HAL open science

Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques

David Montagne, Isabelle Cousin, Sophie Cornu

▶ **To cite this version:**

David Montagne, Isabelle Cousin, Sophie Cornu. Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques. Étude et Gestion des Sols, 2013, 20 (2), pp.137-149. hal-01192460

HAL Id: hal-01192460

https://hal.science/hal-01192460v1

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques

D. Montagne(1,2*), I. Cousin(3) et S. Cornu(4)

1) AgroParisTech, UMR1091 EGC, Avenue Lucien Brétignières F-78 850 Thiverval-Grignon, France
2) INRA, UMR1091 EGC, F-78 850 Thiverval-Grignon, France
3) INRA, UR0272 Science du Sol, F-45075 Orléans, France
4) INRA, UR1119 Géochimie des Sols et des Eaux, F-13 545 Aix-en-Provence, France
* : Auteur correspondant : david.montagne@agroparistech.fr

RÉSUMÉ

La gestion durable de la ressource sol, reconnue comme non renouvelable à l'échelle humaine, nécessite de connaître voire d'orienter les évolutions des sols en réponse aux activités anthropiques ou au changement climatique. Les dynamiques des principaux processus pédologiques, à des pas de temps de quelques dizaines à centaines d'années sont cependant largement méconnues. Trop souvent encore, les sols sont considérés comme stables pour de tels pas de temps. Dans ce contexte, nous synthétisons ici les avancées scientifiques de dix ans de recherches ayant eu pour objectifs : i) de caractériser l'impact de perturbations anthropiques sur la nature des processus pédologiques actifs dans des LUVISOLS DÉGRADÉS ; ii) de quantifier l'importance des évolutions récentes des sols par rapport aux processus de formation long-terme ; et iii) de préciser la dynamique des processus pédologiques pour des pas de temps de la dizaine à quelques centaines d'années. La démarche utilisée repose sur un échantillonnage en séquence orientée et une modélisation du phénomène de dégradation morphologique par bilans massiques. Deux perturbations ont été considérées : la mise en culture de sols forestiers depuis au moins 200 ans, d'une part, et le drainage agricole pendant 16 ans, d'autre part. Nos travaux montrent que la mise en culture ralentit le phénomène de dégradation morphologique sous l'effet des pratiques de chaulage, mais conduit aussi localement à son accélération sous l'effet de l'implantation d'un réseau de drainage. Dans ces deux situations, l'impact cumulé des pratiques agricoles sur des périodes aussi courtes que quelques dizaines à centaines d'années s'est révélé suffisant pour produire une différenciation des sols avec une amplitude comparable aux processus de formation à long terme des sols. L'existence de boucles de rétroactions positives entre structure du sol, intensité des flux d'eau et transferts de matières, couplée à des évolutions par seuil sont deux éléments clés contrôlant ces dynamiques particulièrement rapides d'évolution.

Mots clés

Pédogenèse, perturbations anthropiques, éluviation, oxydo-réduction, LUVISOLS DÉGRADÉS.

Reçu : février 2013 ; Accepté : mai 2013

SUMMARY

SOIL MORPHOLOGICAL DEGRADATION AND AGRICULTURAL LAND USE: QUANTIFYING SHORT-TERM SOIL EVOLUTION INDUCED BY HUMAN ACTIVITY

Soils are a non-renewable resource. To sustain the intensity of soil services, it is essential to understand and predict the kinetics of soil forming processes in response to anthropic activities or climate change. Soil formation is often considered as a long-term process and soils are widely considered as stable over a century to millennium time scale. In this paper we synthetized the main findings of ten years of research that aimed at i) characterising the impact of anthropic perturbations on the active soil processes in Albeluvisols ; ii) quantifying the intensity of recent soil evolutions induced by anthropic activities by comparison to long term soil formation and finally iii) specifying the dynamics of common soil processes on times scales ranging from decade to some centuries. Two types of perturbations were considered in our work : 200 years of cultivation soils formerly under forest land on one hand and 16 years of tile-drainage on the other hand. Our approach consisted in the sampling of soils under different land-use and according to an agricultural practice sequence and in mass balance modelling of soil degradation. Soil cultivation was shown to slow down soil degradation as a result of recurrent soil liming but to increase locally its velocity as a result of agricultural drainage. Two decades of agricultural drainage on the one hand and some centuries of cultivation on the other hand were sufficient to induce soil differentiations of a same order of magnitude than that resulting from long-term soil formation. The intervention of positive feedback loops involving soil structure, water fluxes and particle transport as well as pedogenic thresholds were demonstrated to be two key-factors leading to a remarkable velocity of soil processes and soil evolutions.

Key-words

Pedogenesis, anthropic perturbations, eluviation, redox processes, Albeluvisol.

RESUMEN

DEGRADACIÓN MORFOLÓGICA Y AGRICULTURA: CUANTIFICACIÓN DE LA EVOLUCIÓN EDÁFICA A CORTO PLAZO INDUCIDA POR FACTORES ANTRÓPICOS

Para una gestión sostenible del recurso suelo, considerado como no renovable a escala humana, es necesario conocer (o incluso orientar) la evolución de los suelos en respuesta a las actividades humanas o a los cambios climáticos. Sin embargo, la dinámica de los principales procesos edafológicos en un horizonte temporal de decenios a siglos permanece desconocida en gran medida, de modo que los suelos se consideran casi siempre como estables a tales escalas de tiempo. En este trabajo sintetizamos los avances científicos de diez años de investigación cuyos objetivos son i) caracterizar el impacto de las perturbaciones antrópicas sobre la naturaleza de los procesos edafológicos activos en Albeluvisoles ; ii) cuantificar la importancia de los cambios recientes en los suelos en relación a los procesos de formación a largo plazo ; y iii) determinar la dinámica de los procesos edáficos a una escala temporal entre el decenio y el siglo. La estrategia utilizada se basó en un muestreo orientado de secuencias de suelos con diferentes prácticas agrícolas y en la modelización del fenómeno de degradación morfológica mediante balances de masa. Se han considerado dos perturbaciones : al menos 200 años de cultivo por una parte, y 16 años de drenaje agrícola, por otra. La puesta en cultivo es reconocida como un factor de evolución de suelos capaz de ralentizar el fenómeno de degradación morfológica bajo el efecto del encalado, pero también de acelerarlo localmente debido a la implantación de una red de drenaje. En ambas situaciones, el impacto acumulado de las prácticas agrícolas en períodos de tiempo cortos (decenios a siglos) se ha demostrado suficiente para dar lugar a una diferenciación de los suelos de amplitud comparable a la de procesos de formación a largo plazo. La existencia de bucles de retroalimentación positiva entre la estructura del suelo, la intensidad del flujo del agua y transferencia de materia, acoplados a mecanismos de evolución a partir de valores umbral, son dos elementos clave que controlan la dinámica de los procesos de evolución rápida de los suelos.

Palabras clave

Edafogénesis, perturbaciones antrópicas, eluviación, oxido-reducción, Albeluvisol.

Les sols assurent de nombreuses fonctions : support de la production végétale, régulation du cycle de l'eau, épuration… Ces fonctions sont liées à leurs propriétés qui évoluent en permanence en réponse à l'action combinée et cumulée dans le temps de processus physiques, chimiques ou biologiques (Chadwick et Chorover, 2001 ; Targulian et Krasilnikov, 2007 ; Lin, 2011). Pour assurer la pérennité voire optimiser l'intensité des services écosystémiques rendus par les sols, il est donc nécessaire de connaître les dynamiques des différents processus pédologiques.

Les pratiques anthropiques ont très rapidement été reconnues comme un des grands facteurs susceptibles d'influencer la nature et l'intensité des processus pédologiques (Jenny, 1941 ; Bidwell et Hole, 1965 ; Yaalon et Yaron, 1966). Pourtant, les sols sont classiquement considérés comme le résultat d'une formation lente sur des durées généralement supérieures à la dizaine de milliers d'années (Richter, 2007). Cette conception justifie de considérer les sols et leurs propriétés comme globalement stables sur des pas de temps de quelques dizaines à centaines d'années. Ainsi, les évolutions récentes des sols en réponse à des perturbations anthropiques de faible amplitude (liées notamment aux pratiques et aménagements agricoles) sont très fréquemment négligées (Richter et Markewitz, 2001 ; Tugel *et al.*, 2005 ; Richter, 2007).

Nos recherches entreprises au cours des 10 dernières années ont ainsi eu pour objectif de quantifier les évolutions des sols sous contraintes anthropiques de faible amplitude pour des pas de temps compris entre quelques dizaines et plusieurs centaines d'années. Nous avons choisi comme modèle d'évolution pédologique le phénomène de dégradation morphologique qui correspond à l'exportation, plus ou moins complète, des minéraux argileux et des oxyhydroxydes de fer (Lozet et Mathieu, 2002) sous l'effet d'une combinaison des processus d'éluviation et d'oxydo-réduction (Jamagne, 1978 ; Pédro *et al.*, 1978). L'intensité de ce phénomène, actif en milieu acide et temporairement engorgé, est particulièrement sensible à toute modification des conditions environnementales telles que l'intensité des flux d'eau (Nicole *et al.*, 2003 ; Barbiero *et al.*, 2010) ou du pH (Langohr, 2001).

Deux perturbations anthropiques ont été considérées du fait de leur impact prévisible sur l'intensité du phénomène de dégradation morphologique : i) la mise en culture des sols, combinaison de pratiques modifiant profondément l'ambiance géochimique dans les sols et en particulier le pH, et ii) l'implantation d'un réseau de drainage pour ses effets sur la direction et la vitesse des flux d'eau dans les sols (Montagne *et al.*, 2009). La démarche retenue pour quantifier l'impact de la mise en culture et du drainage sur la dégradation morphologique repose principalement sur i) un échantillonnage en séquence orientée selon les facteurs étudiés (Jenny, 1941) et ii) une modélisation du phénomène de dégradation morphologique à l'aide de bilans massiques (Brimhall *et al.*, 1985 ; Egli et Fitze, 2000).

Le présent travail se propose de synthétiser les principaux résultats obtenus au cours de ces 10 années de recherche à savoir i) le contrôle de la nature des processus actifs dans les sols par les modifications des conditions environnementales ; ii) l'importance quantitative des évolutions récentes des sols sous contraintes anthropiques ; iii) la mise en évidence du rôle des conditions initiales, des boucles de rétroactions liant structure des sols et processus et finalement des effets de seuil comme autant de facteurs à l'origine de dynamiques d'évolutions des sols divergentes spatialement et particulièrement rapides.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site et sols

Le site d'étude est localisé dans le Gâtinais de l'Yonne, en position de plateau abritée de l'érosion (*figure 1*). Il se compose de deux parcelles adjacentes : une parcelle sous forêt et une parcelle cultivée chaulée, amendée en matières organiques et drainée par sous-solage en 1988 soit 16 ans avant l'échantillonnage des sols (*figure 1*). Le mode d'occupation des sols est inchangé depuis environ 200 ans (Cadastre, 1828). Les sols des deux parcelles sont des LUVISOLS DÉGRADÉS (Afes, 2009) développés dans des limons éoliens d'environ 1 mètre d'épaisseur et reposant sur des formations argileuses éocènes (Baize et Voilliot, 1988). Les sols se caractérisent par la succession typique d'horizons A/E/Eg/BTgd/BT sous forêt et LE/Eg/BTgd/BT sous culture (*figure 2*). Les horizons BTgd sont caractéristiques du phénomène de dégradation morphologique (*figure 2*). Celui-ci se traduit dans les LUVISOLS par la dégradation de l'horizon illuvié BT sous forme de langues et/ou d'interdigitations en prolongement de l'horizon E, d'une part, et par la formation de nombreuses ségrégations et concrétions ferro-manganiques de couleur noire, d'autre part (Jamagne, 1978 ; Pédro *et al.*, 1978). Le phénomène de dégradation morphologique produit, au sein de l'interpénétration des horizons E et BTgd, 4 types de volumes de sol se distinguant en particulier par leur couleur (*figure 2*) :

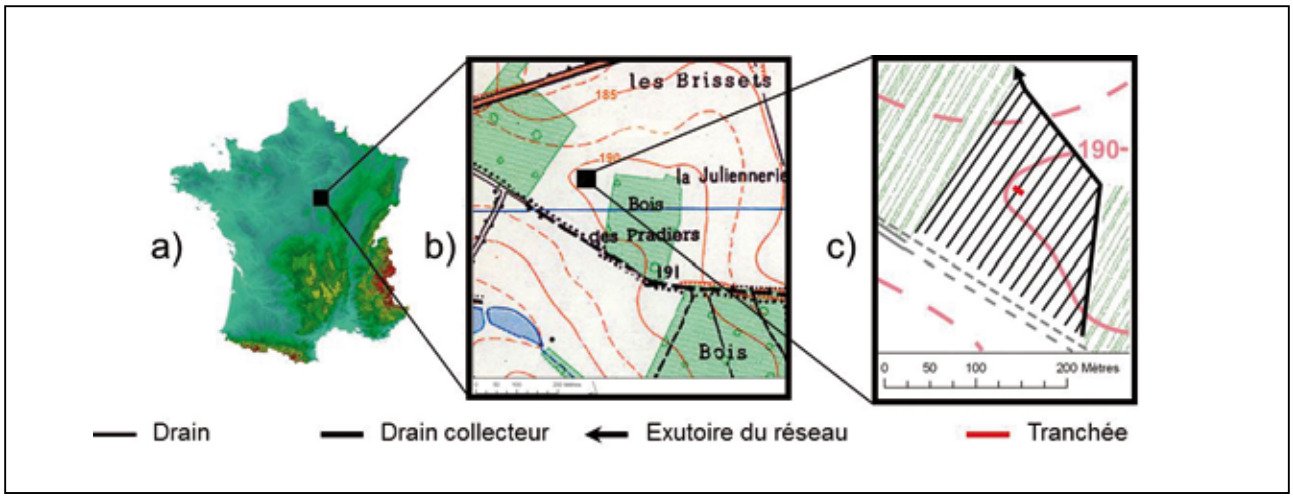
• des volumes de sol de couleur ocre (10YR 5/6 à 10YR 5/8) présentant des concentrations en fraction $<2\,\mu m$ et en fer de l'ordre de 30 et 3,5 g $100g^{-1}$ respectivement (Montagne *et al.*, 2013) ;

• des volumes de sol de couleur brun-pâle (10YR 5/4) dont les concentrations en fraction $<2\,\mu m$ (20 g $100g^{-1}$) et en fer (1,5 g $100g^{-1}$) traduisent un appauvrissement par rapport aux volumes ocre sous l'effet du phénomène de dégradation morphologique (Montagne *et al.*, 2013) ;

• des volumes de sol de couleur claire (10YR 8/2 à 10YR 8/1), qualifiés de gris-clair, très appauvris en fraction $<2\,\mu m$ et surtout en fer, avec des concentrations respectivement inférieures à 20 et 1 g $100g^{-1}$ (Montagne *et al.*, 2013) ;

Figure 1 - Localisation : a) du site étudié dans le Gâtinais de l'Yonne, France, b) des fosses pédologiques ouvertes dans les parcelles forestière et cultivée et c) de la tranchée par rapport au réseau de drainage.

Figure 1 - *Location of : a) the studied area in Yonne, France, b) the pits dug in the forested and the cultivated plots with the topography and c) the soil trench plot with respect to the drainage network.*



▪ des volumes de couleur noire, enrichis en fer et en manganèse, avec des concentrations respectivement supérieures à 4 g 100g^{-1} et à 2 000 mg kg^{-1} (Montagne *et al.*, 2013).

Cette juxtaposition complexe de volumes de sol aux couleurs et compositions chimiques contrastées est appelée Eg&BT lorsque les volumes gris-clair et brun-pâle, produits du processus de dégradation morphologique, sont majoritaires et BTgd dans le cas contraire (*figure 2*). Dans l'horizon sous-jacent, appelé BT, l'abondance des volumes gris-clair et brun-pâle ne dépasse pas quelques pour cents.

Sélection des sols et stratégie d'échantillonnage

Une anthropo-chrono-séquence permettant d'examiner à la fois l'impact de la mise en culture et du drainage sur la dégradation morphologique a été construite sur la base des deux parcelles sélectionnées. Elle est constituée d'un solum sous forêt et de 6 solums cultivés depuis au moins 200 ans et prélevés pour différentes distances à un drain (*figure 3*). En prenant pour origine la position du drain, ces solums sont positionnés à -300 et -60 cm pour la partie gauche et à, +60, +110, +210 et +400 cm pour la partie droite. La partie droite est située en position plane alors que la partie gauche est très légèrement en pente (*figure 3*).

Quel que soit le profil considéré, l'épaisseur des différents horizons ne varie pas de plus de 5 cm ce qui a été considéré comme non significatif. Les différents solums se différencient alors principalement par l'abondance relative par rapport aux volumes ocre des volumes dégradés brun-pâle et gris-clair, d'une part, et des volumes noirs, d'autre part. Ces variations d'abondance relative des différents volumes sont principalement marquées dans l'horizon Eg&BT de 20 cm d'épaisseur et dans une moindre mesure dans l'horizon BTgd d'environ 10 cm d'épaisseur (*figure 2*). Afin de quantifier les variations d'intensité du phénomène de dégradation morphologique, nous avons quantifié les variations d'abondance et de composition des différents volumes de sol dans ces deux horizons. Dans cet objectif, deux monolithes de sol décimétriques (27x15x12 cm) ont été prélevés dans chacun des deux horizons Eg&BT et BTgd, dans l'ensemble des 7 solums.

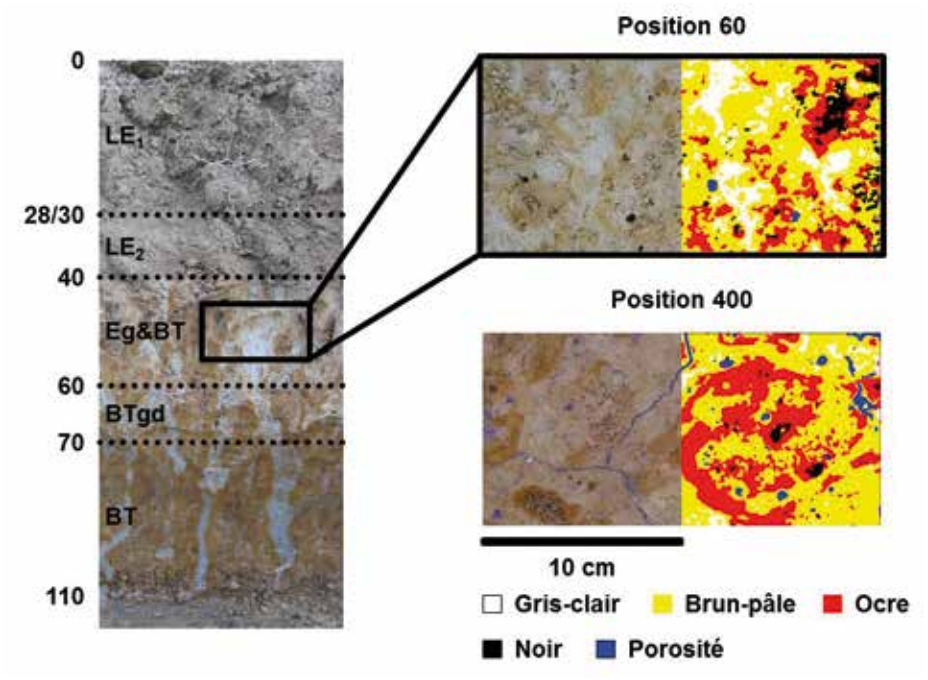
Caractérisation des différents volumes de sol

Les différents volumes de sol ont fait l'objet d'une caractérisation morphologique, chimique, minéralogique et physique. Tout d'abord, le premier de chaque paire de monolithes a été imprégné dans une résine polyester puis découpé en 6 à 11 tranches, d'épaisseur comprise entre 0,7 et 1,5 cm (*figure 3*). L'ensemble des tranches de sol a été photographié en couleur sous lumière naturelle et pour des conditions de luminosité similaires avec une résolution de 180 µm par pixel. L'abondance relative des volumes noirs, ocre, brun-pâle et gris-clair a alors été quantifiée par analyse d'image conformément à la méthode initialement présentée dans Montagne *et al.* (2007) et affinée par la suite (Montagne *et al.,* 2008, 2013*)*. Dans l'horizon Eg&BT aux positions +60, +110, +210 et +400, les évolutions de forme, de voisinage et de connectivité des différents volumes ont été quantifiées sur ces mêmes images (Cornu *et al.*, 2012a).

Le cœur des différents volumes de sol des deux horizons Eg&BT et BTgd a été trié manuellement à partir des monolithes restants. Les concentrations en fraction <2 µm, en fer et en

Figure 2 - Solum de LUVISOL DÉGRADÉ cultivé et drainé à la position +60 et photographies des différents volumes pédologiques des horizons Eg&BT aux positions +60 et +400. Photographie brute avant analyse d'image (partie gauche) et résultat de l'analyse d'image (partie droite).

Figure 2 - Cultivated and drained *Albeluvisol profile at position +60 and pictures of the Eg&BT-horizon at positions +60 and +400 with the different soil volumes. Left, the raw picture, right, distribution maps of soil volumes obtained by image analysis.*



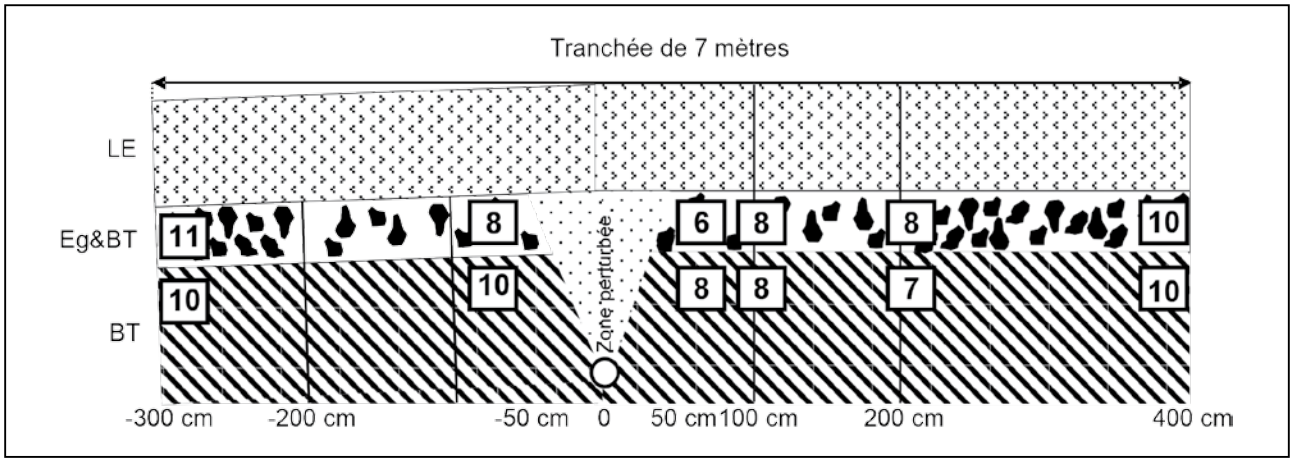
manganèse ont été déterminées dans les différents volumes de sols triés et utilisées comme des marqueurs des processus d'éluviation ou d'oxydo-réduction (Montagne *et al*., 2008, 2012, 2013). Afin d'identifier les parts respectives des processus d'éluviation et d'oxydo-réduction dans la dégradation morphologique, la minéralogie de la fraction <2 µm a été caractérisée par diffraction des rayons X (Montagne *et al*., 2008 ; Cornu *et al*., 2012b). En outre, la minéralogie des différentes formes de fer et de manganèse a été caractérisée à l'aide d'extractions chimiques séquentielles (Montagne *et al*., 2008). Des cartographies élémentaires par microfluorescence X ont été réalisées afin de renseigner la distribution spatiale des minéraux argileux, du fer et du manganèse aux interfaces entre volumes ocre et volumes dégradés (Cornu *et al*., 2007). Enfin, les propriétés hydrodynamiques de rétention et de conductivité des volumes ocre et des volumes dégradés ont été mesurées (Frison *et al*., 2009).

De la caractérisation des différents volumes de sol à la quantification de l'intensité du phénomène de dégradation morphologique

L'intensité du phénomène de dégradation morphologique dans les deux horizons Eg&BT et BTgd, a été quantifiée par bilans de masse (Brimhall *et al*., 1991 ; Egli et Fitze, 2000). Pour ce faire, les différents volumes de sol des deux horizons Eg&BT et BTgd ont été traités comme autant de pseudo-horizons d'épaisseur déterminée à partir de l'abondance relative de chaque volume de sol au sein d'un horizon d'épaisseur totale connue (20 cm pour l'horizon Eg&BT et 10 cm pour l'horizon BTgd). Une telle approche permet de quantifier les flux de matières entrant ou sortant de chaque type de volume de sol. La somme des flux entrants et des flux sortants de matière dans les différents volumes de sol à l'échelle des deux horizons Eg&BT et BTgd permet finalement de quantifier l'intensité de la dégradation morphologique en intégrant non seulement les variations d'abondance, mais aussi de composition chimique ou minéralogique des différents volumes de sol.

Figure 3 - Représentation schématique de la tranchée ouverte dans la parcelle cultivée indiquant : la position du drain, la zone perturbée lors de l'implantation du réseau de drainage par sous-solage et les zones de prélèvement de monolithes. Les nombres indiquent le nombre de tranches de sol découpées dans chaque monolithe.

Figure 3 - *Schematic diagram of the studied trench showing the drain location, the zone disturbed by subsoiling operations as well as the positions of the sampled monoliths (boxes). The figures in the boxes refer to the number of slices cut from the monoliths.*



Les volumes ocre résiduels de l'horizon BTgd ont été considérés comme représentatifs de l'horizon illuvié avant dégradation et choisis comme état de référence en remplacement du matériel parental plus classiquement utilisé (Brimhall *et al.*, 1991 ; Langley-Turnbaugh et Bockheim, 1998 ; Driese *et al.*, 2000). Un tel choix permet de quantifier les flux de matière liés au processus de dégradation morphologique indépendamment de l'ensemble des processus antérieurs et notamment du processus d'illuviation primaire (Jamagne, 1978 ; Pédro *et al.*, 1978). Les calculs ont finalement été effectués en utilisant le quartz comme invariant (Montagne *et al.*, 2008). Les incertitudes associées aux flux de matière ont été obtenus par propagation d'erreur à partir des incertitudes expérimentales relatives aux mesures d'abondances des volumes, des concentrations, et des densités apparentes (Montagne *et al.*, 2008).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Modèle conceptuel d'évolution des sols sous contraintes anthropiques

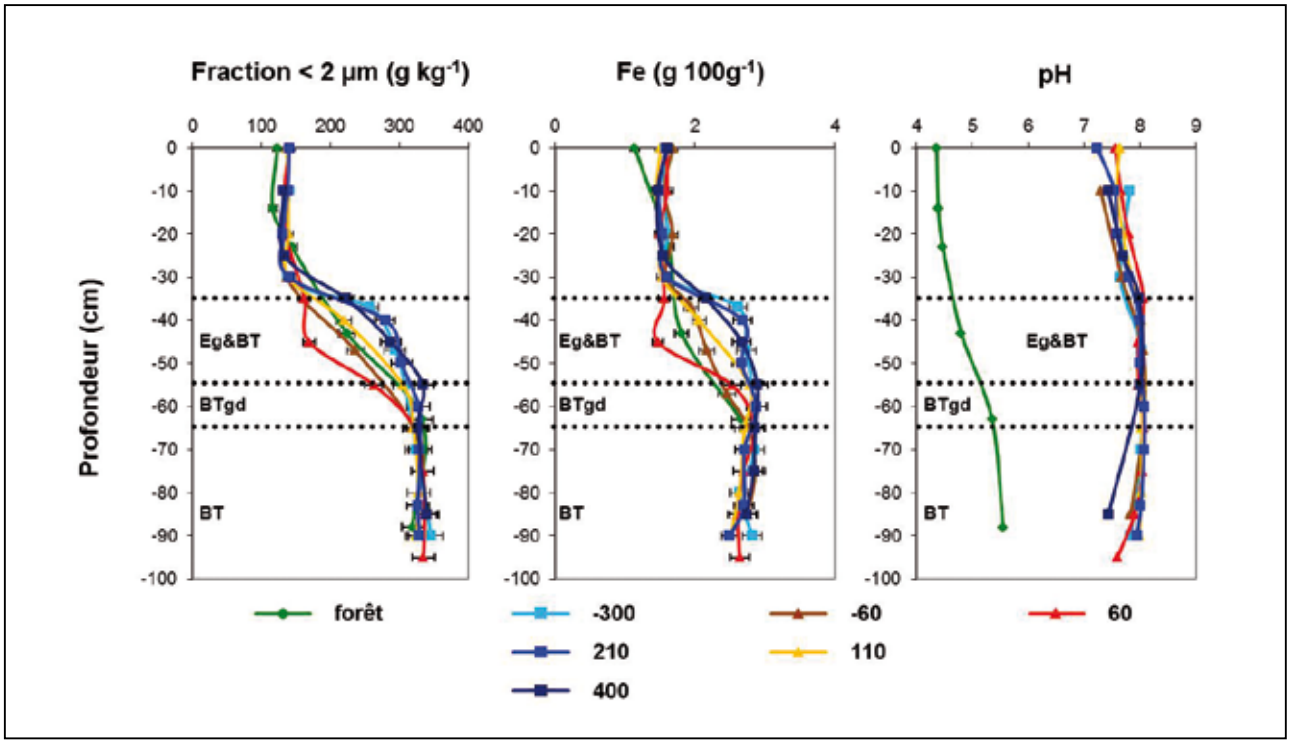
Le solum sous forêt, avec des pH inférieurs à 5,5 et considéré ici comme situation de témoin, se distingue de l'ensemble des sols sous culture dont les pH supérieurs à 7 sont modifiés par un chaulage régulier (*figure 4*). Les concentrations en fraction < 2 µm et en Fe ne varient pas latéralement, ni pour des profondeurs supérieures à 70 cm, ni dans les 30 à 40 premiers centimètres (*figure 4*). Ce résultat suggère i) que les différents sols étudiés se sont développés dans un matériel parental unique, et ii) une même intensité des redistributions verticale de la fraction < 2 µm et du fer, *i.e.* de l'éluviation/illuviation primaire à l'origine de la formation de l'horizon BT. Il est ainsi possible de définir une première phase de pédogenèse, commune à l'ensemble des sols étudiés et qui correspond à la période entre la mise en place des limons éoliens et la mise en culture des sols forestiers (*figure 5*). Sa durée est de l'ordre de la dizaine de milliers d'années (van Oort *et al.*, 2013).

Les profils -300, +210 et +400 présentent dans les deux horizons Eg&BT et BTgd des concentrations identiques en fraction < 2 µm et en Fe. Ils se distinguent cependant significativement du solum sous forêt (*figure 4*). Ces résultats attestent de l'existence d'une seconde phase de pédogenèse d'intensité homogène, au moins à l'échelle de la tranchée (*figure 5*). L'absence de réponse aux gradients des flux d'eau et des conditions d'oxydo-réduction attendus suite à l'implantation d'un réseau de drainage (Montagne *et al.*, 2009) pour ces trois sols suggère que l'évolution des sols prélevés pour des distances au drain supérieures à 2 mètres peut être considérée comme indépendante du drainage (ou pas encore appréciable dans un laps de temps de 16 ans). Ces trois solums sont ainsi considérés comme représentatifs d'une deuxième phase d'évolution des sols débutant avec la mise en culture des sols forestiers et s'arrêtant avec l'implantation du réseau de drainage (*figure 5*).

Enfin les solums aux positions -60, +60 et +110 présentent des concentrations en fraction < 2 µm et en Fe dans l'horizon Eg&BT significativement inférieures à celles mesurées dans les sols cultivés aux positions -300, +210 et +400. Dans le solum à la position +60, les concentrations en fraction < 2 µm et en Fe sont par ailleurs significativement inférieures à celles observées sous forêt *(figure 4).*

Figure 4 - Profils de concentrations en fraction < 2 µm (g kg^{-1}), Fe (g 100g^{-1}) et pH pour le sol sous forêt et le sol cultivé aux positions -300, -60, +60, +110, +210 et +400. Les barres d'erreurs représentent ± 5 %.

Figure 4 - Depth distribution of the concentrations in fraction < 2 µm (g kg^{-1}), in Fe (g 100g^{-1}) and of pH in the forest soil and the cultivated soil at positions -300, -60, +60, +110, +210 and +400. Error bars are of ± 5 %.



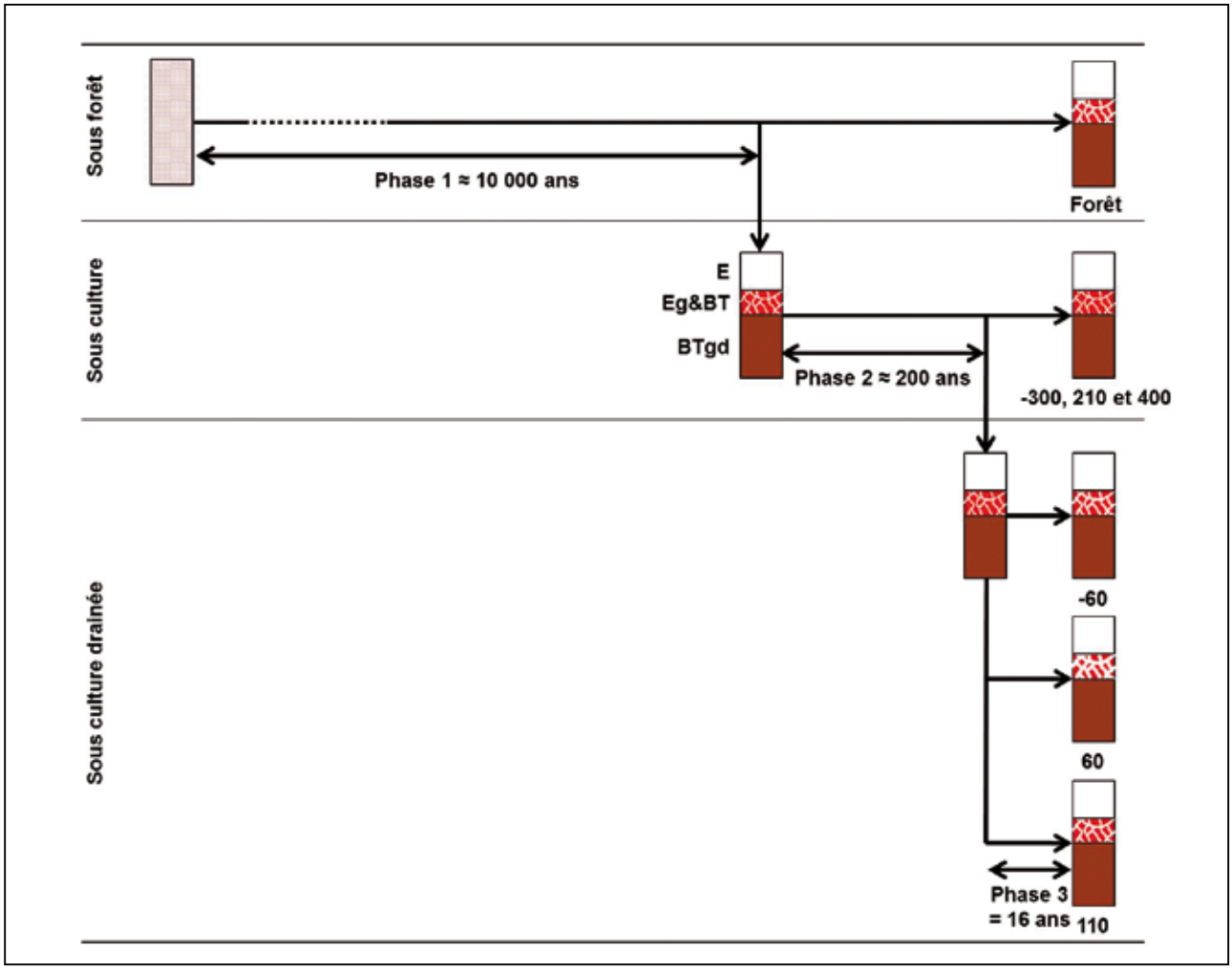
De la dégradation géochimique à la dégradation physique : différents processus pour un même résultat macroscopique

Quel que soit le solum considéré, la dégradation morphologique des volumes ocre en volumes gris-clair et brun-pâle se traduit par des pertes de fraction < 2 µm (flux négatifs, *figure 6*), ainsi que de Fe et Mn (données non présentées ici). L'absence de gains (flux positifs, *figure 6*) indique que la totalité de la fraction < 2 µm mobilisée est exportée des deux horizons Eg&BT et BTgd (*figure 6*). La formation des volumes noirs fossilise le cœur des volumes ocre par précipitation de Mn et dans une moindre mesure de Fe (Cornu *et al.*, 2004, 2012a ; Montagne *et al.,* 2008, 2013). Cette fixation de tout ou partie du Mn et Fe libéré par la dégradation des volumes ocre s'accompagne d'une évolution des formes du fer et du manganèse de la goethite et de la ferrihydrite vers des oxy-hydroxydes de Mn et une nouvelle forme de ferrihydrite, particulièrement riche en Mn (Montagne *et al.*, 2008). De telles évolutions minéralogiques sont caractéristiques des redistributions de Fe et Mn sous l'effet des processus d'oxydo-réduction (McDaniel et Buol, 1991 ; Stolt *et al.*, 1994). La formation des volumes dégradés se traduit également par i) l'apparition, notamment sous forêt, d'argiles hydroxy-alumineuses caractéristiques d'une évolution en conditions acides et ii) une diminution de l'abondance relative des minéraux argileux gonflants au profit de l'illite et de la chlorite (Cornu *et al.*, 2012b). L'ensemble de ces évolutions morphologiques, granulométriques, chimiques et minéralogiques sont concordantes avec les descriptions du phénomène de dégradation morphologique disponibles dans la littérature (De Coninck *et al.*, 1976 ; Jamagne, 1978 ; Pédro *et al.*, 1978 ; Jamagne *et al.*, 1984 ; Payton, 1993a, b ; Van Ranst et De Coninck, 2002).

Quant aux redistributions de manganèse, sous forêt, elles tendent à se faire sans pertes ni gains à l'échelle des deux horizons Eg&BT et BTgd (flux totaux inférieurs à leurs incertitudes ; *tableau 1*). Entre 35 et 60 g m^{-2} de manganèse sont ainsi redistribués depuis les volumes dégradés vers les volumes noirs (Montagne *et al.*, 2012). La position +400 montre également des flux totaux de manganèse de l'ordre de l'incertitude (*tableau 1*) et donc essentiellement des redistributions locales de manganèse depuis les volumes dégradés vers les volumes noirs. Les quantités de Mn redistribuées des volumes gris-clair et brun-pâle vers les volumes noirs diminuent néanmoins d'un

Figure 5 - Anthropo-chrono-séquence et phases d'évolution des LUVISOLS DÉGRADÉS : impact de la mise en culture et du drainage agricole.

Figure 5 - *Anthropo-chrono-sequence and evolution steps of Albeluvisol : cultivation and drainage.*



facteur 2 avec la mise en culture (Montagne *et al.*, 2012). La mise en culture se traduit donc par une moindre mobilité du manganèse. Cette limitation de la mobilité des éléments sensibles aux variations des conditions d'oxydo-réduction est encore plus marquée pour le fer, dont la distribution spatiale se distingue de celle du manganèse avec la mise en culture (Cornu *et al.*, 2007). En effet, pour un même potentiel d'oxydo-réduction, la solution du sol est sous saturée en Fe sous forêt alors qu'elle est à l'équilibre avec les oxydes de fer sous culture du fait de l'augmentation de pH de deux unités (Cornu *et al.*, 2007). Le fer devient alors pratiquement immobile avec la mise en culture. Le chaulage est ainsi à l'origine d'une diminution de l'intensité des processus de réduction. A la position +400, on observe également une diminution des pertes de fraction <2 µm (*figure 6*) et de Fe (*tableau 1*) par rapport à la forêt, caractérisant un phénomène de dégradation morphologique moins intense. L'intensité du phénomène de dégradation est donc sous contrôle de l'intensité des processus de réduction à l'origine de la dissolution des oxy-hydroxydes de Fe (*figure 7*). On parlera alors de dégradation géochimique.

Le réseau de drainage induit i) une augmentation de l'intensité et de la vitesse des flux d'eau de subsurface, ii) l'apparition de flux d'eau latéraux en direction des drains et iii) l'apparition d'un gradient de conditions d'oxydo-réduction avec des conditions plus oxydantes à proximité immédiate des drains (Montagne *et al.*, 2009). Sous l'effet de ces modifications, le manganèse initialement redistribué verticalement entre volumes, sans gain ni perte à l'échelle du solum (forêt et position +400), est redistribué latéralement en direction des drains à une échelle métrique. La précipitation de Mn sous forme de concrétions et

Tableau 1 - Stocks estimés avant le développement de la dégradation morphologique, stocks actuels et flux totaux en fraction < 2 µm, Fe et Mn sous forêt et sous culture aux positions -300, -60, +60, +110, +210 and +400.

Table 1 - *Stocks before the initiation of the morphological degradation, current stocks and total fluxes in the soil fraction < 2 µm, Fe and Mn under forested and at the positions -300, -60, +60, +110, +210 and +400 under cultivation.*

		Forêt	Culture					
			-300	-60	60	110	210	400
Fraction <2µm (kg m^{-2})	Stock initial	205	184	184	210	184	184	180
	Stock actuel	114	145	139	103	132	147	143
	Flux	**-91 ± 56**	**-38 ± 24**	**-44 ± 27**	**-108 ± 68**	**-51 ± 32**	**-36 ± 22**	**-37 ± 23**
Fe (g m^{-2})	Stock initial	22 700	20 400	20 400	23 300	20 400	20 000	20 000
	Stock actuel	10 500	14 700	14 300	10 800	14 400	15 400	14 900
	Flux	**-12 200 ± 7 700**	**-5 800 ± 3 800**	**-6 100 ± 4 700**	**-12 600 ± 7 800**	**-6 100 ± 5 500**	**-4 600 ± 3 800**	**-5 100 ± 3 200**
Mn (g m^{-2})	Stock initial	115	102	102	117	103	100	100
	Stock actuel	143	207	204	316	229	194	123
	Flux	**+28 ± 60**	**+105 ± 62**	**+101 ± 80**	**+199 ± 123**	**+126 ± 90**	**+93 ± 60**	**+22 ± 31**

ségrégations ferro-manganiques dans les zones les plus oxydantes occasionne alors des gains absolus de Mn pour l'ensemble des positions -300, -60, +60, +110 et +210 (*tableau 1*). Le drainage affecte donc les redistributions de manganèse, et par là même l'évolution des sols, sur des distances de plusieurs mètres de part et d'autre du drain.

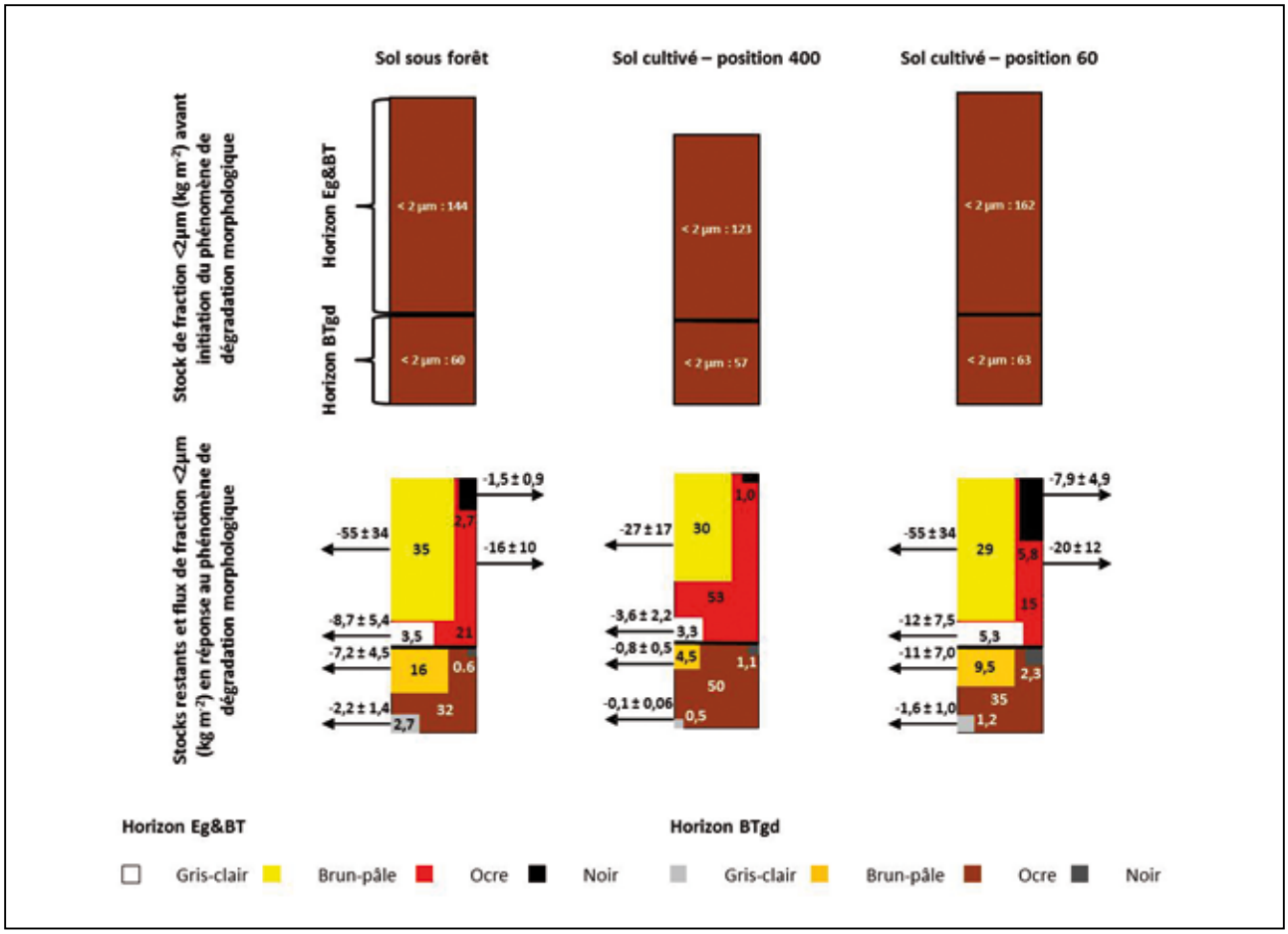
La position +60 se caractérise par des pertes très importantes de fraction < 2 µm (*figure 6*) et de Fe (*tableau 1*) conduisant i) à la formation des volumes dégradés gris-clair et brun-pâle comme pour les autres positions, mais aussi ii) à des pertes significatives de fraction < 2 µm (*figure 6*) et de Fe depuis les volumes ocre de l'horizon Eg&BT. Les pertes de Fe concernent toutes les espèces minérales contenant du fer dans des proportions similaires, y compris le fer inclus dans les réseaux cristallins des minéraux argileux (Montagne *et al.*, 2008). Les exportations de Fe ne sont pas sous contrôle du processus de réduction sélectif des formes de Fe faiblement cristallisées. Ce résultat est par ailleurs cohérent avec des conditions à proximité des drains plutôt favorables au processus d'oxydation. Les pertes de minéraux argileux concernent principalement les smectites et les interstratifiés illite-smectite (Montagne *et al.*, 2008 ; Cornu *et al.*, 2012b). L'enrichissement en smectites des particules récoltées à la sortie du réseau de drainage par rapport à l'ensemble des différents volumes de sol, confirme que les exportations de fraction fine sont le résultat d'un processus d'éluviation (Cornu *et al.*, 2012b). L'intensité particulièrement marquée du phénomène de dégradation morphologique à la position 60 s'explique ainsi par une augmentation de l'intensité du processus d'éluviation en réponse à l'augmentation de l'intensité des flux d'eau. Cette dernière s'explique par i) une augmentation de la connectivité des volumes dégradés entre les positions +110 et +60 (Cornu *et al.*, 2012a) et ii) une conductivité hydrique supérieure des volumes dégradés par rapport aux volumes ocre (Frison *et al.*, 2009). Le phénomène de dégradation morphologique est donc ici piloté par un phénomène physique : l'éluviation (*figure 7*). L'intensification du processus est toutefois spatialement limitée à la proximité immédiate du drain contrairement à l'impact sur les accumulations de manganèse qui sont quantifiables sur plusieurs mètres de part et d'autre du drain.

Des perturbations anthropiques à l'origine d'une évolution intense et rapide

La dégradation morphologique sous forêt a conduit sur une durée de l'ordre de la dizaine de milliers d'années, à l'exportation de 90 kg m^{-2} de fraction < 2 µm (*figure 6*, *tableau 1*), de 12 200 g m^{-2} de fer (*tableau 1*) et à des redistributions entre volumes d'environ 35 à 60 g m^{-2} de Mn soit environ 45 %, 55 % et 30 % des stocks de fraction < 2 µm, de Fe et de Mn initialement contenus dans l'horizon illuvial non dégradé. Après la mise en culture, le chaulage a permis d'éviter des pertes d'environ 50 kg m^{-2} de fraction < 2 µm (*figure 6*, *tableau 1*), de

Figure 6 - Stocks et flux en fraction < 2 µm (en kg m^{-2}) dans chaque volume de sol constitutif des deux horizons Eg&BT et BTgd. Les flux ont été calculés en considérant les volumes ocre de l'horizon BTgd comme référence et représentent donc les flux induits par le phénomène de dégradation morphologique. Seuls les bilans du sol sous forêt et du sol cultivé aux deux positions +400 et +60 sont présentés. La taille des rectangles schématisant chaque volume est proportionnelle à l'abondance relative du volume considéré. Les nombres affichés dans les rectangles indiquent les stocks dans le volume considéré. Des flux négatifs correspondent à des pertes et une absence de flux indique un flux nul.

Figure 6 - *Stocks and losses of fraction < 2 µm (kg m^{-2}) in the forested soil and in the cultivated soil at position +400 and +60. Fluxes were estimated considering the ochre volume of the BTgd-horizon as the initial reference stage. They thus represent fluxes induced by "morphological degradation". The rectangles represent the different soil volumes, with an area proportional to their relative abundance. The numbers indicate the stock contained in the soil volumes. Negative fluxes correspond to losses and a lack of flux corresponds to a null flux.*

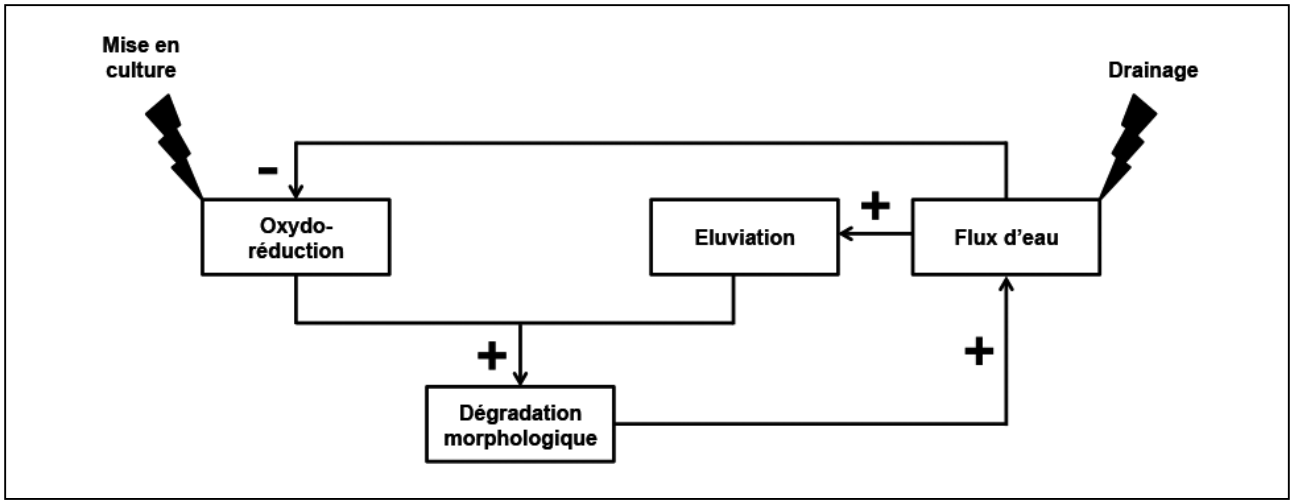


7 000 g m^{-2} de fer (*tableau 1*) et de limiter à 30 à 40 g m^{-2} les redistributions de Mn pour la position +400. Enfin, le réseau de drainage a conduit localement (position +60) à l'exportation de 70 kg m^{-2} de fraction < 2 µm et de 7 500 g m^{-2} de fer en 16 ans (*tableau 1*). Les flux de matières, évités ou produits sous l'effet des pratiques de chaulage et du drainage agricole, respectivement, sont donc du même ordre de grandeur que les flux de matière relatifs à la formation des sols sur le long terme tels qu'ils peuvent être observés dans les sols sous forêt. Des évolutions d'amplitude comparable pourraient être induites par le changement climatique d'ici à 2100 (Montagne et Cornu, 2010).

Le phénomène de dégradation morphologique est classiquement considéré comme un phénomène rapide avec un pas de temps spécifique compris entre la centaine et le millier d'années (Yaalon, 1971 ; Chadwick et Chorover, 2001 ; Targulian et Krasilnikov, 2007). Or, nos résultats suggèrent que cette dégradation morphologique serait bien plus rapide que communément admis : seulement quelques dizaines d'années d'activités anthropiques suffisent pour induire une différentiation quan-

Figure 7 - Dégradation morphologique géochimique sous contrôle des processus d'oxydo-réduction et dégradation morphologique physique. Boucle de rétroaction flux d'eau, éluviation et structure. Impact principal de la mise en culture et du drainage agricole. + et (-) se rapportent à l'effet du drainage.

Figure 7 - *Geochemical morphological degradation controlled by redox processes and physicanl morphological degradation. Feed-back between water fluxes, eluviation and soil structure. First impact of cultivation and agricultural drainage. + and (-) are relative to the impact of agricultural drainage.*



tifiable et observable macroscopiquement dans les sols. Par ailleurs, si l'approche choisie n'a pas permis de quantifier la dynamique des différents processus élémentaires impliqués dans la dégradation morphologique, elle a cependant permis de montrer leur succession dans le temps. La désintégration partielle des volumes ocre par réduction des oxy-hydroxydes semble ainsi être un préalable à l'augmentation de l'intensité de l'éluviation (Cornu *et al.*, 2012a). Finalement, une telle succession des processus laisse supposer qu'au moins certains d'entre eux n'ont été actifs que sur une durée inférieure aux 16 années de drainage. La dynamique réelle de tels processus serait alors d'autant plus rapide.

Effets de seuils et chaos

Les pertes de fraction <2 µm et de Fe sont plus faibles à la position -60 qu'à la position +60 malgré des distances au drain identiques (*tableau 1*). L'influence du réseau de drainage sur la dégradation morphologique n'est donc pas symétrique de part et d'autre du drain. Une légère pente existe sur la partie gauche du drain (*figure 3*). La position -60 est en amont de la position -300 alors que l'ensemble des eaux arrivant de la partie droite s'accumule à la position +60. La différence d'abondance des flux d'eau explique donc le différentiel d'intensité de dégradation morphologique autour du drain. Ainsi, les variations d'intensité de l'impact du drainage dépendent de l'action combinée du drain et de la pente sur la direction et l'intensité des flux d'eau, soulignant la sensibilité de la réponse des sols aux conditions initiales telles que la microtopographie. Une fois initié par le drainage, l'éluviation provoque i) l'augmentation de la porosité et de la conductivité hydraulique des volumes gris-clair et brun-pâle dégradés par rapport aux volumes ocre au fur et à mesure de l'exportation des particules fines (Frison *et al.*, 2009), ii) l'augmentation de l'abondance relative des volumes dégradés (*figure 6*) se traduisant finalement par iii) l'apparition d'une connectivité spatiale et donc hydraulique entre les différentes langues de dégradation auparavant séparées par des volumes ocre (Cornu *et al.*, 2012a). Ces deux évolutions de la structure des horizons Eg&BT - au sens de l'organisation spatiale des volumes dégradés et non dégradés - et des propriétés physiques des volumes dégradés sont favorables à une accélération des flux d'eau traversant les volumes dégradés et finalement à une augmentation de l'intensité du processus d'éluviation (*figure 7*). L'apparition de cette boucle de rétroaction positive liant structure du sol, intensité des flux d'eau et transfert de matière permet l'auto entretien, voire l'emballement, du phénomène de dégradation morphologique (*figure 7*). De petites variations de topographies sont ainsi susceptibles de conduire à des évolutions divergentes des sols ou, autrement dit, à une différenciation toujours plus marquée et finalement une distribution spatiale chaotique des sols (Phillips *et al.*, 1996 ; Phillips, 2001).

Par ailleurs, l'évolution des sols en réponse au drainage n'est pas linéaire dans le temps mais subit plus vraisemblablement des accélérations brutales correspondant au franchissement de seuils successifs dont, par exemple, l'apparition

d'une connectivité spatiale et hydraulique entre les différentes langues de dégradation (Cornu *et al.*, 2012a). Il semble ainsi que l'évolution des sols soit non seulement divergente dans l'espace mais aussi irrégulière dans le temps.

CONCLUSION

Au cours de ces dix années de recherche portant sur l'étude des impacts de l'usage des sols et des aménagements agricoles sur la dynamique de la dégradation morphologique, nous avons démontré que la mise en culture est un facteur d'évolution des sols capable de ralentir le phénomène de dégradation morphologique, du fait du chaulage, ou au contraire de l'accélérer, suite à l'implantation d'un réseau de drainage. Dans ces deux situations, l'impact cumulé des pratiques agricoles sur des périodes de quelques dizaines à centaines d'années est suffisant pour induire une différenciation des sols d'amplitude comparable à celle induite par les processus de formation long terme.

La prise en compte des pratiques anthropiques comme un des facteurs de pédogenèse a permis de confirmer et de compléter les connaissances existantes sur le phénomène de dégradation morphologique. Ainsi, sous forêt, les processus d'oxydo-réduction sont nécessaires au développement du phénomène de dégradation morphologique. En revanche, la dégradation morphologique sous l'impact du drainage semble principalement sous contrôle des processus de transfert particulaire, sans réduction préalable des oxy-hydroxydes de fer. Ainsi, plusieurs processus pédologiques d'intensité et de vitesse variables en fonction des conditions environnementales peuvent générer, dans le même type de sol, une même propriété macroscopique.

Chaque processus pédologique élémentaire, dans notre cas éluviation, d'une part, et oxydo-réduction, d'autre part, répond aux perturbations des conditions environnementales d'origine anthropique avec un pas de temps et d'espace spécifique. Les dynamiques de réponse de ces processus sont i) complexes du fait d'effets de seuils et de boucles de rétroaction, et ii) plus rapides que ce qui est communément admis.

L'évolution des sols est sensible aux conditions initiales (microtopographie, histoire des pratiques agricoles…) et divergente. La combinaison de ces deux caractéristiques est susceptible de conduire à des évolutions des sols, certes déterministes, mais chaotiques dans le temps et l'espace et, de ce fait, difficiles à prédire. Prédire et modéliser de telles évolutions nécessiteront d'être capable de rendre compte de dynamiques à effets de seuil particulièrement complexes liant la structure des sols et l'intensité des différents processus pédologiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région Centre pour son soutien financier et toutes celles et tous ceux qui ont participé à des degrés divers à ces dix années de travail collaboratif dont : A. Besnault, L. Caner, J. Daroussin, A. Frison, O. Josière, C. Le Lay et E. Le Guirriec. Les auteurs remercient R. Paradelo pour la traduction en espagnol du résumé. Finalement, les auteurs remercient sincèrement F. van Oort pour ses remarques et suggestions constructives.

BIBLIOGRAPHIE

Afes, 2009 - Référentiel Pédologique 2008. Editions QUAE, Versailles, 405 p.

Baize D. et Voilliot J.P., 1988 - Notice de la carte des sols de l'Yonne à 1/50000, feuille Joigny. Station agronomique de l'Yonne, Auxerre, France, 142 p.

Barbiero L., Mohan Kumar M.S., Violette A., Oliva P., Braun J.J., Kumar C., Furian S., Babic M., Riotte J. et Valles V., 2010 - Ferrolysis induced soil transformation by natural drainage in Vertisols of sub-humid South India. *Geoderma* 156 - pp. 173-188.

Bidwell O.W. et Hole F.D., 1965 - Man as a factor of soil formation. *Soil Science* 99 - pp. 65-72.

Brimhall G.H., Alpers C.N. et Cunningham A.B., 1985 - Analysis of supergene ore-forming processes and ground-water solute transport using mass balance principles. *Economic Geology* 80 - pp. 1227-1256.

Brimhall G.H., Lewis C.J., Ford C., Bratt J., Taylor G. et Warin O., 1991 - Quantitative geochemical approach to pedogenesis : importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. *Geoderma* 51 - pp. 51-91.

Cadastre, 1828 - Plan cadastral parcellaire au 1/4 000e de la commune de Chevillon, canton de Charny, arrondissement de Joigny, département de l'Yonne, Archives départementales de l'Yonne.

Chadwick O.A. et Chorover J., 2001 - The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma* 100 - pp. 321-353.

Cornu S., Montagne D., Daroussin J. et Cousin I., 2012a - Image-analytically derived conceptual model of Albeluvisol morphological degradation induced by artificial drainage in France. *Geoderma* 189–190 - pp. 296-303.

Cornu S., Montagne D., Hubert F., Barré P. et Caner L., 2012b - Evidence of short-term clay evolution in soils under human impact. *Comptes Rendus Geoscience* 344 - pp. 747-757.

Cornu S., Montagne D., Maguin F., Le Lay C., Chevallier P. et Cousin I., 2007 - Influence of human impacts on Albeluvisol analysed by X-ray microfluorescence : Relative evolution of the transforming front at the tongue scale. *Science of The Total Environment* 377 - pp. 244-254.

De Coninck F., Favrot J.C., Tavernier R. et Jamagne M., 1976 - Dégradation dans les sols lessivés hydromorphes sur matériaux argilo-sableux : exemple des sols de la nappe détritique bourbonnaise (France). *Pédologie* 26 - pp. 105-151.

Driese S.G., Mora C.I., Stiles C.A., Joeckel R.M. et Nordt L.C., 2000 - Mass-balance reconstruction of a modern vertisol : Implications for interpreting the geochemistry and burial alteration of paleo-vertisols. *Geoderma* 95 - pp. 179-204.

Egli M. et Fitze P., 2000 - Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements : A revision. *Soil Science* 165 - pp. 437-443.

Frison A., Cousin I., Montagne D. et Cornu S., 2009 - Soil hydraulic properties in relation to local rapid soil changes induced by field drainage : a case study. *European Journal of Soil Science* 60 - pp. 662-670.

Jamagne M., 1978 - Soil-forming processes in a progressive evolutionary sequence on loessial silty formation in a cold and humid temperate zone.

Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Paris 286 - pp. 25-27.

Jamagne M., De Coninck F., Robert M. et Maucorps J., 1984 - Mineralogy of clay fractions of some soils on loess in northern France. *Geoderma* 33 - pp. 319-342.

Jenny H., 1941 - Factors of soil formation. Mc Graw-Hill, New-York, 281 p.

Langley-Turnbaugh S.J. et Bockheim J.G., 1998 - Mass balance of soil evolution on late quaternary marine terraces in coastal Oregon. *Geoderma* 84 - pp. 265-288.

Langohr R., 2001 - L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien - Apports de l'archéopédologie. *Etude et Gestion des Sols* 8 -pp. 103-118.

Lin H., 2011 - Three Principles of Soil Change and Pedogenesis in Time and Space. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 -pp. 2049-2070.

Lozet J. et Mathieu C., 2002 - Dictionnaire de Science du sol. Lavoisier Techniques et Documentation, Paris, 575 p.

McDaniel P.A. et Buol S.W., 1991 - Manganese distributions in acid soils of the North Carolina Piedmont. *Soil Science Society of America Journal* 55 - pp. 152-158.

Montagne D. et Cornu S., 2010 - Do we need to include soil evolution module in models for prediction of future climate change? *Climatic Change* 98 - pp. 75-86.

Montagne D., Cornu S., Le Forestier L. et Cousin I., 2009 - Soil drainage as an active agent of the recent soil evolution : a review. *Pedosphere* 1 - pp. 1-13.

Montagne D., Cornu S., Le Forestier L., Hardy M., Josiere O., Caner L. et Cousin I., 2008 - Impact of drainage on soil-forming mechanisms in a French Albeluvisol : input of mineralogical data in mass-balance modelling. *Geoderma* 145 - pp. 426-438.

Montagne D., Cousin I. et Cornu S., 2012 - From a geochemically to a physically-driven soil bleaching : the role of agricultural practices - Proceedings of the conference Eurosoil 2012, Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment, Bari, Italy, 2 to 6 July 2012.

Montagne D., Cousin I., Josière O. et Cornu S., 2013 - Agricultural drainage-induced Albeluvisol evolution : A source of deterministic chaos. *Geoderma* 193–194 - pp. 109-116.

Montagne D., Cousin I., Le Forestier L., Daroussin J. et Cornu S., 2007 - Quantification of soils volumes in the Eg&Bt-horizon of an Albeluvisol using image analysis. *Canadian Journal of Soil Science* 87 - pp. 51-59.

Nicole J., Coquet Y., Vachier P., Michelin J. et Dever L., 2003 - Fonctionnement hydrodynamique et différenciation pédologique d'une couverture de sols limoneux hydromorphes en Bassin Parisien. *Etude et gestion des Sols* 10 - pp. 173-190.

van Oort F., Thiry M., Foy E., Fujisaki K. et Van Vliet-Lanoë B., 2013 - Pédogenèse polyphasée et transfert de polluants métalliques contraints par des structures cryogéniques. Le cas des sols sous épandages massifs d'eaux usées dans la plaine agricole de Pierrelaye. *Etude et Gestion des Sols* 20 - pp. 7-26.

Payton R.W., 1993a - Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *Journal of Soil Science* 44 -pp. 703-723.

Payton R.W., 1993b - Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. III. Micromorphological, SEM and EDXRA studies of fragipan degradation and the development of glossic features. *Journal of Soil Science* 44 - pp. 725-739.

Pédro G., Jamagne M. et Begon J.C., 1978 - Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma* 20 - pp. 173-189.

Phillips J.D., 2001 - Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability. *Catena* 43 - pp. 101-113.

Phillips J.D., Perry D., Garbee A.R., Carey K., Stein D., Morde M.B. et Sheehy J.A., 1996 - Deterministic uncertainty and complex pedogenesis in some Pleistocene dune soils. *Geoderma* 73 - pp. 147-164.

Richter D.d.B. Jr., 2007 - Humanity's transformation of earth's soil : pedology's new frontier. *Soil Science* 172 - pp. 957-967.

Richter D.d.B. Jr. et Markewitz D., 2001 - Understanding soil change. Soil sustainability over millennia, centuries and decades. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 255 p.

Stolt M.H., Ogg C.M. et Baker J.C., 1994 - Strongly contrasting redoximorphic patterns in Virginia Valley and Ridge paleosols. *Soil Science Society of America Journal* 58 - pp. 477-484.

Targulian V.O. et Krasilnikov P.V., 2007 - Soil system and pedogenic processes : Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71 - pp. 373-381.

Tugel A.J., Herrick J.E., Brown J.R., Mausbach M.J., Puckett W. et Hipple K., 2005 - Soil change, soil survey, and natural resources decision making : A blueprint for action. *Soil Science Society of America Journal* 69 - pp. 738-747.

Van Ranst E. et De Coninck F., 2002 - Evaluation of ferrolysis in soil formation. *European Journal of Soil Science* 53 - pp. 513-519.

Yaalon D.H., 1971 - Soil-forming processes in space and time. *In* : Paleopedology : Origin, Nature and dating of Paleosol (D.H. Yaalon ed.). Israel Univ Press, Jerusalem, pp. 29-39.

Yaalon D.H. et Yaron B., 1966 - Framework for man-made soil changes : an outline of metapedogenesis. *Soil Science* 102 - pp. 272-277.