » (Spuur et al., 1980) et les hiérarchisent sur une échelle de valeur selon le caractère indicateur qui leur est associé. En Wallonie, les groupes d'espèces indicatrices définies par Noirfalise (1984) et Dulière et al. (1995) font office de référence, mais l'approche de Rameau et al. (1989), à travers l'écogramme de la Flore Forestière Française, est également utilisée.

L'évaluation du niveau hydrique stationnel se calcule comme la moyenne du niveau hydrique de chaque espèce végétale du relevé floristique associé à cette station, avec ou sans prise en compte de la fidélité du caractère indicateur de l'espèce lié à son amplitude écologique et de son abondance sur la station (Bartoli et al., 2000). Seules les espèces végétales des strates herbacées et arbustives ont été considérées dans le calcul et seuls les relevés présentant au moins six espèces indicatrices ont été conservés pour la mise en relation avec la capacité de rétention en eau. Cette dernière est issue d'un croisement cartographique entre la carte de réserve en eau spatialisée au terme de l'étape précédente et les relevés phytosociologiques retenus, précisément localisés par l'IPRFW. Après épuration des relevés hivernaux et sans correspondance cartographique, le nombre de relevés conservés s'élevait finalement à 702.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1. Méthode des textures

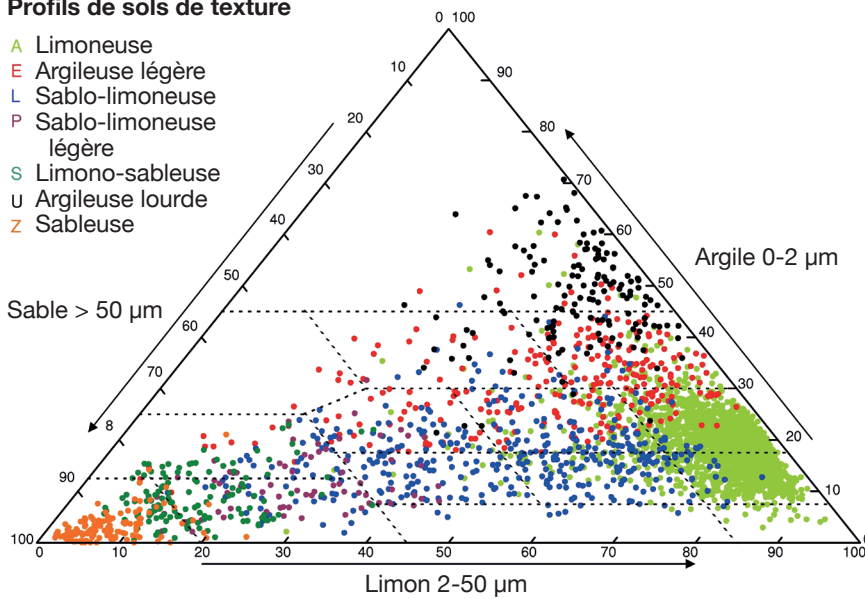
Les différents profils de sol utilisés, exception faite des sols limono-caillouteux, sont représentés par leur composition granulométrique moyenne dans le triangle textural de l'Aisne à la **figure 4**. On y observe que, par rapport au contexte pédologique de l'Aisne, les sols wallons recensent assez peu d'argile très lourde (ATL), d'argile légère sableuse (ALS) et d'argile sableuse (AS) dans le triangle textural de Jamagne (cfr **Figure 2**). La distribution des différentes classes texturales dans le triangle montre une assez bonne distinction de celles-ci. Cependant, un certain nombre de profils reflètent des erreurs d'attribution de symbole textural (évalué sur les 50 premiers centimètres de sol) par rapport à la composition granulométrique moyenne que révèle l'analyse en laboratoire. Aucune correction n'a toutefois été opérée. La **figure 5** présente le positionnement des centroïdes des différentes classes texturales belges en surimposition du triangle textural de Jamagne avec prise en compte de la stratification par régions naturelles. Chaque centroïde représente le point moyen du nuage de profils appartenant à la même modalité de regroupement. Le cas de la texture limono-caillouteuse « G » est traité séparément du fait de la particularité de cette texture de sol. L'intérêt de distinguer les régions naturelles se marque principalement pour les limons de Lorraine et d'Ardenne (A1 et A2), les argiles légères de Fagne-Famenne (E3) et les limons sableux de Lorraine (L1). Les autres centroïdes restent, quant à eux, assez proches les uns des autres, basculant toutefois à quelques reprises dans une autre classe texturale. Le **tableau 2** reprend les valeurs moyennes et les écarts-types des réservoirs utilisables maximaux pour l'ensemble de ces centroïdes. La **figure 6** illustre la nécessité de ventiler les sols limono-caillouteux selon l'importance de la charge en éléments caillouteux et les différentes régions naturelles dans lesquelles ces sols sont retrouvés (pour exemple, les sols à charge schisto-phylladeuse). La **figure 7** présente, quant à elle, les résultats complets de la décomposition des sols limono-caillouteux et montre une importante dispersion des centroïdes selon les critères pris en compte. La faible couverture périphérique indique toutefois que les critères de stratification utilisés pourraient être améliorés afin de mieux expliquer cette variabilité.

### 4.2. Spatialisation

La réserve en eau moyenne pour les différents Principaux Types de Sols sans distinction des phases de profondeur est illustrée à la **figure 8**. Les sols tourbeux, les sols limono-caillouteux à charge crayeuse, certains complexes de sols et les sols artificiels ne figurent pas

**Profils de sols de texture**

- A Limoneuse
- E Argileuse légère
- L Sablo-limoneuse
- P Sablo-limoneuse légère
- S Limono-sableuse
- U Argileuse lourde
- Z Sableuse



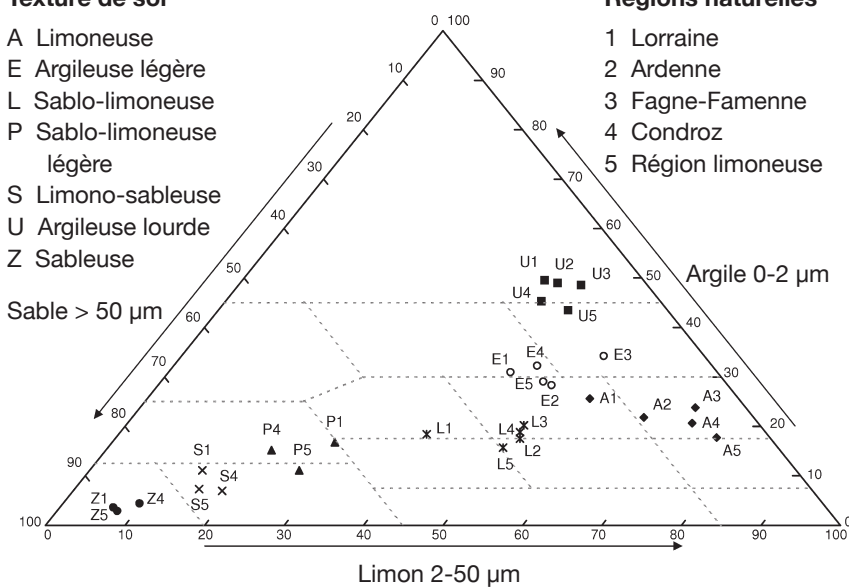
**Figure 4.** Composition granulométrique des profils pédologiques wallons issus de la base de données *Aardewerk* (excepté pour la texture limono-caillouteuse) en surimposition du triangle textural de la carte des sols du département de l’Aisne — *Particle size distribution of Walloon soil profiles from the Aardewerk database (except for the loamy-stony texture) superimposed on the textural triangle of the Soil Map of the Aisne Department.*

**Texture de sol**

- A Limoneuse
- E Argileuse légère
- L Sablo-limoneuse
- P Sablo-limoneuse légère
- S Limono-sableuse
- U Argileuse lourde
- Z Sableuse

**Régions naturelles**

- 1 Lorraine
- 2 Ardenne
- 3 Fagne-Famenne
- 4 Condroz
- 5 Région limoneuse



**Figure 5.** Composition granulométrique des centroïdes des différentes classes texturales belges stratifiées par région naturelle en surimposition du triangle textural de la carte des sols du département de l’Aisne — *Particle size distribution of the centroids of the Belgian textural classes stratified by ecoregion superimposed on the textural triangle of the Soil Map of the Aisne Department.*

sur le graphique en raison soit d’un très faible effectif en profils, soit d’une absence de profils dans la base de données *Aardewerk*. Les sols limoneux se démarquent assez nettement par une réserve en eau élevée, tandis que les sols limono-caillouteux à charge schisteuse, psammitique ou schisto-psammitique et calcaire renferment une réserve en eau près de deux fois plus faible. L’importante variabilité de la réserve en eau, représentée par les écarts-types de l’histogramme, a pour cause l’absence de prise en compte de la phase de profondeur. La **figure 9** illustre un exemple de décomposition des sols limono-caillouteux à charge

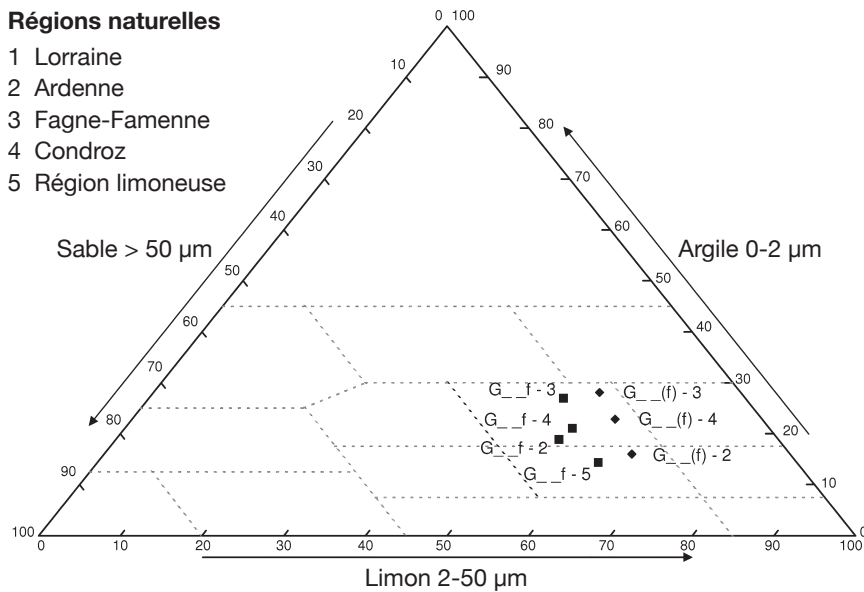
schisto-phylladeuse en ses différentes phases de profondeurs et montre l’intérêt de cette distinction.

Les résultats de la spatialisation de la réserve en eau des Principaux Types de Sols dépeignent bien les grandes tendances régionales (**Figure 10**) parmi lesquelles se retrouvent les riches et épais dépôts des plaines limoneuses, les tiges et chavées du relief condruzien, les versants escarpés des vallées et les plateaux limoneux ardennais, ainsi que les sables lorrains. On y retrouve aussi une relation très nette entre la réserve en eau et les Districts de l’Espace Rural (**Figure 10**), en correspondance claire avec



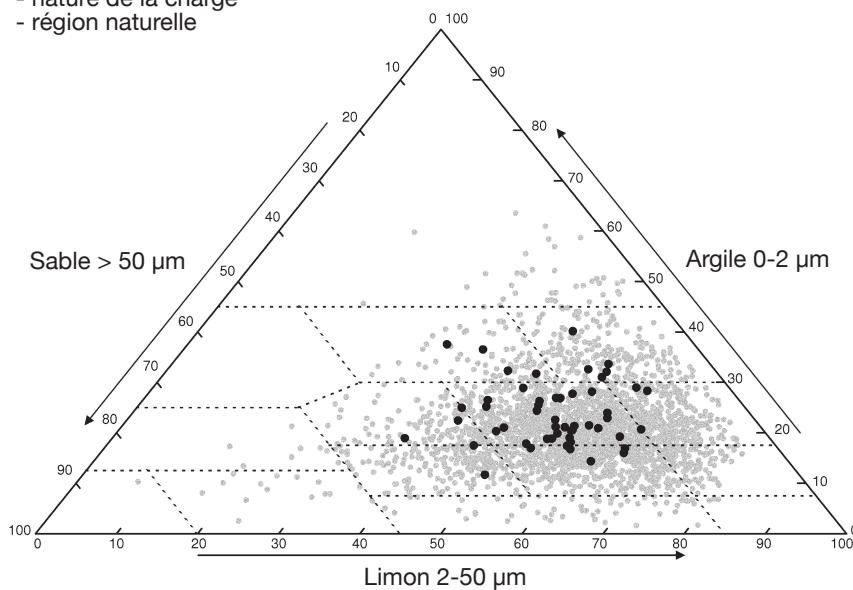
**Régions naturelles**

- 1 Lorraine
- 2 Ardenne
- 3 Fagne-Famenne
- 4 Condroz
- 5 Région limoneuse



**Figure 6.** Composition granulométrique des centroïdes des sols limono-caillouteux à charge schisteuse ventilés selon l'importance de la charge en éléments caillouteux ( $G_{-}(f) : < 15\%$ ;  $G_{-}f : > 15\%$ ) et les différentes régions naturelles en surimposition du triangle textural de la carte des sols du département de l'Aisne — *Particle size distribution of the centroids of the shale loamystony soils according to the fragment volume ( $G_{-}(f) : < 15\%$ ;  $G_{-}f : > 15\%$ ) and the ecoregions superimposed on the textural triangle of the Soil Map of the Aisne Department.*

- Granulométrie des profils de sol de texture limono-caillouteuse  $G_{-}(*)$  ou  $G_{-}*$
- Granulométrie moyenne du regroupement :
  - importance de la charge  $< 15\%$  ou  $> 15\%$
  - nature de la charge
  - région naturelle



**Figure 7.** Composition granulométrique des centroïdes des grands types de sols limono-caillouteux en surimposition des profils pédologiques des sols limono-caillouteux de la base de données Aardewerk positionné dans le triangle textural de la carte des sols du département de l'Aisne — *Particle size distribution of the centroids of the major loamy-stony soils types superimposed on the stony loamy soil profiles of the Aardewerk database positioned in the textural triangle of the Soil Map of the Aisne Department.*

les territoires écologiques de référence du Guide de Boisement (Weissen et al., 1994).

**4.3. Validation**

La relation entre la réserve en eau et le niveau hydrique bioindiqué calculé sans pondération montre une relation très hautement significative ( $p = 0,000$ ), mais trop faible ( $R^2 = 20\%$ ) pour expliquer à elle seule les différences de niveaux hydriques observées (Figure 11). En effet, c'est en association avec d'autres paramètres,

notamment de configuration topographique, que la réserve en eau détermine la disponibilité en eau de la station dont la flore est le reflet.

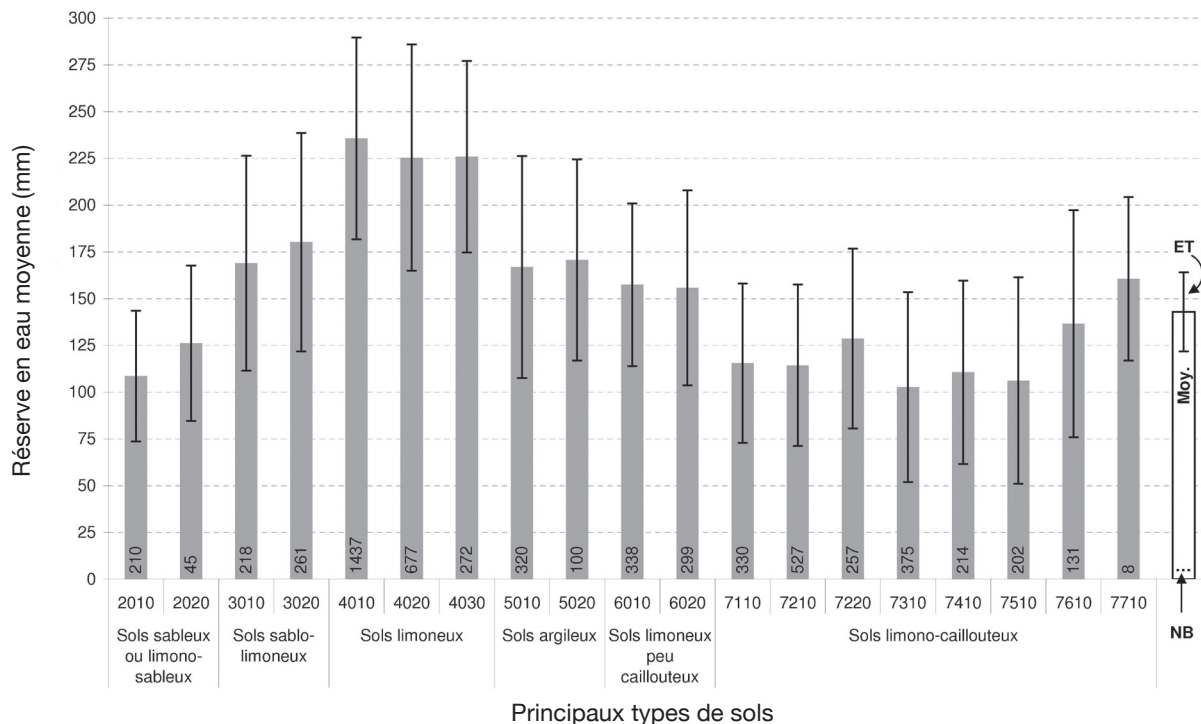
**5. DISCUSSION**

La méthode proposée présente un certain nombre de limites inhérentes à son contexte d'origine. En effet, les sols considérés par Jamagne et al. (1977) sont des sols agricoles du département de l'Aisne et, bien que

**Tableau 2.** Réservoir Utilisable Maximal (RUM) pour chacun des grands types de texture de la CNSW stratifiée selon les régions naturelles de Wallonie et calculé à partir de la composition granulométrique moyenne des profils de sol *Aardewerk* — *Maximum usable reservoir (RUM) for the major texture types of the DSMW stratified by the Walloon ecoregions and assessed from the mean particle size distribution of the Aardewerk soil profiles.*

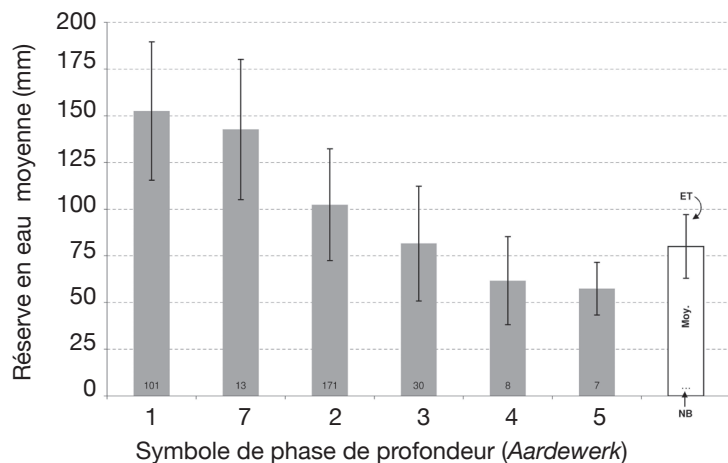
Texture & région naturelle	Nombre de profils		Argile (%)		Limon (%)		Sable (%)		RUM (mm·cm <sup>-1</sup> )	
			Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
A1	14		26	12	56	13	19	15	1,71	0,14
A2	40		22	8	64	13	14	8	1,77	0,13
A3	102		24	6	70	13	6	5	1,80	0,07
A4	673		21	5	71	13	8	6	1,78	0,08
A5	1557	2386	18	5	76	13	7	5	1,75	0,09
E1	88		31	8	43	13	26	16	1,68	0,11
E2	23		28	7	50	13	22	10	1,70	0,07
E3	50		34	6	53	13	13	8	1,75	0,05
E4	42		32	11	46	13	22	17	1,69	0,12
E5	71	274	29	7	48	13	23	19	1,69	0,16
L1	54		18	6	39	13	43	16	1,52	0,16
L2	20		18	10	51	13	32	13	1,58	0,14
L3	4		20	12	50	13	30	19	1,54	0,24
L4	66		19	7	50	13	31	15	1,60	0,12
L5	262	406	16	7	50	13	35	16	1,55	0,16
P1	6		17	4	28	13	55	7	1,44	0,12
P4	2		15	2	21	13	64	8	1,34	0,10
P5	65	73	11	6	26	13	63	11	1,29	0,20
S1	52		11	5	14	13	75	9	1,09	0,22
S4	7		7	5	19	13	74	7	1,08	0,11
S5	74	133	7	5	16	13	77	7	1,03	0,16
U1	31		50	10	38	13	12	10	1,70	0,04
U2	5		49	13	40	13	11	10	1,68	0,02
U3	66		49	7	43	13	8	6	1,71	0,04
U4	21		45	10	40	13	15	7	1,70	0,04
U5	23	146	43	13	44	13	13	12	1,70	0,06
Z1	47		4	2	7	13	90	4	0,81	0,08
Z4	4		4	4	10	13	86	8	0,95	0,14
Z5	71	122	3	3	8	13	90	6	0,86	0,11

Textures (A, E, L, P, S, U, Z) : voir légende de la **figure 5** — *see legend of the figure 5* ; Région naturelle : voir légende de la **figure 5** — *natural area: see legend of the figure 5* ; ET : écart-type — *standard deviation* ; Moy. : moyenne — *mean*.



**Figure 8.** Capacité de rétention moyenne en eau des principaux types de sols de Wallonie — *Water retention capacity of the major soil types of the Wallonia.*

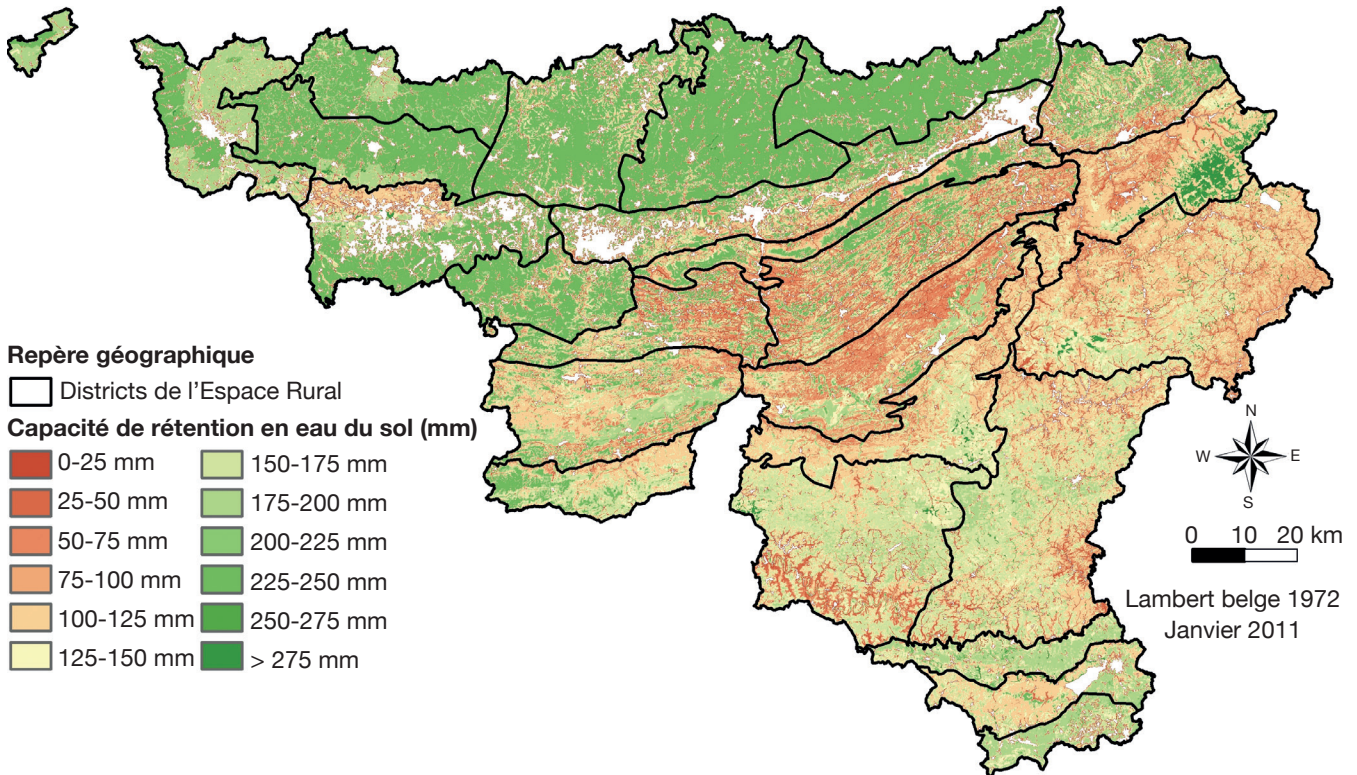
NB : nombre de profils — *profile number* ; Moy. : moyenne — *mean* ; ET : écart-type — *standard deviation.*



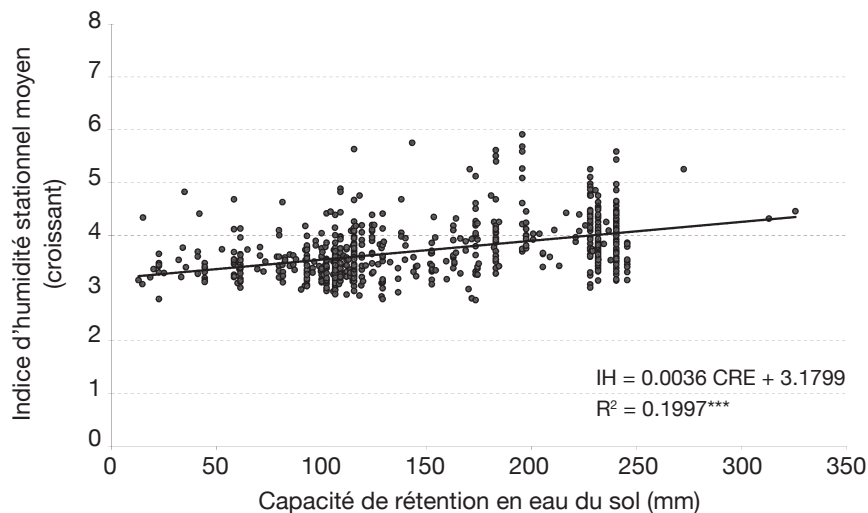
**Figure 9.** Capacité de rétention en eau moyenne pour les différentes phases de profondeur des sols limono-caillouteux à charge schistophylladeuse — *Mean water-holding capacity for the different soil depths of the slate loamy-stony soil.*

1 : > 80 cm ; 2 : 40-80 cm ; 3 : 40-80 cm avec > 50 % d'éléments grossiers — *with > 50% of stoniness* ; 4 : 20-40 cm ; 5 : 20-40 cm avec > 50 % d'éléments grossiers — *with > 50% of stoniness* ; 7 : 40-80 cm sur substrat altéré — *on altered substrate* ; NB : nombre de profils — *profile number* ; Moy. : moyenne — *mean* ; ET : écart-type — *standard deviation.*

cette région soit frontalière avec la Wallonie, la transposition des résultats établis pour un contexte pédologique donné à une région étrangère est susceptible d'engendrer un biais (Al Majou et al., 2007). Les échantillons de sols remaniés utilisés par Jamagne et al. (1977) sont considérés comme peu adaptés pour des mesures liées à la teneur en eau du fait de l'absence de prise en compte de la structure du sol (Bruand et al., 1996), ce qui peut conduire à une surestimation de la réserve en eau (Trouche et al., 1999). La table des données de Jamagne et al. (1977) considère la densité du sol comme constante par classe texturale, mais il est reconnu qu'elle évolue avec la profondeur du sol et que son influence sur les propriétés hydriques du sol n'est pas négligeable (Quentin et al., 2001). De plus, le potentiel hydrique lié à l'humidité caractéristique à la capacité au champ devrait être adapté en fonction de la texture moyenne du sol ou de l'horizon considéré lors de l'utilisation d'échantillons remaniés : pF 2 pour les sables, pF 2,5 pour les limons et pF 3 pour les argiles (Bruand et al., 1996). Dans une optique de gestion forestière, le potentiel hydrique que les arbres sont capables de subir sont bien plus élevés que celui des



**Figure 10.** Distribution spatiale de la capacité de rétention en eau des Principaux Types de Sols de Wallonie — *Spatial distribution of the mean water-holding capacity of the major Walloon soil types.*



**Figure 11.** Relation entre le niveau hydrique stationnel évalué par le bioindicateur floristique [échelle de Rameau et al. (1989) inversée] et la capacité de rétention en eau issue de la carte — *Relation between the site moisture level evaluated by the floristic bio-indicators [Rameau et al. (1989) inversed scale] and the soil water-holding capacity from the edited map of soil water capacity.*

plantes agricoles pour lesquelles la méthode avait été développée à l'origine (Bréda et al., 2002). Par ailleurs, la charge caillouteuse du sol, jusqu'ici considérée comme inerte, peut parfois recéler une quantité d'eau non négligeable, mais dépendant essentiellement de sa nature lithologique (Coutadeur et al., 2000). Indéniable sous couvert forestier, la richesse en matière organique du sol, bien qu'omise également dans la méthode proposée, peut influencer les propriétés hydriques des horizons de sols dans lesquels elle se concentre (Bigorre et al., 2000).

Cependant, toutes ces sources d'imprécision peuvent être considérées comme marginales en regard de la sensibilité de la méthode des textures à l'estimation de la profondeur utile maximale du sol qui ne peut être évaluée que très approximativement (Curt et al., 1996). En effet, celle-ci est généralement appréhendée de

manière grossière à la tarière et techniquement limitée à 1,25 m de profondeur, alors que la profondeur utile dépend de la capacité d'enracinement des arbres, variable selon les essences et les milieux. Cet écueil ne peut être levé que partiellement par des analyses très lourdes du profil racinaire dans les sols comme dans les modèles plus complexes, tels que le modèle de Granier et al. (1999). Néanmoins, cette démarche exclut la généralisation cartographique qui est un des objectifs de notre approche.

Bien que la méthode des textures souffre d'un grand nombre de limitations, elle reste la méthode de référence employée sur le terrain à l'heure actuelle en France (Bruand et al., 1996 ; Bréda et al., 2002). Cet inventaire des imprécisions n'a pas pour but de décrire cette méthode, mais davantage de mettre en garde les utilisateurs potentiels de ses limites de validité et des précautions devant accompagner sa mise en œuvre, notamment l'interprétation de la carte de rétention en eau du sol qui a été produite. En effet, la carte permet surtout de situer une station dans la gamme de variation de réserve en eau des sols et d'informer l'utilisateur des risques de stress hydrique potentiels. De surcroît, utilisée seule, elle n'a qu'une valeur toute relative par rapport à la disponibilité en eau des stations, comme l'a montré l'étape de validation. Par contre, la réserve en eau devrait montrer toute sa pertinence en association avec l'estimation des flux d'eau (apports et pertes). Néanmoins, à l'échelle de la Wallonie, la bonne correspondance entre la carte de la réserve en eau et les Districts de l'Espace Rural illustre déjà la pertinence de l'information qu'apporte cette carte.

L'utilisation des Principaux Types de Sols comme support cartographique souffre d'une certaine homogénéisation de la réserve en eau du fait de l'absence de prise en compte des contextes pédologiques subrégionaux. Il n'y a par exemple plus de distinction entre les sols limoneux du nord et du sud de la Wallonie car la typologie les rassemble. Les techniques d'inférence spatiale (*krigeage*) constituent dès lors des solutions potentielles en apportant davantage de finesse à la carte produite. En effet, ces techniques cherchent à prédire la valeur d'un point non échantillonné en utilisant généralement une combinaison linéaire de données ponctuelles inscrites dans un voisinage donné autour de ce point (Baillargeon, 2005). C'est cette restriction à un certain voisinage qui permet une meilleure adaptation aux situations locales.

Bien qu'assez faible, la relation entre l'indice floristique d'humidité et la capacité de rétention en eau constitue un premier élément de validation encourageant. Une meilleure discrimination des niveaux hydriques floristiques par utilisation des facteurs de pondération du caractère bioindicateur des espèces conduirait certainement à améliorer cette

relation. L'évaluation de la réserve en eau via les paramètres édaphiques issus de l'inventaire terrain plutôt que par simple croisement cartographique contribuerait certainement aussi à affiner cette relation, notamment par une meilleure appréhension de la profondeur utile locale.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de cette analyse ont permis de dériver une carte de la réserve en eau des sols à partir de la CNSW. Même si une démarche aussi simple et pragmatique ne fournira jamais un résultat aussi précis que des mesures *in situ* ou un modèle hydrique sophistiqué, elle permet néanmoins de fournir une estimation pertinente dont l'échelle stationnelle cadre parfaitement avec les besoins des gestionnaires et de nombreuses études. Une caractérisation fine des matériaux parentaux wallons constituerait toutefois un appui indéniable au développement de la méthode proposée.

Par ailleurs, il est envisageable d'intégrer la capacité de rétention en eau dans des démarches d'évaluation du risque de stress hydrique et de modélisation autécologique, où elle interviendrait au côté d'autres paramètres climatiques, édaphiques et topographiques. En particulier, le calcul de la capacité de réserve en eau à partir de la CNSW ouvre la voie vers la spatialisation automatique du niveau hydrique des stations, en introduisant la réserve en eau dans une procédure de calcul comparable à celle du Guide de Boisement, intégrée à un système d'informations géographiques. D'autres étapes sont à franchir avant de produire des cartes d'adéquation « essence-station » indicatives pour le sylviculteur, mais si de tels outils se concrétisaient, ils seraient assez exceptionnels. En effet, peu de régions peuvent se targuer de disposer d'une carte aussi précise de ses conditions stationnelles, à l'échelle du sylviculteur.

### Remerciements

Les résultats présentés proviennent de recherches menées grâce à l'Accord-Cadre de Recherche et Vulgarisation Forestière 2009-2014 financé par le Département de la Nature et des Forêts (DNF), Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGO3), Service Public de Wallonie (SPW).

### Bibliographie

Al Majou H., Bruand A., Duval O. & Cousin I., 2007. Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Étude Gestion Sols*, **14**(2), 103-116.

- Avril P., 1982. Les sols de Wallonie (2<sup>e</sup> partie). *Parcs Nationaux*, **37**(4), 98-107.
- Bah B. & Veron P., 2007a. *Mise en œuvre de la phase « interprétation » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW). Rapport final d'activités. Convention Région Wallonne (DGA, MRW), sous la direction de Bock L., Lejeune P. & Rondeux J.* Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie) et Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Bah B., Legrain X., Engels P., Colinet G. & Bock L., 2007b. *Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie – version 2. Convention Région Wallonne (DGA, MRW).* Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie), Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Baillargeon S., 2005. *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interprétation spatiale de données de précipitations.* Thèse de doctorat : Université de Laval (Canada).
- Baize D., 2000. *Guide des analyses en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation.* 2<sup>e</sup> éd. Paris : INRA.
- Baize D. & Jabiol B., 1995. *Guide pour la description des sols.* Paris : INRA.
- Bartoli M. et al., 2000. ECOFLORE, un logiciel simple de diagnostic écologique. *Rev. For. Fr.*, **52**(6), 530-547.
- Bigorre F., Tessier D. & Pédro G., 2000. How clay and organic matter contribute to water retention properties. Significance of CEC and surface area of soils. *C.R. Acad. Sci. Paris - Earth Planet. Sci.*, **330**(4), 245-250.
- Bœuf R. & Gautier L., 2009. *Changements climatiques : identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique.* Nancy, France : ONF (ForestClim “Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts” publications), [http://www.forestclim.eu/uploads/media/article\\_boeuf.pdf](http://www.forestclim.eu/uploads/media/article_boeuf.pdf), (10/09/2010).
- Bréda N., Granier A. & Aussenac G., 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.]. *Tree Physiol.*, **15**(5), 295-306.
- Bréda N. & Pieffer M., 1999. *Bilan hydrique et impact de la sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport Scientifique Final, Inter-Régions, Dépérissement forestier en vallée du Rhin.* Nancy, France : Unité d'Écophysologie Forestière (INRA), ONF.
- Bréda N., Lefèvre Y. & Badeau V., 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *Houille Blanche*, **3**, 24-32.
- Bruand A. et al., 1996. Variabilités des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Étude Gestion Sols*, **3**(1), 27-40.
- Bruand A., Duval O. & Cousin I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude Gestion Sols*, **11**(3), 323-334.
- Claessens H., Pauwels D., Thibaut A. & Rondeux J., 1999. Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). *Forestry*, **72**(3), 171-182.
- Claessens H. et al., 2002. Mise au point d'un modèle cartographique pour la description des stations forestières en Ardenne belge. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **6**(4), 209-220.
- Coutadeur C., Cousin I. & Nicoullaud B., 2000. Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. *Étude Gestion Sols*, **7**(3), 191-205.
- Curt T., Dole S. & Marmey G., 1996. Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif Central. *Étude Gestion Sols*, **3**(2), 81-96.
- Delvaux J. & Galoux A., 1962. *Les territoires écologiques du Sud-Est belge. Travaux hors série.* Bruxelles : Université Libre de Bruxelles.
- Drénou C., 2006. *Les racines : la face cachée des arbres.* Paris : Institut pour le Développement Forestier (IDF).
- Duchaufour P., 1991. *Pédologie.* 3<sup>e</sup> éd. Paris : Masson.
- Dulière J.F., Tanghe M. & Malaisse F., 1995. *Répertoire des groupes écologiques du fichier écologique des essences.* Namur, Belgique : DNF, DGRNE, MRW.
- Duvigneaud P., 1974. *La synthèse écologique.* Paris : Doin.
- Ellenberg H. et al., 1992. *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa.* Göttingen, Deutschland : Erich Goltze.
- Franc A., 1989. *Études Forêt n°2 : le Massif Central cristallin. Analyse du milieu - Choix des essences.* Clermont-Ferrand, France : Cemagref.
- Granier A., Bréda N., Biron P. & Vilette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Model.*, **116**(2-3), 269-283.
- Grigoryan G.V. et al., 2010. Impact of climate change on water balance of forest sites in Rhineland-Palatinate, Germany. *Adv. Geosci.*, **27**, 37-43.
- Hall D.G.M., Reeve M.J., Thomasson A.J. & Wright V.F., 1977. *Water retention, porosity and density of field soils.* Technical Monograph No.9. Harpenden, England: Soil Survey of England and Wales.
- Iverson L.R., Dale M.E., Scott C.T. & Prasad A., 1997. A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forests (U.S.A.). *Landscape Ecol.*, **12**(5), 331-348.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C. & Mori A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.*, **324-325**, **627-641**.
- Legay M. & Mortier F., 2005. *La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière, prise en compte dans les documents d'orientation de la gestion*

- forestière. *Synthèse de l'atelier ONF/INRA du 20 octobre 2005*. Les Dossiers Forestiers, 16. Paris : ONF, INRA.
- Legrain X., 2005. *Étude de faisabilité de la phase « révision partielle » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW). Évaluation de la base de données* Aardewerk. *Rapport d'activités. Convention Région Wallonne (DGA, MRW), sous la direction de Bock L., Lejeune P. & Rondeux J.* Gembloux, Belgique : Unité Sol-Écologie-Territoire (Laboratoire de Géopédologie) et Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Lexer M.J. & Hönninger K., 1998. Estimating physical soil parameters for sample plots of large-scale forest inventories. *Forest Ecol. Manage.*, **111**(2-3), 231-247.
- Lindner M. et al., 2008. *Impacts of climate change on European forests and options for adaptation*. AGRI-2007-G4-06. Brussels: General for Agriculture and Rural Development, European Commission Directorate.
- Misson L., Nicault A. & Guiot J., 2003. Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *Forest Ecol. Manage.*, **183**(1-3), 47-60.
- Nigh G.D., 2006. Impact of climate, moisture regime, and nutrient regime on the productivity of Douglas-Fir in coastal British Columbia, Canada. *Clim. Change*, **76**(3-4), 321-337.
- Noirfalise A., 1984. *Forêts et stations forestières en Belgique*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Noirfalise A., 1988. Les régions naturelles de la Belgique. *Géogr. Écol. Environ. Organ. Espace*, **23**(1), 3-26.
- Quentin C. et al., 2001. Étude des sols de la forêt de Hesse (Lorraine). Contribution à l'étude du bilan hydrique. *Étude Gestion Sols*, **8**(4), 215-229.
- Rameau J.-C., Mansion D. & Dumé G., 1989. *Flore forestière française (guide écologique illustré) : plaines et collines (Tome 1)*. Paris : Institut pour le Développement Forestier (IDF).
- Richer de Forges A., Feller C., Jamagne M. & Arrouays D., 2008. Perdus dans les triangles des textures. *Étude Gestion Sols*, **15**(2), 97-111.
- Robinson D.A. et al., 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone J.*, **2**, 444-475.
- Schwärzel K. et al., 2009. A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *For. Ecol. Manage.*, **258**(10), 2163-2174.
- Seynave I. et al., 2005. *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Can. J. Forest Res.*, **35**, 1669-1678.
- Sohier C. et al., 2010. Hydrologic modelling and dendrochronology as tool of site-species adequation assessment in a changing climate context. AMICE Project – Gembloux Agro-Bio Tech – University of Liege. In: Schüler G., Caspari T. & Seeling S., eds. *ForestClim Mid-Term Conference, 21/09/2010, Nancy, France*.
- Spuur S. & Barnes B., 1980. *Forest ecology*. New York, USA: JohnWiley & Sons.
- Trouche G. & Morlon P., 1999. Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R.U.) dans le périmètre de l'O.G.A.F. Environnement de la zone de Migennes (Yonne). *Étude Gestion Sols*, **6**(1), 41-54.
- Vereecken H., Maes J., Feyen J. & Darius P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.*, **148**(6), 389-403.
- Weissen F. & André P., 1970. Recherche d'une expression texturale en relation avec la production de la hêtraie. *Pédologie*, **20**(2), 204-243.
- Weissen F., Bronchart L. & Piret A., 1994. *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie*. Namur, Belgique : DGRNE, MRW.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A. & Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties for European soils. *Geoderma*, **90**(3-4), 169-185.

(52 réf.)

