

L'Azote Potentiellement Lessivable (APL) pour prédire le reliquat azoté au printemps en Wallonie

S. Petit*, M. Vanclooster^a, F. Hupin^b

^a Environmental Sciences, Earth & Life Institute, Université catholique de Louvain, Croix du Sud 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

^b Nitrawal asbl, Chaussée de Namur 47, 5030 Gembloux, Belgique

Résumé

Nous proposons ici un modèle d'estimation du reliquat azoté au printemps dans les parcelles agricoles via la valorisation des analyses d'azote nitrique à l'automne en région limoneuse et sablo-limoneuse. Cet outil permettra d'augmenter la souplesse des logiciels de conseils de fertilisation par bilan azoté. Une base de données a été constituée en rassemblant les couples de reliquats azotés à l'automne (APL pour Azote Potentiellement Lessivable) et au printemps (PAP pour Profil Azoté au Printemps) accompagnés des variables agro-pédoclimatiques susceptibles d'influencer le stock d'azote minéral durant l'interculture. Une série de modèles de régression conduits par des analyses stepwise ont été envisagés pour la sélection des facteurs prépondérants. Une approche d'intelligence artificielle nous a permis d'améliorer nos objectifs de prédictions par la construction d'un réseau de neurones artificiels (RNA) capturant 76 % de la variabilité du PAP. Une analyse de sensibilité des facteurs a été conduite via une méthode adaptée de Morris.

Mots-clés : azote potentiellement lessivable (APL), reliquat azoté au printemps, fertilisation azotée, analyse stepwise, réseau de neurones artificiels, région limoneuse

1. Introduction

En Belgique comme ailleurs, l'impératif d'une gestion optimale du **cycle de l'azote** au sein de l'activité agricole relève d'**enjeux environnementaux et économiques**. Entre 1958 et 2002, les teneurs moyennes en nitrates enregistrées dans les sous-sols de Hesbaye en région limoneuse (Belgique) passent en moyenne de 20 à 40 mg/l (Vandenberghé 2010). Par ailleurs, 55% des apports de nitrate aux eaux souterraines sont attribués à l'activité agricole (Nitrawal 2007). D'autre part, les agriculteurs dépendent des engrais minéraux pour la fumure des cultures et sont ainsi liés aux fluctuations des prix du pétrole sur les marchés économiques mondiaux (Cazeneuve et al. 2010). Cela, avec des répercussions sur les coûts de production.

La "Directive Nitrate" fut implémentée en Région Wallonne en 2002 par le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Les agriculteurs, encadrés par les conseils agri-environnementaux, sont amenés à l'amélioration de leurs pratiques agricoles pour une gestion durable de l'azote. Celle-ci démarre par une réflexion sur l'enchaînement des cultures dans la rotation, l'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) et une **fertilisation raisonnée des cultures**. Les eaux de drainage des terres agricoles ne peuvent pas excéder des teneurs en nitrate dépassant la **norme de potabilité de 50 mg/l** définie par l'OMS.

De même, le monde scientifique est amené à développer une **diversité d'approches de**

modélisations pour d'une part, la compréhension des mécanismes de la dynamique de l'azote, et d'autre part, l'évaluation de l'efficacité des mesures législatives mise en place et des changements de pratiques culturales qui s'en suivent. Les modèles mécanistiques de simulation, construits sur base d'un grand nombre de paramètres environnementaux et de fonctions mathématiques complexes déterministes, prédisent le comportement de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère.

Cependant, les gestionnaires et conseillers agri-environnementaux ont besoin de **systèmes d'aide à la décision flexibles et rapides à mettre en place** face à la diversité des situations rencontrées sur le terrain. Cette nécessité nous conduit à développer des méta-modèles, modèles des modèles mécanistiques, basés sur la récolte d'un nombre limité de variables environnementales.

2. Objectif

En Région wallonne, le PGDA établit un contrôle des agriculteurs quant à la durabilité de leur gestion de l'azote sur base de l'évaluation de l'**Azote Potentiellement Lessivable (APL)**, à savoir la mesure du stock d'azote nitrique [$\text{kg}_{\text{NO}_3\text{-}}\cdot\text{ha}^{-1}$] présent à l'automne en début de période de lessivage des nitrates, dans l'horizon de sol défini par les 90 premiers centimètres du profil pédologique des parcelles agricoles. Chaque année, 3 % des agriculteurs wallons sont sélectionnés pour comparaison de leurs APL aux normes annuelles établies sur base des APL d'un réseau de fermes de références (*Survey Surface Agricole (SSA)*).

De même, dans sa mission de soutien aux

* Correspondre avec les auteurs : seb.pti@gmail.com (S. Petit), marnik.vanclooster@uclouvain.be (M. Vanclooster), hupin@nitrawal.be (F. Hupin)

agriculteurs pour le respect des normes du PGDA, la structure d'encadrement Nitrawal incite les agriculteurs wallons à **effectuer un conseil de fertilisation sur base de l'évaluation d'un Profil Azoté au Printemps (PAP)**, une mesure identique à l'APL mais effectuée en fin de période de lessivage. Cette mesure témoigne du stock d'azote minéral du sol qui pourra être comptabilisée dans le **bilan azoté** de la culture de printemps.

L'étude présentée a pour objectif la **prédiction du PAP sur base de l'APL** combiné à d'autres variables agro-pédologiques susceptibles d'influencer le stock d'azote minéral durant l'interculture.

Une série de questions de recherche se sont alors posées :

- Quel lien existe-t-il entre le stock d'azote minéral en automne et le stock d'azote minéral au printemps ?
- Quels sont les facteurs d'influence prépondérants dans l'évolution du stock d'azote minéral au cours de l'interculture ? Une mise en évidence statistique de ces relations est-elle cohérente avec les connaissances et modèles actuels de la dynamique de l'azote ?
- Serait-il possible d'envisager un outil d'aide à la décision basé sur une analyse statistique des données de terrain pour l'estimation du PAP permettant l'amélioration de la souplesse des outils de conseil de fertilisation par bilan azoté ?

Le développement d'un modèle prévisionnel a pour objectif résultant la simplification de la procédure des conseils de fertilisation, la réduction de leur coût et l'augmentation du nombre de conseils pouvant être octroyés chaque année.

3. Méthodologie

3.1. Zone d'étude

Afin de disposer de sols relativement semblables pour une première étude tout en couvrant une zone permettant la collecte d'un nombre considérable de données, nous avons choisi de nous concentrer sur les régions limoneuses et sablo-limoneuses. Cependant, les sources de données se limitant aux zones couvertes par les centres d'action Nitrawal et les fermes de références du SSA, notre zone d'étude peut finalement être limitée par le territoire wallon situé au nord du sillon Sambre et Meuse. L'ensemble de cette zone, située en plaine maritime de moyenne Belgique, a été désignée comme zone vulnérable par l'arrêté ministériel du 22 décembre 2006 (Moniteur Belge du 06.03.2007).

Cette région, caractérisée par des sols limoneux fertiles rassemble les grandes cultures wallonnes. On

y retrouve comme cultures principales les céréales, la betterave sucrière et la pomme de terre. Le série pédologique¹ *Aba* y est caractéristique avec la présence de limons légers à lourds dans l'horizon de surface. L'altitude varie entre 100 et 200 mètres. Le climat est tempéré. Les températures oscillent entre des moyennes de 20°C durant la période estivale et 0°C en période hivernale. Avec une moyenne belge de 800 mm par an, les volumes des précipitations sont relativement constants au cours de l'année.

3.2. Constitution d'une base de données

La première étape est la constitution d'une base de données rassemblant des couples de profils azotés APL (automne) - PAP (printemps) par parcelles agricoles, accompagnés des variables susceptibles d'influencer le stock d'azote minéral du sol durant l'interculture : pratiques culturales (apports azotés, couverture hivernale piège à nitrates durant l'interculture, précédent cultural), caractérisation des sols (carbone organique total (COT), pH, azote dans l'humus, humidité, conductivité, activité microbienne) et conditions météorologiques locales. Une série de variables spécifiques sont également développées pour améliorer nos objectifs de prévision.

Couples APL-PAP – Nous exploitons les bases de données d'analyse de sol des fermes de références suivies par l'Université catholique de Louvain et les analyses des conseils de fertilisation effectués par les centres d'action Nitrawal de la région d'étude.

Apports Azotés – Nous cumuloons l'entièreté des apports à la parcelle durant le printemps et l'automne de l'année de l'APL. Nous distinguons les Apports Azotés Organiques (**AAO**) des Apports Azotés Minéraux (**AAM**). D'autre part, afin d'intégrer l'efficacité effective des AAO à libérer de l'azote disponible pour les cultures nous utilisons les valeurs de coefficients d'efficacité minéral actualisées pour le PGDA II (Nitrawal, 2007). Les coefficients d'efficacité sont des paramètres empiriques permettant de tenir compte du type de fumure et de la période d'application sur la capacité de l'engrais à libérer l'azote sous forme minérale. Le produit de l'AAO par son coefficient d'efficacité nous donne l'Apport Azoté Efficace (**AAE**). L'Apport Azoté Total (**AAT**) correspond à la somme de l'AAE et de l'AAM.

Conditions météorologiques – Les données pluviométriques (P_j) et d'évapotranspiration (ETP_j)

¹ font partie d'une même série tous les sols présentant, dans un matériau originel de même nature aux plans de la composition lithologique et de la texture, le même type de profil. Tous présentent donc la même succession d'horizons génétiques et un drainage naturel analogue (Riga 2012).

journalières ont été fournies par le réseau de stations météorologiques de l'asbl Pameseb (www.pameseb.be). Les stations les plus proches des communes des parcelles d'étude sont choisies.

Hydrodynamiques des sols – L'organigramme de la figure 1 illustre les sources de données utilisées et les croisements effectués pour l'estimation des caractéristiques pédologiques génériques (*texture*, densité ρ et *COT*) et hydrodynamiques de chaque parcelle d'étude (courbes de teneur en eau $\Theta(h)$ et de conductivité $K(h)$).

Le portail cartographique Réquacarto (requacarto.cra.wallonie.be), développé par le réseau de laboratoires d'analyses Réquasud, fournit les séries pédologiques (*eAbcd1*) présentes sur toute parcelle agricole wallonne à partir de la localisation aérienne de celles-ci par région agricole (*RA*).

Nous pouvons ainsi bénéficier du travail réalisé par l'étude "Pearl Be" (Riga 2012) pour donner une estimation des caractéristiques hydrodynamiques des parcelles d'études à partir des séries pédologiques. Riga 2012 établi par région agricole des profils médians homogénéisés (PMH) sur 1 mètre de profondeur de la texture et de la teneur en matière organique des sols belges. Pour ce faire, les bases de données suivantes sont exploitées :

- La base de donnée Aardewerk : reprend la description quantitative des types de sol belges à partir de la caractérisation de 13 033 profils de sols (pour la Belgique) effectués entre 1947 et 1971 (van Orshoven 1993).
- La base de données des stocks de carbone organique dans les sols belges en 2000 (SOC) (Lettens et al. 2005) : elle met à jour les informations relatives à la matière organique de la base Aardewerk.
- La carte numérique des sols belges (Bracke et al. 2004) (CNSB) : base de données cartographique des caractéristiques des sols (texture, drainage, développement de profils, épaisseur, etc) construite à partir de la version "papier" de la carte des sols Belges au 1/20000.

Les propriétés hydrodynamiques des sols sont alors obtenues à partir des fonctions de pédotransfert de Vereecken (PTF Vereecken) actualisées pour la Belgique (Weynants et al. 2009), appliquées aux profils homogènes établis précédemment pour chaque type de sol et par région agricole (*RA*).

Dynamique de l'azote – Nous tentons ici de recouper plusieurs sources de données dans le but de créer des variables représentatives de l'évolution du stock d'azote nitrique entre l'automne et le printemps. Au vu de la littérature, le drainage et la minéralisation sont des processus prépondérants dans

l'évolution de ce stock.

L'évaluation de ces processus demande le recoupement des conditions météorologiques avec des caractéristiques hydrodynamiques des sol des parcelles, déterminant leur état d'humidité et de température en tout moment. Ces processus se déroulent en continu dans le sol et à l'interface sol-atmosphère. Leur état sera donc influencé par les dates d'échantillonnages respectifs de l'APL et du PAP, déterminant le stade de reprise ou d'arrêt de la minéralisation en automne et au printemps. Mais ils seront aussi fonction du nombre de jours d'intervalle entre ces deux dates et des conditions météorologiques journalières au cours de cette période.

Pour intégrer ces facteurs temporels en une variable ponctuelle nous procédons par l'évaluation journalière de fonctions caractéristiques des processus en jeux. Ces fonctions seront ensuite cumulées sur base journalière pour obtenir une variable "compteur" représentative de l'importance de la minéralisation et du drainage moyen sur l'horizon de temps séparant la prise de l'APL du profil de printemps.

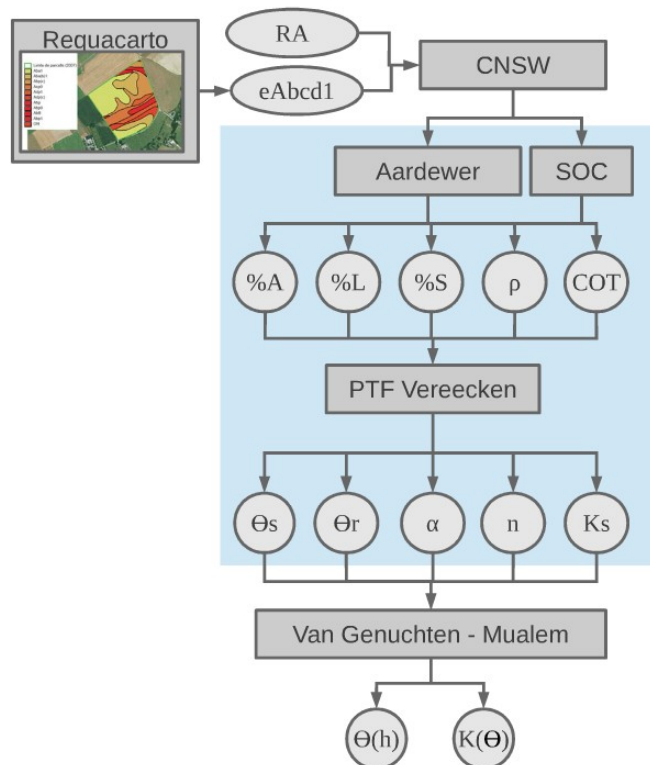


Figure 1 - Estimation des caractéristiques hydrodynamiques à partir des séries pédologiques des parcelles agricoles

Un premier compteur *compt_p* du **cumul des précipitations** nettes entre la date d'échantillonnage de l'APL (dateAPL) et du profil de printemps (datePAP) est calculé.

$$cumul_p = \sum_{j=dateAPL}^{datePAP} P_j - ETP_j$$

Nous envisageons ensuite deux compteurs, de complexité différente, de l'influence de l'humidité du sol sur les processus bactériens en charge de la minéralisation.

- Le **compteur de la teneur en eau du sol $compt_Θ$** évalue le rapport journalier entre la teneur en eau actuelle et la teneur en eau à la capacité au champ, considérant leur écart à la teneur en eau résiduelle.

$$\sum_{j=dateAPL}^{datePAP} g_{\theta}(\theta^j) = \frac{\theta^j - \theta_r}{\theta_{FC} - \theta_r}$$

L'évaluation journalière de la teneur en eau se fait sur base d'un bilan hydrique ou le drainage est évalué par le calcul de la conductivité hydraulique par le modèle de van Genuchten - Mualem. Le lien entre le stock d'eau et la teneur en eau au jour j étant établi par la profondeur d'échantillonnage de l'APL de 900 mm.

$$S^{t+1} = S^t + \Delta t(P - E - K(S))$$

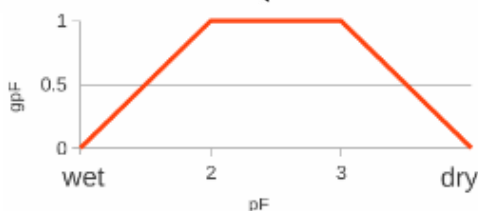
$$S^t = \theta^t 900$$

$$K(\theta) = K_s Se^t [1 - (1 - Se^{n/(n-1)})^{(1-1/n)}]^2$$

Ne disposant pas de la teneur en eau initiale à la date d'échantillonnage de l'APL, nous envisageons un laps de temps de 50 jours ou le calcul de la teneur en eau s'initialise. Cette fonction est ensuite cumulée sur base journalière à partir de la date d'échantillonnage APL jusqu'à la date d'échantillonnage du Profil de printemps.

- Le **compteur de l'état de succion du sol $compt_pF$** , tiré de l'étude WAVE (Vanclouster et al., 1994), fait le lien entre l'état de succion journalier du sol et son impact sur la stimulation ou le ralentissement de l'activité bactérienne responsable de la transformation de l'azote. Cette fonction est normalisée entre 0 (activité nulle) et 1 (activité optimale). Entre des succions de pF 2 et 3 l'activité est optimale. Lorsque l'on s'éloigne de cette plage de succion, la fonction diminue linéairement vers des états d'activités microbiennes nulles ou le sol est sec (pF tel que $\Theta = 0,01$) ou totalement saturé (pF tel que $\Theta = 0,99 \cdot \Theta_{sat}$).

$$\sum_{j=dateAPL}^{datePAP} g_{pF}(pF_j) = \begin{cases} \frac{pF_{dry} - pF_j}{pF_{dry} - 3} & \text{si } pF_j > 3 \\ \frac{pF_j - pF_{wet}}{2 - pF_{wet}} & \text{si } pF_j < 2 \\ 1 & \text{si } 2 \leq pF_j \leq 3 \end{cases}$$



L'évaluation de cette fonction nécessite la modélisation de la courbe de teneur en eau du sol. Comme pour le modèle de Mualem-van Genuchten évalué précédemment, les paramètres n , α , Θ_r et Θ_{sat} ont été évalués pour les sols de toutes les parcelles. On peut ainsi retourner l'équation de van Genuchten pour trouver la succion pF en fonction de l'état de saturation du sol.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

$$|h| = \frac{(Se^{-1/m} - 1)^{1/n}}{\alpha}$$

$$pF = \log |h|$$

Enfin un **compteur de l'influence de la température $compt_T$** sur ces mêmes processus est évalué. Nous évaluons sur base journalière la fonction en Q_{10} d'atténuation de la minéralisation par la température proposée par Van't Hoff.

$$\sum_{j=dateAPL}^{datePAP} f_T(T_j) = \frac{v_j}{v_1} = Q_{10}^{(T_j - T_1)/10}$$

Nous utilisons les paramètres moyens calibrés par (Wiaux et al., to be submitted) pour une parcelle en région limoneuse en légère pente. Nous prenons ainsi un facteur Q_{10} de 2,67 pour une température de référence $T_{réf}$ de 15°C.

Finalement, l'influence du sens du gradient de concentration de l'azote nitrique dans le profil de sol sur les pertes de nitrate durant l'interculture a été démontré. Pour en tenir compte, nous envisageons 3 variables représentatives de la **forme de l'APL**. Les deux premières représentent la pente de l'APL exprimée en terme de concentration en nitrate entre l'horizon de surface et intermédiaire et entre l'horizon intermédiaire et de profondeur. La troisième variable est la moyenne des deux premières pentes. Une pente

$$pente_{1-2} = \frac{APL(30 - 60) - APL(0 - 30)}{30}$$

$$pente_{2-3} = \frac{APL(60 - 90) - APL(30 - 60)}{30}$$

$$pente_{1-3} = \frac{APL(60 - 90) - APL(0 - 30)}{60}$$

positive témoigne d'un profil APL en forme de triangle dont la base est vers le bas, entraînant des risques importants de lessivage. Une pente négative au contraire témoigne d'une concentration en azote nitrique plus importante dans l'horizon supérieur. Deux horizons successifs dont le stock d'azote

nitrique est identique seront représentés par une pente nulle.

3.3. Analyse de la base de données

Sur base du jeu de données, une démarche "bottom-up" est réalisée pour la sélection des variables les plus significatives à partir de modèles de régression développés à l'aide du logiciel *JMP 9.0.0* (www.jmp.com) et de l'environnement de développement *Matlab 7* (www.mathworks.nl).

Pour l'ajustement de modèles de prédiction du PAP, nous partons du modèle le plus simple qui est la régression linéaire du PAP en fonction de l'APL observé. Il s'agit ensuite d'identifier les variables apportant le plus d'informations complémentaires à l'APL. Soit l'identification d'un set de variables peu corrélées entre elles mais fortement corrélées au PAP. Une série de modèles régressifs sont construits par ajout « pas à pas » des facteurs les plus significatifs dans la régression (méthode *Stepwise*). Préalablement, nous utilisons les transformations logarithme, logarithme généralisée et les séries de Johnson pour nous assurer de la normalité de notre jeu de données.

Suite à la sélection des facteurs prépondérants, nous envisageons les apports potentiels d'une approche d'intelligence artificielle pour la prédiction du PAP.

Le modèle ayant montré les meilleures performances fera l'objet d'une analyse de sensibilité plus approfondie via une méthode adaptée de (Morris 1991). Cette méthode est globale, elle fait varier chaque paramètre d'entrée dans sa gamme entière d'incertitude, et évalue l'effet élémentaire $ee(i)$ sur la sortie du modèle associé à la perturbation Delta de chaque facteur i . L'effet élémentaire est défini par la différence finie $ee(i)$ pour tout x_i entre 0 et $1 - \Delta$, où $x \in \{0, 1/(p-1), 2/(p-1), \dots, 1\}$ et Δ est un multiple prédéterminé de $1/(p-1)$.

$$ee_i(\mathbf{x}) = [y(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(\mathbf{x})] / \Delta$$

4. Résultats

4.1. Jeu de données

Les différentes sources d'information ont permis la récolte de 177 couples de parcelles échantillonnées en automne et au printemps entre 2003 et 2010 en région limoneuse et sablo-limoneuse.

Nous constatons que le nombre de couples de profils azotés récoltés par rapport au nombre de variables explicatives envisagées est faible. Dans nos modélisations, nous serons particulièrement attentifs à réduire le nombre de paramètres d'entrée, à privilégier les variables explicatives provenant

directement d'analyses effectuées sur la parcelle d'étude et ayant fait l'objet du moins d'hypothèses possible.

Le tableau 1 synthétise les statistiques élémentaires de l'ensemble des variables continues récoltées. La plupart des parcelles présentent un APL plus élevé en surface (moyenne de 25 kgN/ha) qu'en profondeur (moyenne de 11 kgN/ha). La tendance du PAP est par contre beaucoup plus rectiligne avec des stocks d'azote par horizons en moyenne plus faibles (17 kgN/ha en surface, 16 kgN/ha en profondeur).

Nous analysons au tableau 2 les types de cultures précédant les évaluations APL de notre base, leur représentativité par rapport à l'ensemble des observations (%Total) ainsi que la fréquence de CIPAN suivant chaque type de culture (%CIPAN). Le type de CIPAN et l'état de son développement n'ont pas pu être collectés systématiquement. Nous présentons quelques exemples de CIPAN retrouvés.

La moitié des cultures précédant une évaluation du PAP de la base de donnée sont des cultures céréalières, dont 46 % de froment. En effet, les froments sont majoritairement suivis par des cultures de printemps tel que la betterave, le maïs ou la pomme de terre pour lesquelles un conseil de fertilisation est demandé.

4.2. Ajustement de modèles linéaires de régressions et sélection des facteurs prépondérants

Parmi les nombreux modèles de régressions envisagés, nous analysons ici les résultats d'une analyse stepwise incluant les apports azotés totaux (AAT) pour l'explication du PAP total.

Cet entraînement nous mène au modèle *linAAT* capturant 35 % de la variabilité du PAP total.

En ne conservant que la distinction entre les groupes de fumures de ± 250 uNtot/ha, 3 classes de cultures, la pente23, la teneur en sable et l'APL (6 variables au total), nous obtenons le modèle simplifié *linAATspl* dont le coefficient de détermination ajusté prévoit 30 % de la variabilité du PAP.

La variable *pente23* montre le plus de significativité dans les modèles de régression stepwise (p-valeur de 0,012* modèle *linAATspl*). L'estimation de son coefficient de régression vaut -0,31. Au plus la pente est positive, au plus le PAP sera faible. Nous observons cependant que l'introduction de l'APL dans la même régression est alors beaucoup moins significative (p-valeur de 0,2620 modèle *linAATspl*).

Les classes de cultures précédentes de l'analyse exploratoire sont confirmées et déterminantes pour la prédiction du PAP. Il semble logique que les itinéraires culturels associés aux différentes cultures aient un impact sur le PAP. La variable *CIPAN* n'est par contre pas significative.

Facteurs	Variables	Unités	min	max	moyenne	variance	n
Azote nitrique	APL	kgN.ha-1	6.00	226.00	56.08	2118.32	177
	APL0-30	kgN.ha-1	3.00	156.00	25.03	568.49	177
	APL30-60	kgN.ha-1	2.00	96.00	20.33	302.72	177
	APL60-90	kgN.ha-1	1.00	68.00	11.18	104.57	177
	PAP	kgN.ha-1	10.00	132.00	48.17	514.37	126
	PAP0-30	kgN.ha-1	2.00	83.00	17.17	132.34	177
	PAP30-60	kgN.ha-1	2.00	46.00	15.54	73.39	177
	PAP60-90	kgN.ha-1	0.00	73.00	15.62	121.73	126
Forme de l'APL	pen te12	kgN.ha-1.cm-1	-3.80	1.63	-0.16	0.29	177
	pen te23	kgN.ha-1.cm-1	-1.53	0.40	-0.34	0.13	126
	pen te13	kgN.ha-1.cm-1	-2.23	0.2	-0.28	0.13	126
Pédologie	pH	-	5.80	7.60	6.75	0.15	147
	Corg	g.kg-1	8.00	20.88	12.52	5.61	144
	Ntot	g.100g-1 t.s.	0.08	0.17	0.11	0.00	128
	Nhumus	%	3.90	6.90	4.91	0.18	125
	C/N	-	7.00	13.00	10.13	0.94	135
	COT	kg.kg-1	0.50	0.69	0.54	0.00	151
	Arg	%	13.63	21.71	17.84	3.16	151
	Lim	%	39.71	80.37	73.67	50.59	151
	Sab	%	3.82	46.95	8.38	65.68	151
Hydrody- namique	tetas	-	0.43	0.46	0.44	0.00	151
	Ks	mm.j-1	32.61	125.06	41.59	239.32	151
Compteurs	cumul_p	mm	2.80	434.70	274.11	8200.54	175
	compt_theta	-	21.66	171.33	95.57	938.11	151
	compt_gpF	-	54.01	169.80	121.74	358.17	151
	compt_T	-	23.13	126.34	55.32	314.41	177
Apports azotés	AAM	uN.ha-1	0.00	250.00	94.78	6161.61	116
	AAO	uN.ha-1	30	465	190.57	8572.40	53
	AAE	uN.ha-1	1.50	160.00	67.74	1821.46	53
	AAT	uN.ha-1	15	330.75	145.33	5565.48	53

Tableau 1 - Statistiques élémentaires des variables continues

CULT_PREC	n	%Total	CIPAN	%CIPAN	Type de CIPAN rencontrés
Chicorée	5	2.82	0	0.00	
Mais	26	14.69	2	7.69	(moutarde, ray-grass)
Jachère	2	1.13	0	0.00	
Froment	82	46.33	58	70.73	(avoine, moutarde, phécile)
Pois/Haricot	7	3.95	6	85.71	(moutarde, ray-grass)
Escourgeon	10	5.65	7	70.00	(moutarde, phacélie)
Betterave	23	12.99	3	13.04	
Oignons	2	1.13	1	50.00	(moutarde)
Pomme de terre	10	5.65	0	0.00	
Colza	2	1.13	0	0.00	
Prairie	1	0.56	0	0.00	
Epeautre	1	0.56	1	100.00	(seigle)
Chicon	1	0.56	1	100.00	(moutarde)
Lin	4	2.26	1	25.00	(moutarde)
Prairie de fauche	1	0.56	0	0	
Total	177		80	45.20	

Tableau 2 - Types de précédants culturaux et CIPAN

Modèle		linAAT	linAATspl
Variables Y			
PAP	*		
Regresseurs X			
	x testés	Sélection	Sélection
APL	*	1	1
COT	*		
Arg	*		
Lim			
Sab	*	1	1
tetas	*		
Ks	*		
Compteurs			
cumul_p	*		
compt_teta	*		
compt_gpF	*		
compt_T	*		
Forme de l'APL			
pente12	*	1	
pente23	*	1	1
pente13	*		
Fertilisations			
AAO (7 classes)			
AAM (6 classes)			
AAE (7 classes)			
AAT (7 classes)	*	5	1
Cultures			
Culture préc. (7 cl.)	*	4	2
CIPAN (binaire)	*		
Resultats			
		linAAT	linAATspl
R2		0,4327	0,3336
R2 adj		0,3533	0,2936
AICc		272,82	272,24
R2 cross valid.		0,2927	0,29
n		107	107
Dfmodel		13	6
Dfresidus		93	100

* = variable sélectionnée pour la recherche stepwise
= nombre de catégories significatives sélectionnées

Tableau 3 - Analyse stepwise pour la prédiction du PAP

4.3. Ajustement de Réseaux de Neurones Artificielles (RNA)

Nous tentons d'améliorer la qualité de nos prédictions par l'ajustement de réseaux de neurones artificiels. La souplesse de cette méthode de calcul permettra de mettre en évidence des relations non linéaires plus complexes entre nos variables. Nous attacherons une attention particulière au développement d'une architecture la plus simple possible pour éviter l'over-paramétrisation du nombre réduit d'observations dont nous disposons. Nous nous restreignons à l'entraînement de réseaux à une seule couche cachée, contenant un minimum de nœuds. Tous les modèles seront validés par le test des paramètres sur un jeu de données de validation indépendant.

Détermination de la structure du modèle :

Entrées/Sorties - Nous créons un réseaux

comportant un nœud de sortie par horizon de PAP. Les équations de la couche cachée lient ainsi les 3 horizons du profil azoté.

Les variables d'entrées sont choisies sur base des résultats des analyses réalisées jusqu'ici. Notre choix se justifie comme suite.

- **APL par horizon.** L'APL est la variable la plus spécifique à la parcelle et s'est montrée la plus corrélée au PAP (Le coefficient de détermination entre ces deux variables est de 0,19). La forme de l'APL ayant montré un effet significatif dans les modèles précédents, la prise en compte des valeurs par horizon nous permet d'exploiter le maximum d'informations disponibles.

- **Culture précédente.** Nous conservons les 5 classes établies par la régression linéaire stepwise.

- **CIPAN.** L'influence de leur présence fut sélectionnée lors des analyses stepwise pour la prédiction du PAP par horizons (non présenté dans cet article).

- **Teneur en sable.** Elle rend compte de la texture et de la capacité de drainage du sol. Des 3 paramètres de la texture, la teneur en sable est la plus variable dans notre jeu de données (Tableau 1) et à été sélectionnée de manière systématique dans les analyses stepwise.

- **Cumul des précipitations** entre l'APL et le PAP. Nous avons constaté l'efficacité de la variable *cumul_p* en combinaison de la teneur en sable.

- **Apports Azotés organiques Efficaces (AAE).** L'évolution des fumures organiques efficaces a montré une tendance cohérente avec nos attentes et est davantage corrélée avec le PAP qu'avec l'APL.

Le réseau comprendra donc 8 entrées et 3 sorties (Figure 2).

Couche cachée – 7 réseaux dont l'architecture est composée d'1 couche cachée dont le nombre de nœuds va de 2 à 8 sont ajustés indépendamment. Les réseaux dont les coefficients de détermination R2ajustés sont maximums pour un nombre de nœuds

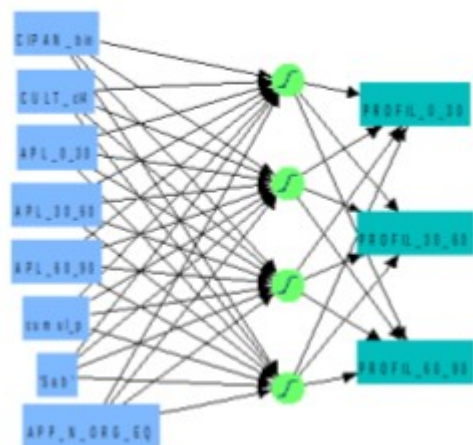


Figure 2 - Structure du réseau de neurones artificielles (RNA)

minimum sont alors sélectionnés. Le réseau à 4 nœuds est finalement retenu (Figure 2). Un coefficient de détermination moyen de 0,76 lui est assigné suite à une séquence totale de 15 ajustements.

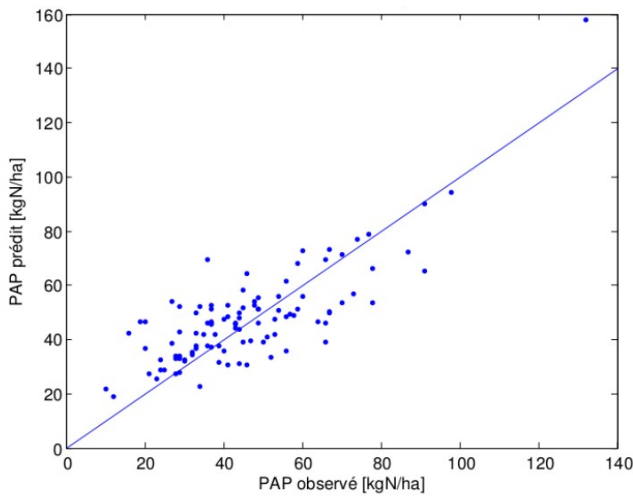


Figure 3: Prédiction du PAP par le RNA ($R^2 = 0,76$)

4.4. Analyse de sensibilité

L'analyse de Morris, pour les différents horizons de prédiction et pour le PAP total (figure 4), rend compte des moyennes (abscisse) et écarts types

(ordonnée) des effets élémentaires répercutés dans le modèle neuronal suite à des perturbations de chaque facteur d'une ampleur de $\Delta = 0,5714 \times \text{maximum}$ observé du facteur. La perturbation des CIPAN et de la classe de culture est engendrée par une transition vers une classe plus élevée. Les répercussions des perturbations appliquées peuvent être envisagées en parallèle de la distribution du PAP. Le PAP varie entre 10 et 132 kgN/ha pour une moyenne de 48 kgN/ha. De manière générale, les facteurs montrent des écarts types élevés suite aux perturbations répercutées dans le modèle. Cela est dû à la non linéarité des relations formées par le RNA.

Nous pouvons tirer du graphique de Morris les observations suivantes :

- Une teneur en sable élevée a une forte tendance à réduire le stock d'azote nitrique au printemps. Des perturbations de la teneur en sable de l'ordre de +27 % entraînent des réductions du PAP total d'environ -40 kgN/ha. Avec des réductions plus importantes dans l'horizon de surface qu'en profondeur. Le stock d'azote de l'horizon de profondeur étant déjà très sensible aux pertes liées à sa position, une augmentation de la capacité de drainage du sol se marquera davantage en surface.

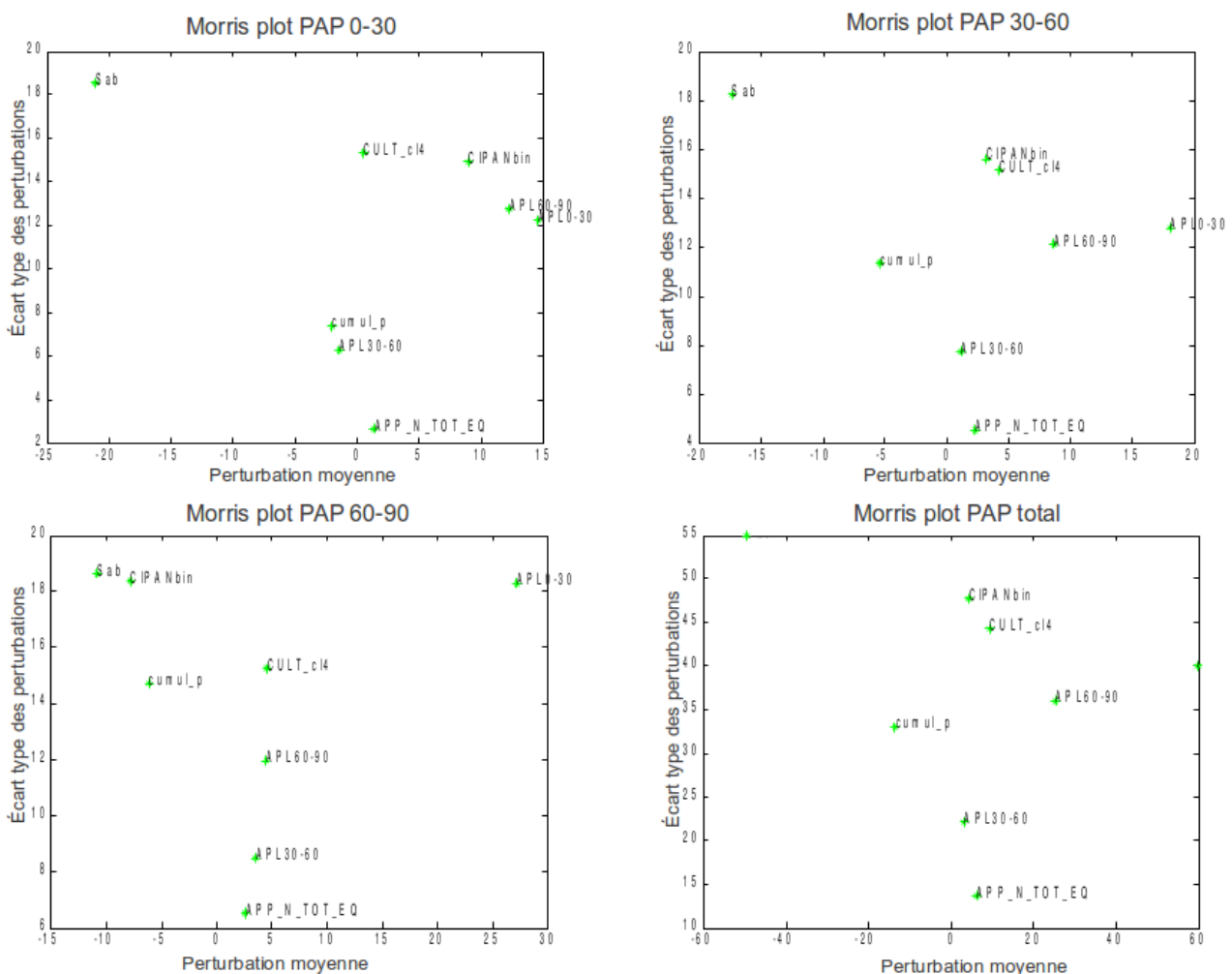


Figure 4 - Analyse de sensibilité de Morris pour la prédiction du PAP

- Nous observons également que des précipitations cumulées entre l'APL et le PAP plus élevées de 250 mm, entraînent des réductions du PAP de l'ordre de -10 kgN/ha. Cette fois-ci davantage dans l'horizon de profondeur qu'en surface.
- La transition vers une classe de culture plus élevée montre un léger effet positif ($\sim +5$ kgN/ha) pour le PAP60-90. L'influence des classes culturales est par contre très peu marquée pour l'horizon superficiel.
- L'application d'une CIPAN montre un impact d'augmentation du PAP de surface et de réduction du PAP de profondeur de l'ordre de 8 kgN/ha pour les deux horizons. La CIPAN augmenterait légèrement le PAP total ($\sim +2$ kgN/ha).
- La variable représentative des apports d'azote organique efficaces précédant le PAP montre un léger effet d'augmentation linéaire du stock d'azote. Des perturbations de l'ordre de 90 kgN/ha augmenteraient le PAP total de moins de 5 kgN/ha. L'effet légèrement supérieur sur l'horizon de profondeur pourrait être signe d'un lessivage dans les horizons inférieurs de l'azote apporté.
- Enfin, parmi les APL par horizons, c'est l'APL de surface qui montre le plus d'influence sur le PAP. Des augmentations de l'ordre de 90 kgN/ha de l'APL0-30 marque plus d'influence sur le PAP de profondeur ($\sim +30$ kgN/ha) que le sur PAP intermédiaire ($\sim +18$ kgN/ha) ou de surface ($\sim +15$ kgN/ha). Nous observons la même tendance pour l'APL30-60 mais de manière beaucoup moins marquée. L'APL60-90 a peu d'influence sur le PAP60-90. Cette tendance peut être expliquée par la lixiviation hivernale de l'APL0-30 dans les horizons inférieurs. Tandis que les APL plus profonds sont lixiviés au delà du profil pédologique et sont donc beaucoup moins liés au PAP. L'influence de l'APL60-90 sur les PAP des horizons supérieurs est difficilement explicable et relèverait d'une coïncidence.

5. Discussion

Nous discutons ici les effets des variables ayant montré le plus de significativité dans la prédiction du PAP en combinaison de l'APL.

Dans la prédiction du PAP total par régression linéaire, l'introduction prioritaire de la **pente23** semble indiquer une plus forte sensibilité de ce paramètre que l'APL. Une analyse de sensibilité plus poussée de ces facteurs dans un modèle commun serait donc nécessaire pour évaluer de manière plus précise leur effet élémentaire sur le PAP.

L'objectif de développement de modèles au nombre de paramètres d'entrées limités nous a poussé à la création de **classes de cultures** menant à des PAP similaires. Par ordre croissant de PAP moyens faisant

suite à ces cultures, nous avons obtenus les classes suivantes :

- Chicorée
- Maïs, Froment, Betterave,
- Poids/Haricots, Escourgeon, Oignons, Pommes de terres, Colza, Prairies
- Lin

L'ordre de classification peut s'expliquer par la variation des systèmes racinaires de ces cultures, par les apports d'azote sous formes de fumures qui leur sont associés ou qui sont associés à la culture précédente et par leur cycle de développement végétatif concomitant ou non au cycle de minéralisation des matières organiques.

Il est en effet logique de retrouver dans les premières classes des cultures dont le cycle végétatif est long et le système racinaire profond et bien développé. Le froment a un cycle végétatif de 9 mois (novembre à août) et est connu pour son système racinaire développé capable d'exploiter l'azote du sol de manière optimale. La chicorée et la betterave ont un cycle de 8 mois et une racine pivotante profonde. Les légumes et pommes de terre ont par contre un cycle végétatif plus court et des systèmes racinaires moins profonds. Ils laissent des reliquats plus importants dans le sol. Concernant les cultures de légumineuses, 85 % d'entre elles sont suivies d'une CIPAN ce qui explique l'observation de PAP raisonnables pour ces cultures fixatrices d'azote.

Il est à priori plus étonnant de retrouver le froment et l'escourgeon dans des classes différentes. Leur cycle végétatif et les pratiques culturales apportées ne diffèrent que très peu. L'escourgeon est généralement semé plus tôt (octobre-novembre) que le froment (novembre-décembre) et a déjà tallé avant l'hiver (le tallage consommant de l'azote). Cependant, dans les systèmes culturaux de notre région l'escourgeon est généralement implanté en bout de rotation, lorsque le sol a été exploité par les cultures précédentes de la rotation. De ce fait, un précédent en escourgeon est toujours suivi d'une tête de rotation. Les 5 précédents en escourgeon sont en effet suivis d'une betterave ou d'une chicorée. La fumure organique de la tête de rotation est alors appliquée après la récolte de l'escourgeon. Celle-ci se marquerait sur le PAP même si une CIPAN est implantée dans la majorité des cas. La relargue d'azote liée à la décomposition de la CIPAN peut également contribuer aux PAP élevés retrouvés après l'escourgeon. Ce raisonnement explique également les PAP élevés retrouvés en lin qui sont, pour 2 des 4 observations, suivis d'une betterave.

La culture de maïs se trouve dans une classe à faibles PAP mais montre des APL relativement élevés. Le cycle cultural du maïs, plante en C-4, tropicale, valorise bien l'azote mais de manière décalée avec le cycle de minéralisation de la matière organique du sol. Le premier pic de minéralisation de

printemps peut être absorbé par le prélèvement intensif du maïs en floraison. Le deuxième pic de minéralisation à l'automne ne peut par contre pas être valorisé, c'est pourquoi l'APL est généralement plus élevé. La présence de CIPAN après le maïs étant peu fréquente ou entraînant une minéralisation plus forte suite au travail du sol pour son semis, les pertes hivernales sous le profil pédologique sont difficiles à éviter. Ce qui peut expliquer la présence du maïs dans une classe de culture entraînant des PAP faibles. La gestion de la fertilisation pour cette culture doit donc être optimale.

Nous avons constaté que la prise en compte de la présence d'une CIPAN n'était pas toujours nécessaire pour améliorer la prédiction du PAP. En effet la capacité de l'agriculteur à implanter une CIPAN est déterminée par la nature de la culture précédente. Il y a donc un certain dédoublement d'information lorsque les deux variables sont introduites. Son apport d'information se marque cependant pour des modèles de prédiction du PAP par horizon dont l'effet est opposé sur les horizons de surface et de profondeur. Dans ce cas, sa mise en place augmente significativement le PAP de surface et réduit significativement le PAP de profondeur.

La variable représentative de la **matière organique (COT)** n'a montré que très peu d'effet dans nos analyses. Nous remettons fortement en cause la méthode utilisée pour son estimation. En effet, nous disposons également pour certaines parcelles de la variable Corg, mesure du carbone organique total par les laboratoires de recherche lors de l'analyse du PAP. En comparant pour ces parcelles la variable COT estimée aux analyses de Corg nous n'observons aucune relation. Il est relativement normal que ces valeurs ne montrent pas de lien. Les valeurs de COT sont issues de la base de données des stocks de carbone organique des sols belges (Lettens et al. 2005), actualisation en 2000 de la base Aardewerk (van Orshoven et al. 1993). Ces valeurs sont prises de manière ponctuelle, elle sont donc faiblement représentatives de la variabilité locale du carbone organique du sol (COS). De récentes études, soulignent pourtant la variabilité parcellaire importante du COS (Wiaux 2010). La réalisation des profils médians homogène (PMH) faisant le lien entre les séries pédologiques de nos parcelles d'étude et la CNSB a d'autant plus contribué à homogénéiser la variabilité du COS au sein des unités cartographiques. Cette simplification rend notre variable COT peut représentative du COS effectif de nos parcelles. Il aurait été plus adéquat d'exploiter la variable Corg si sa mesure avait été plus fréquente dans notre base de données. En effet, bien que les teneurs en MO des sols limoneux et sablo-limoneux soient les plus faibles de la Région wallonne, ses

teneurs varient entre 1,1 et 2,2% (van Wesemael 2006) Cette variabilité devrait influencer sur les taux de minéralisation des parcelles agricoles et améliorer la qualité de nos estimateurs du PAP.

6. Conclusion

Par le biais de réseaux de neurones artificiels nous obtenons un modèle capturant 76 % de la variation du PAP en fonction de l'APL, du précédent cultural, de la présence d'une CIPAN, de la teneur en sable, et du volume des précipitations nettes survenues entre les deux dates d'évaluation des profils azotés.

La justesse de ce modèle est à améliorer. Cependant, au vu des contraintes ayant réduit le nombre d'observations exploitables, ce résultat est prometteur.

La structure simple du modèle répond aux objectifs visés. Les 8 paramètres d'entrée et les 3 sorties sont reliées par combinaisons de fonctions complexes mais dont la tendance est interprétable et correspond à nos connaissances de la dynamique de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère. Une comparaison à d'autres études et modèles mis en place dans des conditions agro-pédoclimatiques similaires aux nôtres ont montré la cohérence de nos résultats.

Malgré certaines limites soulignées, nous montrons la possibilité de représentation du système complexe de l'évolution du stock d'azote nitrique durant l'interculture à partir de quelques observations de ses états et de méthodes de modélisations numériques et statistiques. Ainsi, notre étude dégage de nouvelles perspectives pour l'amélioration des outils d'aide à la décision en matière de conseils de fertilisation, à destination des agriculteurs et conseillers agri-environnementaux, pour une économie d'intrants et une conservation des ressources en eau wallonnes. La méthodologie mise en évidence est par ailleurs extensible à toute autre environnement.

Remerciements

Nous remercions Richard Lambert, Patrick Bogaerts et Aurore Degré pour leur relecture du mémoire et leurs conseils avisés. Merci à Marc De Toffoli et Olivier Imbrecht pour leur encadrement dans la recherche des données UCL et à Mostafa Khalidi et David Dossantos pour l'accès aux données des centres Nitrawal Nord et Ouest. Nous tenons encore à remercier Christophe Descamps de l'asbl Pameseb pour la fourniture des données météorologiques et les laboratoires Requasud pour l'accès au portail Réquacarto.

Références

- Bracke C, Veron P. et Bah B., 2004. *Mise en œuvre du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW) – Phases « restitution » « intégration »*. Rapport final des activités de la convention. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux – Unité Sol-Ecologie-Territoire, Laboratoire de Géopédologie – Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. Dir. Sc. Lejeune P., Bock L., 2004. 53pp.
- Cazeneuve P., Mahé T., et Vert J. 2010. *Le marché des engrais minéraux : état des lieux, perspectives et pistes d'amélioration*. Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de la pêche. Centre d'étude et de Prospectives. Analyse n°15, avril 2010.
- Lettens S., van Orshoven J., van Wesemael B., Muys B. et Perrin D. 2005. *Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990*. Global Change Biology, vol 11, pages 2128-2140, 2005.
- Morris Max D., 1991. *Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments*. Technometrics, vol. 33, n°2, pages 161-174, May 1991.
- Nitrawal 2007. *Eau-Nitrates, informations et conseils techniques pour la gestion durable de l'azote* (2ème édition), 162 pages.
- Riga 2012. *PEARL BE. Actualisation de l'outil d'estimation des concentrations en produits phytopharmaceutiques dans les eaux souterraines en Belgique*. Rapport technique. Centre wallon de recherche agronomique. Département agriculture et milieu naturel. Unité fertilité des sols et protection des eaux.
- van Orshoven J. et Vandenbroucke D. 1993. *Guide de l'utilisateur de la base de données « AARDEWERK » - Base de données de profils pédologiques en Belgique*. s.l. : Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA) – Comité pour le développement d'un système d'informations sur les sols belges (COBIS). Vol. Rapport 18B, page 44, 1993.
- Van Wesemael B. 2006. *Les teneurs en matières organiques dans les sols en Région wallonne, Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon*. Université catholique de Louvain.
- Vanclooster M., Viaene P., Diels J., et Christiaens K. 1994. *WAVE – a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment*. Reference and Users Manual (release 2.0). Institute of Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Vandenbergh 2010. *Mise en relation de l'évolution de l'agriculture et de la qualité de l'eau entre 1950 et 2000*, Biotechnology, Agronomy, Society and Environment.
- Weynants M., Vereecken H., et Javaux M., 2009. *Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions : Introducing a Closed-Form Hydraulic Model*. Vadose Zone Journal, vol 8, 1, pages 86-95, 2009.
- Wiaux F., 2010. *Impact de la variabilité intra-parcellaire de la matière organique du sol sur la prédiction des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines : étude de cas pour le bassin versant de la Mollignée (Belgique)*. Mémoire de fin d'études, Université catholique de Louvain.
- Wiaux, F., Van Oost, K., Vanclooster, M. *Space-time dynamics of soil respiration at the hillslope scale: modelling of responses to soil moisture and temperature*. to be submitted.