

Les « terres d'Aubues » de Basse Bourgogne

Nouvelle synthèse et bilan de matières à très long terme

D. Baize

INRA, UR0272 Science du Sol, F-45075 Orléans, France
denis.baize@orleans.inra.fr

RÉSUMÉ

Les terres d'Aubues sont les sols épais de 20 à 180 cm, développés dans les couvertures résiduelles argileuses, rougeâtres, non calcaires, qui subsistent sur les plateaux jurassiques de Basse Bourgogne dans les positions les mieux protégées de l'érosion. Ces sols, probablement très anciens, sont le résultat d'un bilan de matières positif. D'un côté, la libération constante de matières silicatées par dissolution *in situ* des calcaires durs et, de l'autre, des phases sporadiques d'érosion hydrique et l'entraînement continu de particules argileuses dans le réseau karstique sous-jacent, et ce sur plusieurs centaines de milliers d'années.

L'article présente tout ce que l'on sait désormais sur ces terres d'Aubues : homonymies ; position dans les paysages ; morphologie des différents types de sols organisés en une toposéquence d'érosion ; principales propriétés analytiques ; unicité du matériau sur critères granulométriques ; arguments en faveur d'une stricte autochtonie ; propriétés structurales des horizons argileux profonds ; différenciation texturale par illuviation verticale d'argile malgré des textures d'argile lourde ; évolution pédogénétique ultime ; chronoséquences schématiques d'évolution ; estimation de la masse de calcaire à dissoudre pour la naissance des sols les plus épais ; estimation des quantités de matières perdues dans le réseau karstique souterrain ; estimation de l'âge de la couverture pédologique.

Pour la compréhension des processus pédogénétiques successifs comme pour l'estimation des durées, la difficulté principale résulte des nombreux changements qui ont pu intervenir sur de si longues périodes de temps, par exemple des phases d'érosion ou des cryoturbations toujours possibles sous climats périglaciaires. Enfin, les conditions climatiques d'aujourd'hui ne sont en rien révélatrices de celles qui se sont succédé dans le lointain passé.

Mots clés

Plateaux calcaires, pédogenèse, bilan de matières, Bourgogne.

SUMMARY**THE « TERRES D'AUBUES » OF LOWER BURGUNDY : NEW SYNTHESIS AND VERY LONG-TERM MATTER BALANCE**

The « terres d'Aubues » are reddish soils, from 20 to 180 cm thick, developed in a residual non calcareous clay that remain over the Jurassic plateaux in Lower Burgundy (France), located in positions that are best protected against erosion. These soils, probably very old, are the result of a positive matter balance : on the one hand, the constant release of silicated matter resulting from in situ dissolution of hard limestone and, on the other hand, sporadic phases of erosion and continuous translocation of clay particles into the underlying karst network, all those lasting over several hundreds of thousand years.

This article displays all that we know at present about these « terres d'Aubues » : - homonyms ; - position in the landscape ; - morphology of various soil types organized in an erosion toposequence ; - main analytical data ; - uniqueness of the parent material according to particle-size criteria ; - arguments in favour of a strict autochthony ; - structural properties of the deep clayey horizons ; - textural differentiation resulting from vertical clay illuviation in spite of heavy clay textures ; - ultimate soil forming processes ; - diagrammatic chronosequences of evolution ; - assessment of the limestone thickness to be dissolved for giving rise to the most thick soils ; - assessment of the quantity of matter lost in the deep karst ; - estimate of the age of the soil mantle.

For the understanding of successive soil forming processes as well as for the duration assessment, the main difficulty results from the numerous changes that could have been involved over so long periods of time, e.g. some erosion phases or geliturbation under periglacial climates. The current climatic conditions do not at all reveal those which existed in the former periods.

Key-words

Limestone plateaus, pedogenesis, matter balance, Burgundy.

RESUMEN**LAS « TIERRAS DE AUBUES » DE BAJA BORGOÑA : NUEVA SÍNTESIS Y BALANCE DE MATERIA A MUY LARGO PLAZO**

Las tierras de « Aubues » están suelos espesos de 20 a 180 cm, desarrollados en las cubiertas residuales arcillosas, rojizas, no calcáreas, que subsisten sobre las mesetas jurásicas de Baja Borgoña en las posiciones las mejores protegidas de la erosión. Estos suelos, probablemente muy viejos, están el resultado de un balance de materia positivo. De un lado, la liberación constante de materia silicatada por disolución in situ de las rocas calcáreas duras y, del otro lado, de las fases esporádicas de erosión hídrica y el entrenamiento continuo de partículas arcillosas en el karst sub-yacente, y esto durante varias centenas de años.

El artículo presenta todo lo que se sabe ahora sobre estas tierras de « Aubues » : - homonimia ; - posición en los paisajes ; - morfología de los diferentes tipos de suelos organizados en una toposecuencia de erosión ; - principales propiedades analíticas ; - unicidad del material por criterios granulométricos ; - argumentos en favor de una estricta autoctonía ; - propiedades estructurales de los horizontes arcillosos profundos ; - evolución pedogenética última ; - cronosecuencia esquemática de evolución ; - estimación de la masa calcárea a disolver para el nacimiento de los suelos los más espesos ; - estimación de las cantidades de materias perdidas en la red kárstica subterránea ; - estimación de la edad de la cubierta pedológica.

Para la comprensión de los procesos pedogenéticos sucesivos como para la estimación de las duraciones, la principal dificultad resulta de numerosos cambios que pudieron intervenir en tan largos periodos de tiempo. Por ejemplo fases de erosión o de crioturbación siempre posibles bajo clima periglacial. En fin, las actuales condiciones climáticas no son por nada reveladoras de las que se sucedieron en el pasado lejano.

Palabras clave

Mesetas de piedra caliza, pedogénesis, balance de materia, Borgoña.

Les « terres d'Aubues » sont les sols épais de 20 à 180 cm, développés dans les couvertures résiduelles argileuses, non calcaires, qui subsistent sur les plateaux jurassiques de Basse Bourgogne dans les positions les mieux protégées de l'érosion. Elles ont été étudiées dès 1971 par Baize, lequel est revenu à leur étude à plusieurs reprises, au cours de 15 ans de cartographie des sols à moyenne échelle, mais aussi plus tard.

Déjà citées par Raulin et Leymerie (1858) et étudiées pour la première fois par Mantelet et Radet (1937) qui parlent de limons jaunes et d'argiles rouges de décalcification, les terres d'Aubues ont été fort bien décrites par Buffon en 1734 sur son domaine proche de Montbard (*voir encadré 1*). Sur les cartes géologiques, elles ont d'abord été notées LP (limons des plateaux) puis B (couverture limoneuse) et leurs superficies ont été le plus souvent sous-estimées.

Après avoir rappelé un certain nombre de résultats déjà anciens (Baize, 1971 ; Baize 1972a ; Baize 1972b ; Baize, 1991), cet article présentera une nouvelle synthèse des connaissances acquises sur ces sols et exposera les résultats d'un bilan de matières relatif à la pédogenèse à très long terme.

Étymologie - Homonymie

L'étymologie de ce terme vernaculaire est mystérieuse. Trois hypothèses viennent en concurrence : i) du latin « albus » blanc (possible, car ces sols montrent en surface des couleurs claires qui tranchent avec les terres environnantes plus minces souvent rougeâtres), ii) « eau bue » (car ces terres ressuient vite et bien) ou iii) déformation du mot « herbue »

Mais attention, le même mot est utilisé dans d'autres régions françaises, pour des sols totalement différents, par exemple :

- des sols gris-clair, argileux et calcaires issus de craie cénomane ou de marnes turoniennes, du nord de la Vienne ;
- un « limon jaune pâle lessivé, battant, froid, trop humide... » dans la vallée de la Saône, (Plaisance et Cailleux, 1958).

C'est pourquoi il vaut mieux préciser « terres d'Aubues des plateaux de Basse Bourgogne ».

Historique des travaux

Les travaux, tant cartographiques que relatifs aux processus pédogénétiques, se sont succédés sur plus de quarante ans. Ils ont été initiés par Concaret dès 1967.

- soutenance d'une thèse de 3^e cycle (Baize, 1971) ;
- publication de la carte pédologique de France à 1/100 000 - Feuille Tonnerre (Baize, 1980) ;
- cartographie des sols à 1/50 000 dans le département de l'Yonne (1969-1996) - Cartographie assez détaillée (en moyenne 1 sondage pour 12 ha - Baize et Voilliot, 1989) ;
- publication de la « Typologie des sols de l'Yonne - Plateaux de Bourgogne » (Baize, 1989) ;
- thèse d'Ary Bruand (1985) sur les propriétés d'horizons argileux

de terres d'Aubues, puis travaux sur divers types d'horizons argileux (Bruand, 1990 ; Bruand *et al.*, 1988) ;

- un premier article de synthèse est publié dans Science du Sol (Baize, 1991) ;
- présentation d'une fosse en Forêt de Lichères lors d'une tournée post-congrès mondial de Montpellier (Baize, 1998) ;
- analyses des éléments en traces dans les sols de l'Yonne (Baize, 1997).
- ouverture de 3 fosses en Forêt de Lichères dans le cadre d'une école de pédologie de terrain (2008).

LE CADRE NATUREL GÉNÉRAL LES PLATEAUX JURASSIQUES DE BASSE BOURGOGNE

Localisation

La *figure 1* présente le cadre géographique de la Basse Bourgogne du département de l'Yonne. Évidemment, les mêmes sols peuvent être observés dans les départements voisins : la Nièvre, la Côte d'Or (en Châtillonnais - Chrétien, 2000), et dans l'Aube (plateaux du Barrois).

Les roches et les formations superficielles

Les roches sont des sédiments marins qui se succèdent depuis le *Calcaire à entroques* du Bajocien (Jurassique moyen) jusqu'au *Calcaire à spatanges* de l'Hauterivien (Crétacé inférieur). Il s'agit soit de calcaires durs (calcaires purs et durs dits « sublithographiques », calcaires durs marneux ou à intercalations marneuses, calcaires bioclastiques, calcaire à oolithes ferrugineuses), soit de calcaires tendres (souvent crayeux et récifaux), soit de marnes.

Les formations superficielles sont de deux catégories :

- des argiles résiduelles générées par décarbonatation totale *in situ*. Les unes sans éléments grossiers (séquence des terres d'Aubues) d'autres contenant de nombreux éléments grossiers siliceux (argiles à chailles).
- diverses formations de versants mises en place au Quaternaire sous climat périglaciaire : limono-caillouteuses, argilo-caillouteuses et « grèzes litées ».

Le relief

La Basse Bourgogne est peu affectée par la tectonique. En conséquence des alternances de roches dures (divers calcaires durs) et de roches tendres (marnes, calcaires tendres) et du pendage < 2 % vers le nord-ouest, l'architecture générale montre une succession de cuestas (d'importance variable) et de surfaces structurales (*figure 2*). Les plateaux de l'Oxfordien sont

beaucoup plus tabulaires que ceux formés par les calcaires du Portlandien, beaucoup plus disséqués.

Cette région naturelle est caractérisée par des formes et un régime hydrologique karstiques : dolines d'effondrement, lapiaz en saillie ou souterrains, réseau très hiérarchisé de vallons secs, circulations d'eau souterraines sans rapport avec le relief, pertes et résurgences vauclusiennes dans les grandes vallées.

Actions paléoclimatiques

L'action des climats des périodes les plus froides du Quaternaire se marque dans les paysages par la gélifraction et la cryoturbation des calcaires durs (réseau polygonal de fentes en coin) et la mise en place de formations de versants de divers types, notamment des « grèzes litées » dites aussi « éboulis cryoclastiques » sur les versants en expositions les plus froides, exposés au nord-est ou plein est.

Actions humaines

L'occupation humaine est très ancienne comme en attestent de nombreux vestiges depuis le paléolithique (grottes d'Arcy-sur-Cure) jusqu'à l'homme moderne, en passant par l'antiquité celtique, gauloise, romaine. L'influence de ces occupations s'est manifestée par :

- des déboisements anciens et la mise en culture ayant provoqué des phénomènes d'érosion sur les coteaux les plus raides, avec accumulation concomitante de terre fine dans les fonds de vallons ;
- des épierrages des sols les plus caillouteux, avec formation de murets de pierres sèches ou « meurgers » ;
- la fragmentation des cailloux calcaires les plus friables par les outils et la gélifraction spontanée en surface. Ainsi, les sols les plus minces (25 à 35 cm) montrent une terre fine calcaire aux alentours immédiats des villages, ce qui n'est toujours pas le cas des sols minces demeurés sous forêts ou loin des bourgs.
- suite à la fertilisation, à des chaulages et amendements, les sols naturellement modérément acides ont vu leur pH remonter jusqu'à la neutralité.
- sous vignes (Chablisien, Auxerrois, Tonnerrois) : défonçages,

contaminations par du sulfate de cuivre, remontées de terre et, désormais, remodelage des versants au bulldozer ont eu et ont encore de gros impacts.

Climat actuel

Précipitations moyennes annuelles sur la période 1956-1970 :

AUXERRE : 632 mm CHABLIS : 731 mm
TONNERRE : 747 mm NOYERS : 791 mm

La température moyenne annuelle s'établit à 10°7 à Auxerre. Des gelées tardives de printemps font peser un grave danger sur les vignes (notamment à Chablis). Le climat est relativement doux et sec le long de la vallée de l'Yonne, plus arrosé et plus continental vers l'est et le sud-est. Mais les précipitations ont probablement beaucoup diminué depuis 300 ans car de nombreux moulins ont été construits dans des vallons désormais dénués d'écoulements de surface.

Végétation actuelle

Elle ne semble pas constituer un facteur pédogénétique majeur. Les associations végétales sont indicatrices des conditions de pH et/ou richesse en azote, calcium et des conditions hydriques : elles peuvent être, selon les types de sols et l'exposition, acidiphiles, neutrophiles, calcicoles, xérocalcicoles...

Les deux grands axes de géomorphogenèse et de pédogenèse selon la dureté des calcaires

Le schéma présenté ci-dessous (*tableau 1*) n'est pas seulement valable en Basse Bourgogne. Il l'est également sous les climats tempérés ayant connu les phases froides du Quaternaire (périglacière) et connaissant encore le gel.

Tableau 1 - Géomorphogenèse et pédogenèse en fonction de la dureté des calcaires.

Table 1 - *Geomorphogeny and pedogenesis according to the limestone hardness.*

	CALCAIRES DURS et PEU GÉLIFS	CALCAIRES TENDRES, POREUX et GÉLIFS	
Reliefs tabulaires : - plateaux - replats - surfaces structurales	-	-	Versants
	Processus dominant : DISSOLUTION du CaCO ₃	Processus dominant : FRAGMENTATION	
	Accumulation <i>in situ</i> du résidu silicaté	Formations de versants calcaires	
	-	-	
	Sols minces calcaires	Sols toujours calcaires	
	Brunification puis illuviation d'argile	Décarbonatation progressive mais incomplète	

Figure 1 - Les plateaux de Basse Bourgogne dans le département de l'Yonne. En gris : localisation des « argiles à chailles ». **Figure 1** - The Jurassic plateaux of Lower Burgundy in the département « Yonne ». In grey : location of the « clay with cherts ».

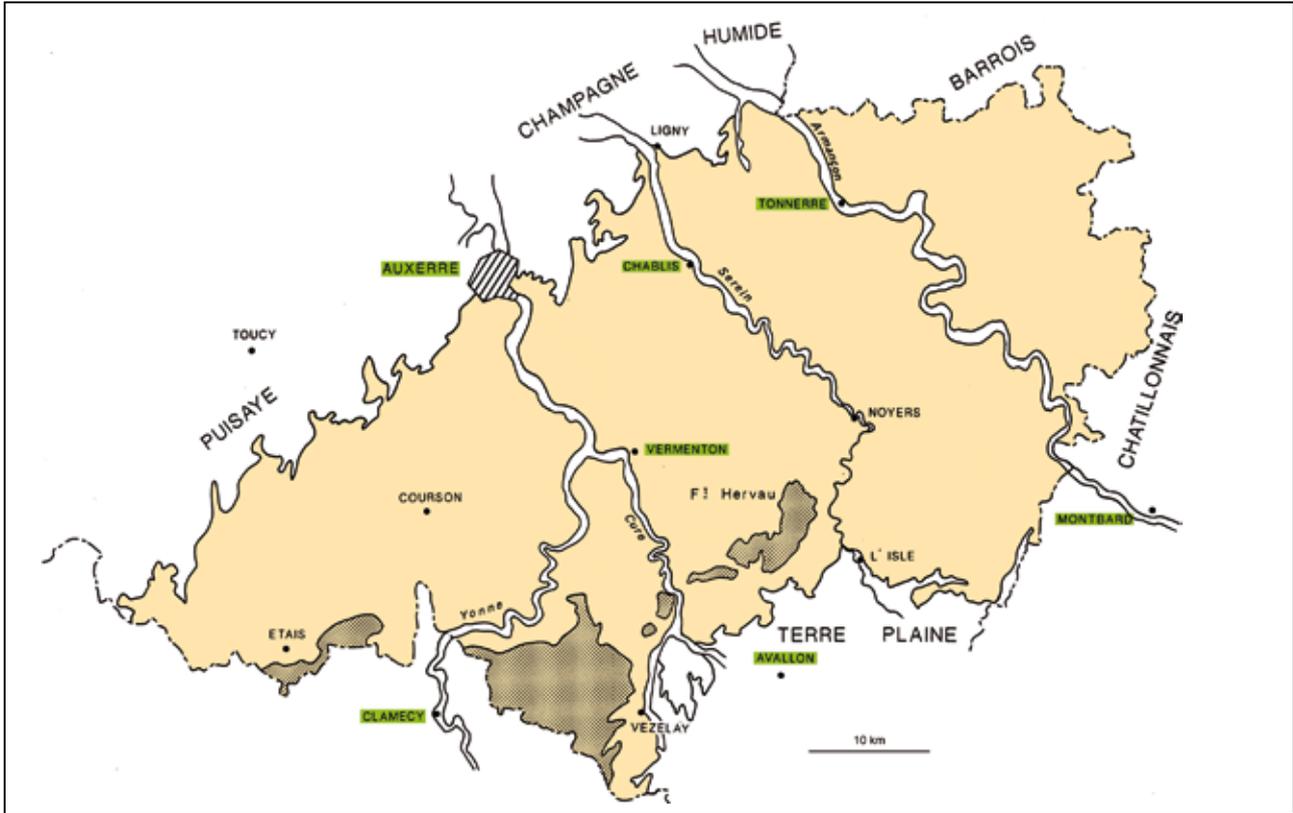
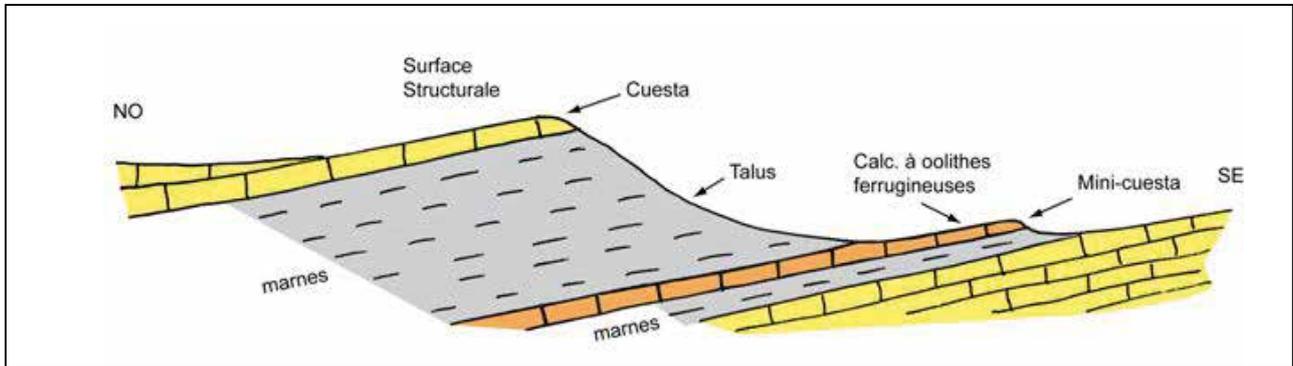


Figure 2 - Architecture générale des plateaux de Basse Bourgogne. **Figure 2** - General geomorphological structure of the Jurassic plateaux of Lower Burgundy.



Une couche tendre peu épaisse (2 à 10 m) génère une petite cuesta, une couche tendre épaisse (> 50 m) génère une cuesta majeure (par ex. la cuesta du Kimméridgien). Même une couche dure mince (< 2 m) peut générer une surface structurale de grande superficie (Par exemple : calcaire à oolithes ferrugineuses de l'Oxfordien sensu stricto.)

A shallow soft stratum (2 to 10 m) gives rise to a little cuesta whereas a thick soft stratum (> 50 m) gives rise to a major one (e.g. the Kimmeridgian cuesta).

A very shallow hard stratum (< 2 m) can generate a back slope with a large area (e.g. limestone with ferruginous oolites, Oxfordian age).

Figure 3 - Calcaire sublithographique à débit en dalles : le « Calcaire de Bazarnes » (Oxfordien).

Figure 3 - A sublithographic limestone with a flagstone splitting : the « limestone of Bazarnes » (Oxfordian).



Figure 4 - La séquence des « terres d'Aubues » vue en coupe.

Figure 4 - The toposequence of « terres d'Aubues » (seen as a cross section).

Codification des horizons selon le Référentiel pédologique 2008.

Horizon coding according to the Référentiel pédologique 2008.

4 : « petites Aubues »

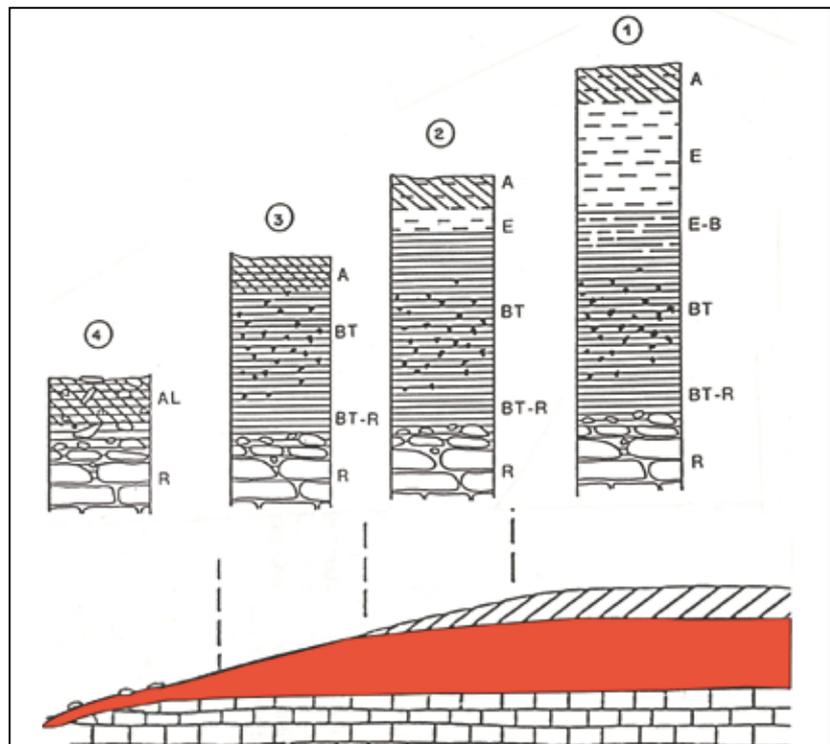
3 : « Aubues rouges »

2 : « Aubues blanches »

1 : solums « complets »

Au cœur des plateaux, la couverture pédologique est plus épaisse, les horizons supérieurs sont beaucoup plus limoneux. (Concaret, 1967 ; Baize 1980).

In the middle of the plateaux, the soil mantle is thicker, the upper horizons are more silty (Concaret, 1967 ; Baize 1980).



LA SÉQUENCE DES TERRES D'AUBUES

Roches sous-jacentes

Les terres d'Aubues peuvent être observées au-dessus de tous les calcaires durs (*figure 3*), quel qu'en soit le faciès¹, mais jamais sur calcaires tendres ni sur marnes. Comme elles sont peu épaisses (< 2 m, généralement beaucoup moins) et probablement très anciennes, la totalité du matériau est transformée en sol. Il n'est donc pas possible d'observer aujourd'hui ni de caractériser un matériau parental intact, quel qu'il puisse être.

Morphologie des sols et distribution spatiale : les quatre types de solums

Pour des raisons d'applications pratiques (propriétés agronomiques et sylvicoles très différentes) le continuum constitué par la séquence des terres d'Aubues a été subdivisé en 4 types de sols organisés en une toposéquence, depuis les sols les plus érodés, en bordure de plateaux (« petites Aubues ») jusqu'aux

solums les plus épais considérés comme non ou peu tronqués (Concaret, 1967 ; Baize, 1980). Ces quatre types de sols peuvent être représentés schématiquement de plusieurs façons : en coupe (*figures 4 et 6*) ou en plan (*figure 5*), selon le point de vue.

Les *figures 7, 8, 9, 10 et 11* montrent l'aspect de ces sols sur le terrain (les couleurs ne sont pas toujours très fidèles à ce que l'on observe effectivement).

Caractères analytiques généraux

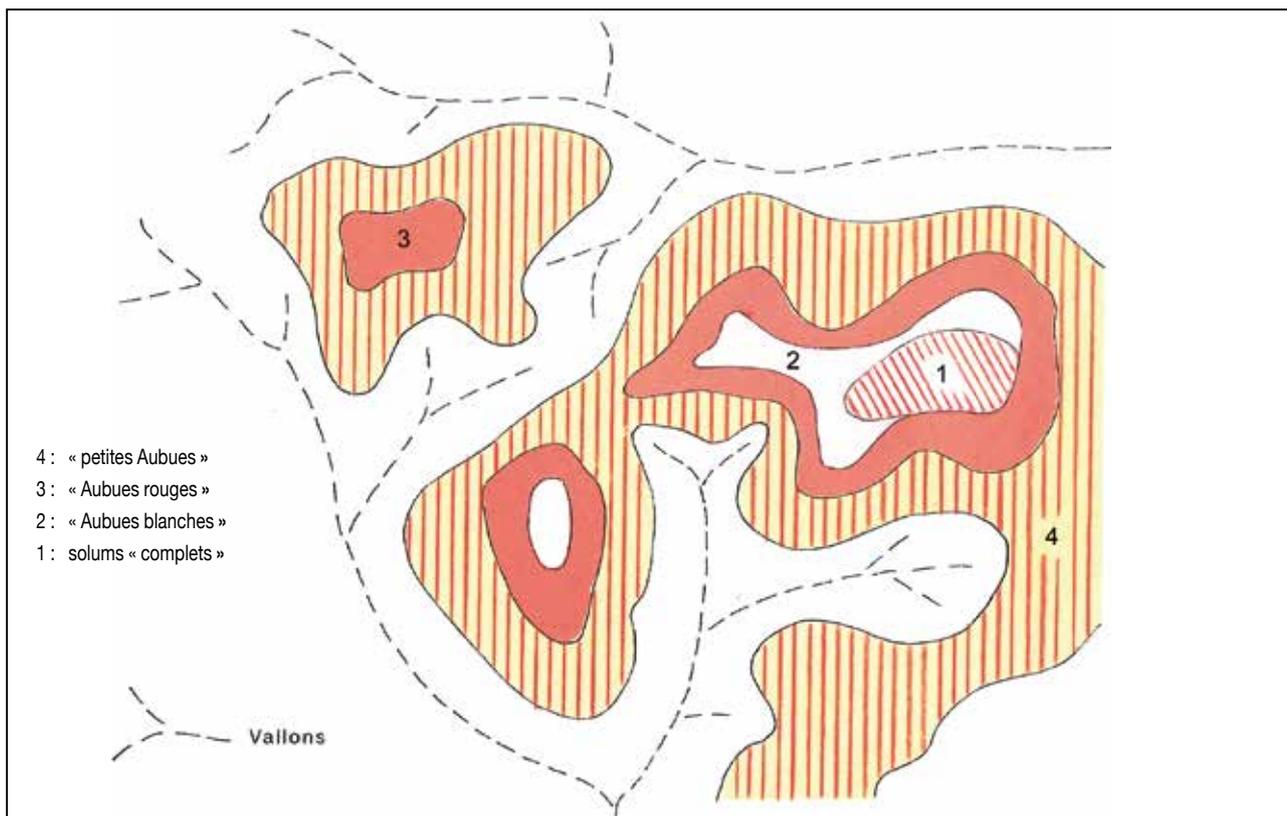
(Pour en savoir plus sur les données analytiques des différents types de terres d'Aubues, ainsi que sur les méthodes employées, voir Baize, 1980 et 1989).

Granulométrie

Dès que l'épaisseur du solum excède 40 cm, il n'y a plus aucun élément grossier. Les limons fins (LF Ø 2 à 20 µm) sont beaucoup plus abondants que les limons grossiers (LG Ø 20 à 50 µm) qui, eux-mêmes, sont beaucoup plus abondants que les sables totaux (ST Ø 50 à 2000 µm). En effet, les fractions

Figure 5 - La séquence des « terres d'Aubues » vue en plan sur la carte des sols.

Figure 5 - The sequence of « terres d'Aubues » seen on the soil map.



¹ Au-dessus des calcaires à chailles du Callovien, on observe d'épaisses argiles à chailles. Voir encadré 2.

Figure 6 - La séquence des « terres d'Aubues » vue par l'agriculteur et le pédologue cartographe.
Figure 6 - The sequence of « terres d'Aubues » seen by the farmer and the soil mapper.

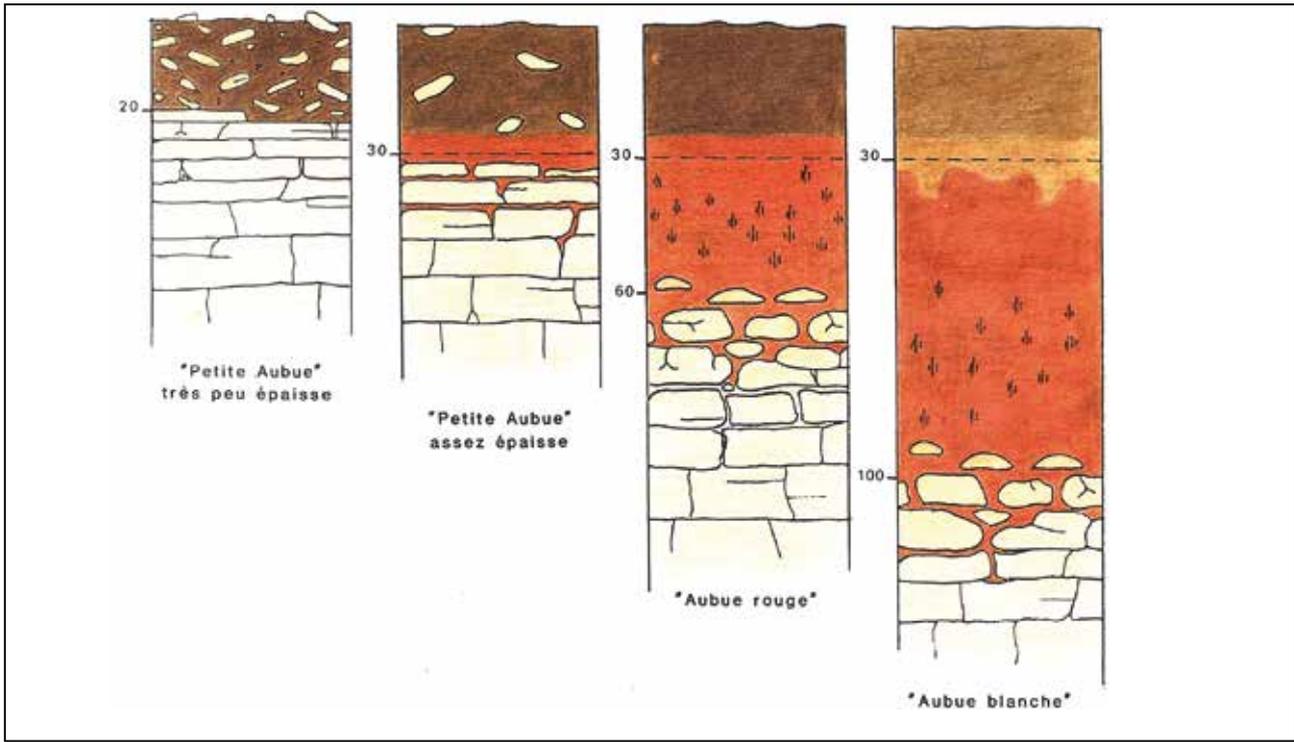


Figure 7 - « Très petite Aubue » sur calcaire oxfordien en dalles (calcaire de Bazarnes).
Figure 7 - « Very shallow Aubue » overlying an Oxfordian flagstone (limestone of Bazarnes).



Les premiers cailloux calcaires en place apparaissent à 7 cm de profondeur. La dalle continue est à 25 cm.

The first calcareous stones appear at 7 cm depth. The continuous flagstone lies at a depth of 25 cm.

Figure 8 - Aspect superficiel d'une « Aubue rouge » sous culture (à proximité de la Forêt de Lichères) (photo Odile Duval).

Figure 8 - Surface appearance of an « Aubue rouge » under cultivation (close to the Forest of Lichères).



Figure 9 - « Aubue rouge » de 55 cm d'épaisseur environ sur calcaire dur.

Figure 9 - « Aubue rouge » 55 cm thick overlying a hard limestone.



Figure 10 - « Aubue blanche ».

Figure 10 - « Aubue blanche ».



Noter la profondeur variable d'apparition du calcaire sous-jacent
The varying depth of the underlying limestone is to be noted

Figure 11 - Solum supposé « complet » (> 1,80 m) en Forêt de Lichères (fosse de 1998).

Figure 11 - Solum considered as « complete » (> 1,80 m) in the Forest of Lichères (pit dug in 1998).



Les couleurs de cette photo sont assez fidèles : revêtements « cuivrés » et nombreux films noirs (manganes).

The colours of this photograph are rather accurate : copper-coloured coatings and numerous black films (manganes).

Figure 12 - Quelques propriétés selon le type d'horizon.**Figure 12** - Some properties according to the horizon type.

		Teneur en argile %	Sables totaux %	CEC	Structure
La	Ae / LE	18 - 25	8	6 - 9	peu stable tendance à battance
LA	E	25 - 30	8	9 - 11	peu stable
Tr	E & BT	30 - 40	7	11 - 14	
A	BT	45 - 55	5	16 - 23	micro-polyédrique très stable
AA	BT-R	55 - 70	4	23 - 29	micro-polyédrique très stable

Profil complet



En noir, texture : La et LA = limono-argileux ; Tr = transition ; A = argileux ; AA = argileux lourd. En bleu, les codes d'horizons selon le Référentiel pédologique 2008 (AFES, 2009). CEC exprimée en cmol^+/kg .

In black, the soil texture : La and LA = loamy-silt ; Tr = transition ; A = clay ; AA = heavy clay. In blue, horizon codes according to the Référentiel pédologique 2008 (AFES, 2009). CEC expressed as cmol^+/kg .

sableuses sont très peu représentées, sauf unique exception évoquée ci-après (tableau 2).

Le taux d'argile est éminemment variable : de 18 à 70 %, selon la position de l'horizon (figure 12).

pH

Les sols les plus épais, non calcaires, sont faiblement acides sous forêt (pH compris entre 5,0 et 6,0). L'horizon argileux le plus profond, à proximité de la roche calcaire sous-jacente et sous son influence, montre un pH neutre. En ce qui concerne les « petites Aubues » sous forêt, avec le substrat calcaire à moins de 35 cm de profondeur, le pH_{eau} varie de 4,3 à 7,4 selon la végétation actuelle et l'historique de la parcelle (Baize, 1980, p. 117).

Fer

Le fer est essentiellement sous forme de goethite. Même avec des techniques spécifiques Bruand et Prost (1986) n'ont pas pu déceler d'hématite. On notera que le ratio fer total/argile est constant, quel que soit l'horizon, ce qui dénoterait une migration conjointe, un lessivage sans discrimination minéralogique.

La cartographie détaillée a montré que les terres d'Aubues situées au-dessus du calcaire à oolithes ferrugineuses (calcaire marneux gris-bleu, dit « mine grise ») présentaient des teneurs en fer total très élevées : de 10 à

23 % de Fe, ce qui explique pourquoi ce matériau fut exploité dans le passé comme minerai de fer sous le nom de « mine rouge ».

Minéraux argileux

Dans tous les horizons, on constate un mélange de kaolinite et d'illites (héritées des calcaires sous-jacents) avec en outre :

- de la vermiculite hydroxy-alumineuse (formée par ouverture des feuillets d'illite), uniquement dans les horizons éluviaux,
- des smectites, uniquement dans les horizons illuviaux.

Couleurs des horizons argileux profonds

On observe des teintes plutôt rougeâtres (7,5 YR et 5 YR) ou nettement « jaunes » (10 YR) sur le même plateau, à quelques hectomètres de distance. La teinte générale de ces horizons argileux dépendrait des conditions de drainage naturel régnant au sein du solum, elles-mêmes sous la dépendance de la fissuration et de la nature de la roche calcaire sous-jacente.

Un calcaire pur et fissuré assure un ressuyage rapide des eaux de pluies, d'où un pédoclimat plus sec et une teinte plus rouge, tandis qu'un calcaire un peu marneux (ou à joints marneux) constituerait un substratum moins perméable, d'où un ressuyage du sol plus lent : les oxy-hydroxydes de fer, plus hydratés, exprimeraient une coloration plus jaune. En effet, il suffit de très peu d'hématite pour colorer en rouge. Mais l'hématite ayant un réseau cristallin plus régulier que celui de la goethite avec moins de substitutions aluminiques, elle est plus soluble en milieu réducteur et la teinte rouge disparaît dans les milieux mal drainant (Torrent *et al.*, 1983).

Un point important doit cependant être souligné : quand l'extérieur des agrégats est rougeâtre (5 YR, plus souvent 7,5 YR), la matrice est jaune (10 YR). Cela se voit très nettement lors de la préparation de la terre fine dans un mortier : cette terre fine est jaune, seuls les revêtements sont rougeâtres.

Propriétés particulières des horizons profonds argileux des terres d'Aubues

Ces horizons montrent une structure macroscopique micro-polyédrique anguleuse très nette, y compris quand ils sont situés en surface, après troncature (cas des « Aubues rouges » - cf. figure 8). En outre, des revêtements argileux recouvrent pratiquement toutes

les faces des agrégats générant de très nombreux interstices inter-agrégats qui jouent toujours aux mêmes endroits. S'y ajoute enfin une porosité tubulaire fine liée au passage d'anciennes racines. Tout ceci est bien visible en lame mince, à faible grossissement (figure 13).

Grâce à leur structure très fine et très stable (log 10 Is voisin de 1,0 ; Concaret, 1967), les terres d'Aubues présentent donc un caractère filtrant et un ressuyage rapide malgré leur texture argileuse en profondeur.

INTERPRÉTATIONS PÉDOGÉNÉTIQUES

Comment expliquer le contraste textural ?

Au départ, il y avait deux hypothèses. La première fait appel à un dépôt de limons éoliens au-dessus d'argiles de décalcification. En effet de tels limons anciens quaternaires sont présents non loin, en Champagne humide (Baize, 1980). La deuxième hypothèse implique une différenciation *in situ* par des processus pédogénétiques.

Unicité du matériau - Autochtonie ou allochtonie ?

Dès 1971 l'homogénéité des « squelettes granulométriques » a été établie, toujours confirmée par la suite (Baize, 1991).

Une étude granulométrique détaillée a été entreprise pour tester l'unicité du matériau en chaque site et pour savoir si les nuances granulométriques mesurées entre un sol et un autre étaient ou non en relation avec les variations de faciès des roches sous-jacentes. Ont été prélevés et analysés 676 horizons de sol et 23 substrats calcaires constituant 312 solums de terres d'Aubues plus ou moins épais et 16 échantillons de roches calcaires, prélevés isolément. Pour éliminer les effets de l'illuviation,

Figure 13 - Fissures inter-agrégats, vides intra-agrégats et dépôts d'argiles illuviales (argillanes) dans un horizon profond argileux d'une « terre d'Aubue » des plateaux de Basse Bourgogne. Interprétation d'une lame mince (Bruand, 1985). Les vides sont en noir.

Figure 13 - Inter-aggregate cracks, intra-aggregate voids and illuvial clay coatings (argillans) in a deep clayey horizon of a « terre d'Aubue ». Interpretation of a thin section (Bruand, 1985). Voids are in black.

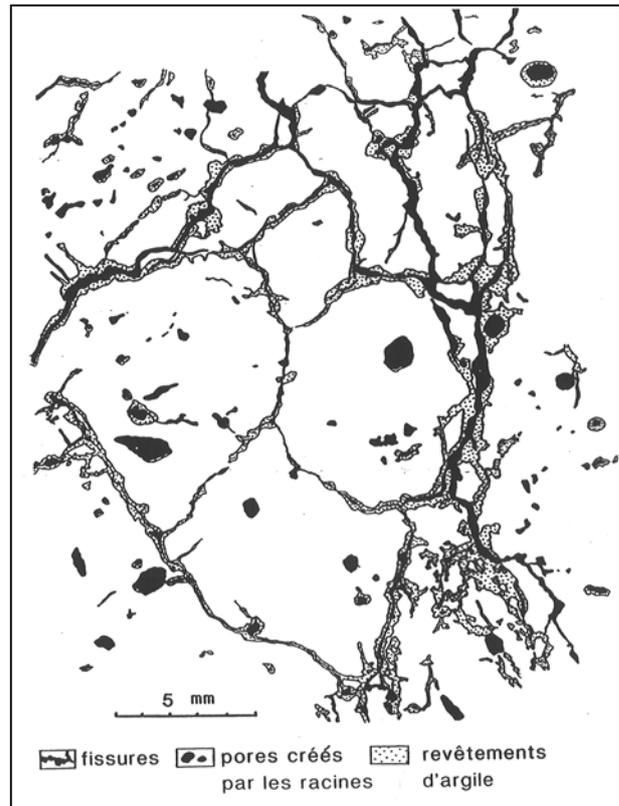
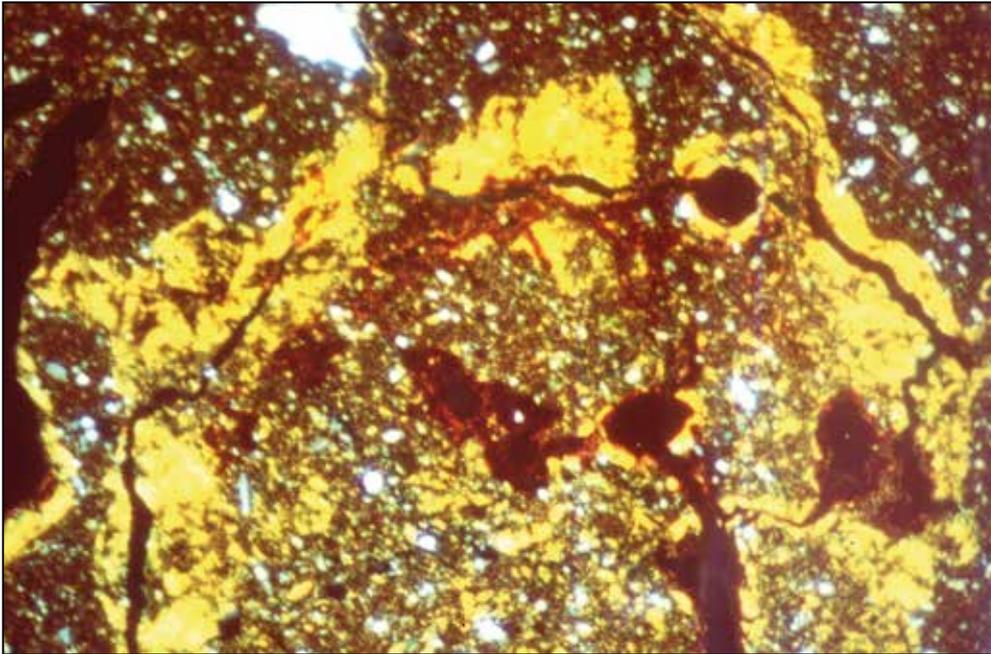


Tableau 2 - Relation entre fractions insolubles (= fractions non calcaires, insolubles par HCl) des roches et granulométrie des terres d'Aubues sus-jacentes.

Table 2 - Relationship between insoluble residues of limestone (i.e. non calcareous fractions, insoluble using HCl) and particle-size distribution of the overlying « terres d'Aubues ».

Lithologie	% d'insoluble dans la roche	Particularités granulométriques ou géochimiques des résidus insolubles et des sols
Cas général		
Calcaires purs et durs	0,5 à 8	fraction argileuse très majoritaire
Calcaires purs et durs à joints marneux	0,5 à 8 + joints	
Cas particuliers		
Calcaire dur à squelette limoneux abondant (« Calcaire de Lézinnes »)	5 à 13	limons grossiers anormalement abondants
Calcaire marneux à oolithes ferrugineuses (« Oxfordien sensu stricto »)	13 à 20	sables grossiers et fer anormalement abondants (dans les sols : 15 à 35 % de sables grossiers et 10 à 23 % de Fe total)

Figure 14 - Aspect micromorphologique des horizons argileux profonds en lumière polarisée et analysée (nicols croisés).
Figure 14 - Micromorphological view of deep clayey horizons (polarized light).



On observe des ferri-argillanes tapissant toutes les faces d'agrégats et les parois des vides. De très nombreuses « papules » argileuses ont été ré-incorporées à la matrice (probablement sous l'effet du gel des périodes quaternaires).

Ferri-argillans can be observed, coating all peds faces and void walls. Numerous clayey papules have been re-incorporated into the s-matrix (resulting probably from the geliturbation during the Quaternary).

ont été utilisés seulement les chiffres des squelettes granulométriques. Il a pu ainsi être établi que chaque solum présente le même squelette dans tous ses horizons. L'hypothèse de deux matériaux superposés se trouve écartée : des horizons pédologiques se sont différenciés au sein d'un matériau originel unique.

La comparaison granulométrique a également montré qu'au dessus de chaque roche calcaire à faciès particulier (réfical, bioclastique, ferrugineux, gréseux) les terres d'Aubues sus-jacentes présentent des particularités granulométriques en relation directe avec une ou plusieurs singularités de leur substrat calcaire (tableau 2).

Tous les arguments granulométriques et géochimiques témoignent en faveur d'une stricte autochtonie : les particularités de certains calcaires jurassiques (par ex. une richesse exceptionnelle en fer ou une abondance inhabituelle des limons grossiers) se retrouvent dans les terres d'Aubues immédiatement sus-jacentes (tableau 2).

En outre :

- au-dessus des calcaires durs sans accidents siliceux on observe uniquement des terres d'Aubues peu épaisses (< 2 m), sans éléments grossiers ;
- au-dessus des calcaires durs contenant des chailles on observe exclusivement des « argiles à chailles » très épaisses (> 5 m), à très nombreuses chailles (cf. encadré 2).

Plus récemment est venu s'ajouter un argument géochimique : les terres d'Aubues sur calcaires portlandiens et hau-

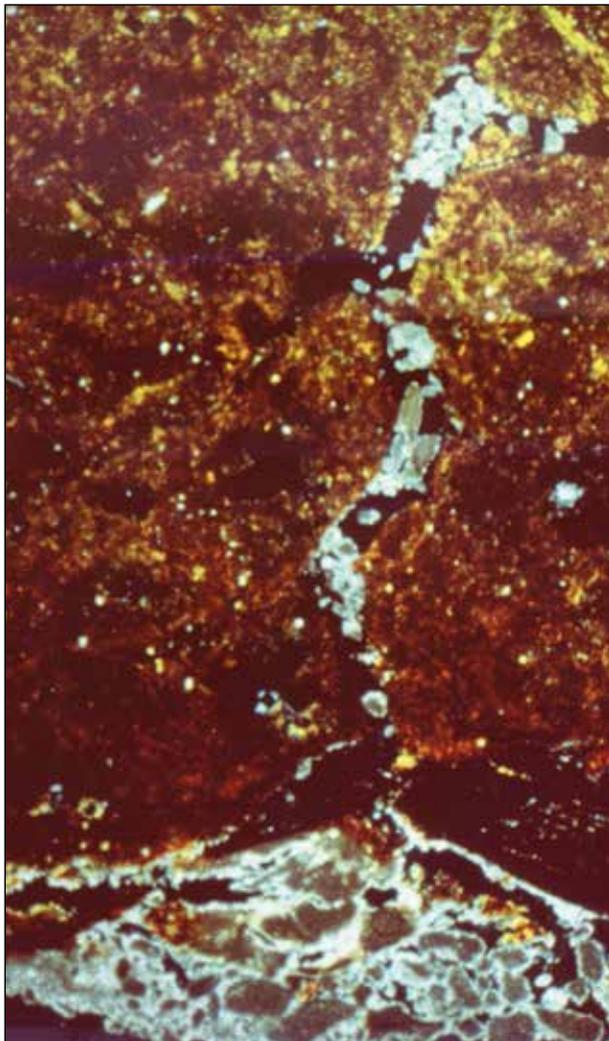
Figure 15 - Altération pelliculaire d'un caillou calcaire au contact des horizons inférieurs argileux : la dissolution est toujours active (Forêt de Lichères, 2008). (© photo J. Marion)

Figure 15 - Pellicular weathering of a calcareous stone at the contact of the deepest clay horizons : the calcite dissolution is still active (Forest of Lichères, 2008).



Figure 16 - L'altération pelliculaire vue en lame mince.

Figure 16 - The pellicular weathering seen in thin section.



On constate des remontées de calcite dans une fissure.

Ascent of calcite in a crack can be seen.

terviens sont plus chargées en Fe, Mn, Co et Ni ; celles sur le Calcaire à spongiaires oxfordien sont plus riches en Cd et Zn ; celles sur Calcaire de Bazarnes contiennent moins d'éléments en traces métalliques que les autres (Baize, 1997 ; chap. 23).

Les calcaires durs sous-jacents seraient donc, à très long terme, la véritable roche-mère des terres d'Aubues, via une « structure relais » (Callot, 1978) : l'argile résiduelle de décarbonatation.

Figure 17 - Les solums les plus épais (> 1,80 m) peuvent atteindre le stade évolutif de « dégradation morphologique ». Ce processus, rarement bien visible, se manifeste par des décolorations (Forêt de Lichères, fosse creusée en 2008).

Figure 17 - The thickest sola (>1,80 m) can reach the ultimate stage of development of « morphological degradation ». This soil forming process, rarely clearly visible, shows itself by discolorations (Forest of Lichères, pit dug in 2008).



N.B. : cette fosse creusée en 2008 est située à 40 m au nord-ouest de celle ouverte en 1998.

N.B. : this pit dug in 2008 is located 40 m north-west the one opened in 1998.

Observations micromorphologiques (Baize, 1972b)

Sont rappelées ci-dessous les principales conclusions de l'article². figure 14.

« Le grand nombre de cutanes d'illuviation répartis sur les parois de toutes les cavités de l'horizon B₂t révèle l'ampleur du processus de lessivage des éléments colloïdaux. Dans les hori-

² Citation du texte tel qu'il a été écrit en 1972. Certains termes et les codages d'horizons ont vieilli.

zons très profonds (B_3t), les cutanes sont moins nombreux mais atteignent de grandes épaisseurs, allant même jusqu'à colmater complètement certains vides. Les nombreux fragments de cutanes intégrés au fond matriciel (papules) peuvent être expliqués soit par l'action de la faune du sol (peu probable à ces profondeurs) soit par l'action du gel ayant sévi au cours des périodes froides du Quaternaire. L'opposition demeure nette entre le grand développement des concentrations plasmiques (cutanes) et la faible organisation en séparations plasmiques du fond matriciel. »

« Que doit-on penser des ferri-manganés observés dans l'horizon B_2t en position de dépôts les plus récents ? Ces revêtements bleu-noir sont-ils dus à une phase d'hydromorphie datant d'une période très pluvieuse ? Ou bien s'agirait-il d'une dynamique particulière du fer et du manganèse en dehors de tout phénomène d'hydromorphie vraie ? En effet, les ferri-manganés se localisent sur les faces d'agrégats et dans les chenaux mais ils ne sont accompagnés ni par des décolorations ni par des panachages ».

« L'existence dans les horizons de transition et au sommet de l'horizon B_2t de taches claires, pauvres en argile et en fer, pose un autre problème... Bien mise en évidence par les lames minces, la juxtaposition de plages riches en plasma et aux nombreux cutanes et de plages où tout ce qui est plasma semble absent, fait penser au processus de dégradation décrit par Jamagne (1969) dans le cas des limons loessiques du Bassin de Paris... Mais le processus de dégradation ne se développe actuellement que sous forêt et à l'intérieur de sols qui ont conservé leurs horizons A_2 [i. e. éluviaux]. »

Altération pelliculaire du calcaire sous-jacent

Cette observation peut être faite au contact entre la masse argileuse (plutôt acide) et la partie supérieure des plaques calcaires (appelées localement « laves »). Le calcaire est transformé sur une épaisseur d'environ un millimètre en une sorte de bouillie blanche très tendre qui reste collée aux agrégats argileux (figure 15). Cette altération pelliculaire peut être observée également en lame mince (figure 16). La dissolution de la roche carbonatée est donc toujours active.

Début de dégradation des minéraux argileux

Ce processus naissant est à la fois morphologique et minéralogique (AFES, 2009, p. 222). Il n'est observable que dans certains cas rares et seulement là où les sols sont aujourd'hui particulièrement épais (et donc bien conservés). Macroscopiquement, il se manifeste par des volumes un peu décolorés en forme de langues, apparaissant à la partie supérieure des horizons argileux rougeâtres. Pour les voir sur le terrain, il faut bénéficier de conditions favorables d'humidité et d'éclairement rarement réalisées (figure 17).

Microscopiquement, la dégradation peut être observée sur lames minces sous la forme de juxtaposition de volumes clairs

dépourvus de plasma et de volumes plus colorés où le fer et le plasma argileux abondent (cf. supra).

Une troisième façon de mettre ce processus en évidence est présentée à la figure 18 où sont comparés le profil de la teneur en argile dans les cas habituels (courbe en tireté) et dans un cas où un début de dégradation peut être constaté (Forêt de Lichères, fosses de 1998 et de 2008).

Cette « dégradation morphologique » est paradoxale dans ce type de sol bien drainé. En effet, il est admis classiquement que ce sont les phénomènes d'oxydo-réduction qui génèrent l'altération des minéraux argileux et donnent naissance à des volumes blanchis dénués d'argile et de fer. Ce phénomène a été décrit très fréquemment dans le cas de l'évolution de luvisols rédoxyques développés dans des matériaux limoneux (Jamagne, 1978 ; Pedro *et al.*, 1978).

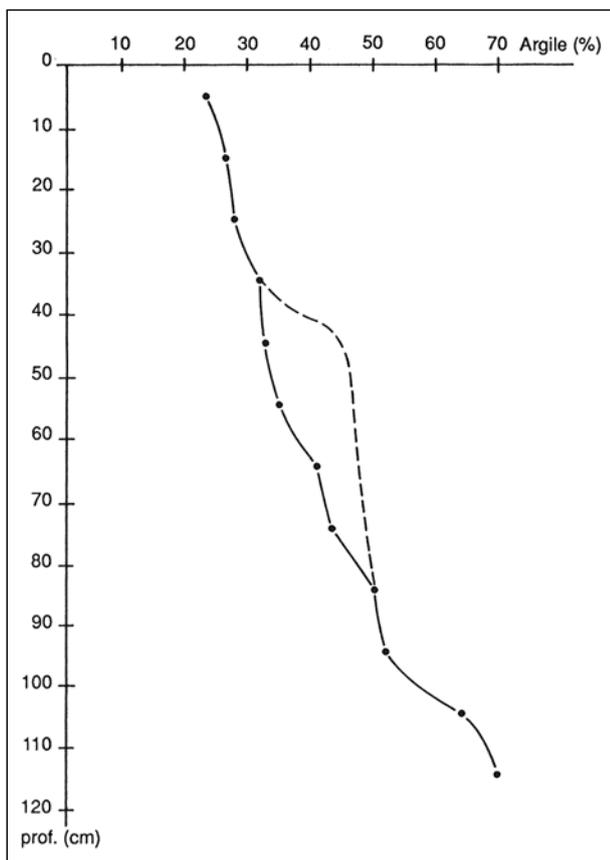
Récapitulation : hypothèses pédogénétiques

Grâce aux résultats obtenus précédemment, dont voici une brève récapitulation, une première interprétation pédogénétique peut être avancée.

- nous sommes en présence d'un matériau unique,
 - dont l'autochtonie est avérée,
 - il s'agit d'une couverture argileuse résiduelle, résultant de la décarbonatation progressive lente des calcaires jurassiques sous-jacents ;
 - les ferri-argilanes sont très nombreux, souvent nettement rougeâtres ;
 - on observe une différenciation texturale marquée, suite à l'illuviation verticale de particules argileuses associées à du fer ;
 - nous sommes donc en présence de sols fortement « lessivés ».
- Mais les terres d'Aubues n'ont que peu de points communs avec les luvisols issus de limons loessiques du Bassin parisien étudiés par Jamagne et autres auteurs (Jamagne, 1978 ; Crahet, 1981 ; Isambert, 1984 ; Roque 2007), dans lesquels 24 à 28 % d'argile sont des teneurs mesurées dans les horizons BT. Dans le cas des terres d'Aubues, c'est ce que l'on observe dans les horizons E tandis que les horizons BT contiennent de 45 à 70 % d'argile.
- il faut en effet insister sur le caractère très particulier de ce matériau d'altération initialement très argileux (de 60 à 80 %), se prêtant mal au lessivage des argiles, d'où l'importance très probable des fissures inter-agrégats pour le développement et la pérennité de l'illuviation ;
 - très localement, une dégradation des minéraux argileux débute. Pour expliquer la naissance de cette dégradation dans le cas des terres d'Aubues, on ne peut faire appel qu'à des processus d'oxydo-réduction anciens, correspondant à d'autres conditions climatiques, et à une très longue durée d'évolution.
- On peut donc conclure qu'il s'agit certainement de sols très vieux, développés dans une argile résiduelle de décarbonatation des calcaires jurassiques sous-jacents, ayant subi un processus général d'illuviation verticale d'argiles, allant en s'épaississant

Figure 18 - Forêt de Lichères (fosse de 1998). Profil de taux d'argile comparé aux profils habituels.

Figure 18 - Forest of Lichères (pit opened in 1998). Clay content vs. depth. Comparison with the usual clay gradient.



avec le temps, et pouvant être plus ou moins tronqués par érosion, au fur et à mesure de leur évolution.

Cette interprétation nous autorise à coder les horizons comme sur les figures 4 et 12.

RECONSTITUTIONS SCHÉMATIQUES DU PHYLUM ÉVOLUTIF

Voici quelques exemples simplifiés aboutissant à des sols que nous pouvons observer et analyser aujourd'hui.

Chronoséquence en l'absence d'érosion

(figure 19)

L'absence totale d'érosion est envisageable mais seulement dans les « cœurs de plateaux » là où les terres d'Aubues occupent encore de vastes superficies et montrent des épaisseurs

maximales de l'ordre de 1,8 m. Le phylum évolutif est en tous points similaire à celui décrit par Jamagne pour les sols issus de dépôts limoneux quaternaires dans le Bassin parisien (Jamagne, 1978). Dans certaines circonstances favorables, il atteint même le stade de luvisol faiblement dégradé. Mais, pour atteindre ce stade, il faudrait quelque 2 millions d'années et non 50 000 ans.

Chronoséquence avec un épisode d'érosion

(figure 20)

Cette chronoséquence implique une phase d'érosion importante mais ancienne. Depuis lors, le processus d'illuviation a eu suffisamment de temps pour générer une forte différenciation texturale. Un tel scénario explique l'existence d'Aubues blanches « courtes » présentant une épaisseur totale anormalement faible, inférieure à 80 cm. De tels cas ont été effectivement observés.

Chronoséquence avec deux épisodes d'érosion

(figure 21)

Cette chronoséquence théorique implique que les phénomènes d'érosion sont allés plus vite que la libération de résidus argileux et que les processus d'illuviation. En revanche, l'entraînement d'argiles vers le réseau karstique souterrain ne cesse pas. C'est pourquoi certaines petites Aubues observées aujourd'hui présentent des teneurs en argiles étonnamment faibles, de l'ordre de 30 à 40 % seulement (Baize, 1989).

Désignation des sols complets non tronqués

Étant donné leur caractère polygénétique, ces sols sont difficiles à nommer. Sur la carte pédologique de Tonnerre (Baize, 1980), les terres d'Aubues les plus épaisses étaient désignées comme « sols lessivés resaturés » (sous cultures) et comme « sols lessivés acides » sous forêt. Dans les deux cas, il était précisé : « sols limoneux en surface, argileux en profondeur, développés dans la couverture des plateaux jurassiques ».

Aujourd'hui, selon le Référentiel pédologique 2008 (AFES, 2009), elles seraient plutôt désignées comme des LUVISOLS TYPIQUES polygénétiques, limono-argileux en surface, souvent rubéfiés, développés dans un paléosol argileux issu de la décarbonatation totale de calcaires jurassiques.

PERTES VERS LE RÉSEAU KARSTIQUE SOUTERRAIN - BILANS DE MATIÈRES

A partir d'un résidu de décarbonatation contenant entre 60 et 80 % d'argile (tous faciès de calcaires confondus) se sont formés des sols dont les horizons en contiennent aujourd'hui de 18 à 70 % (figure 12). Des masses considérables de minéraux

Figure 19 - Chronoséquence schématique en l'absence d'érosion.

Figure 19 - Diagrammatic chronosequence without erosion.

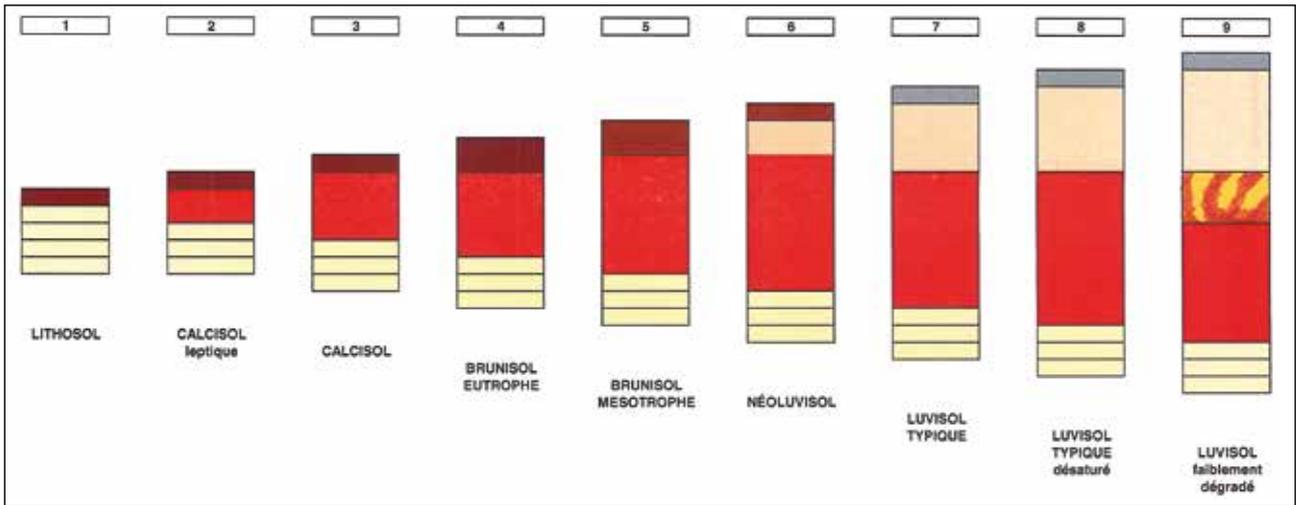


Figure 20 - Chronoséquence schématique, avec un épisode d'érosion.

Figure 20 - Diagrammatic chronosequence with one episode of erosion.

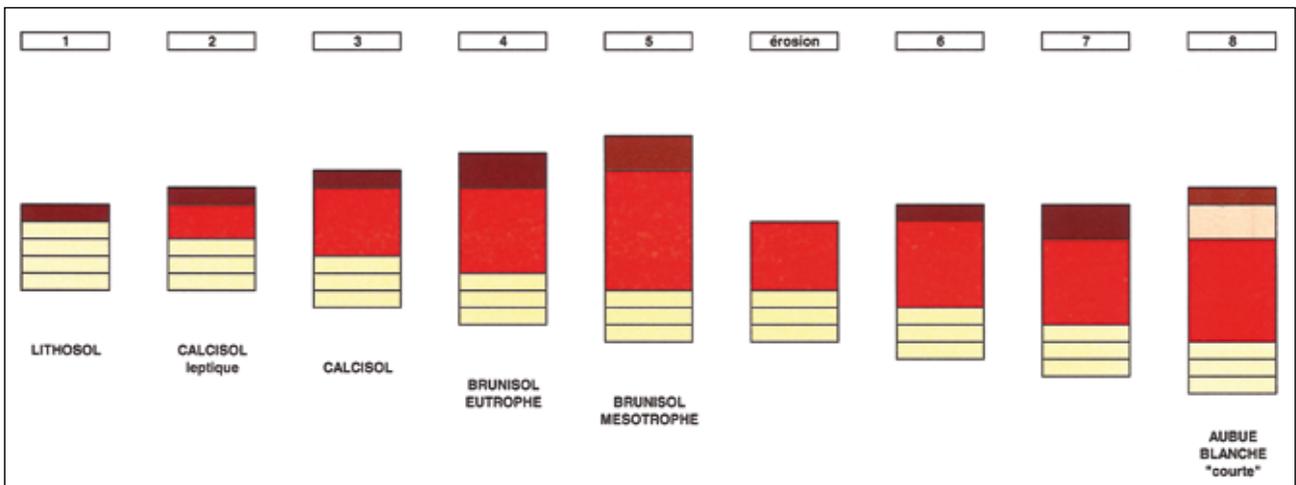
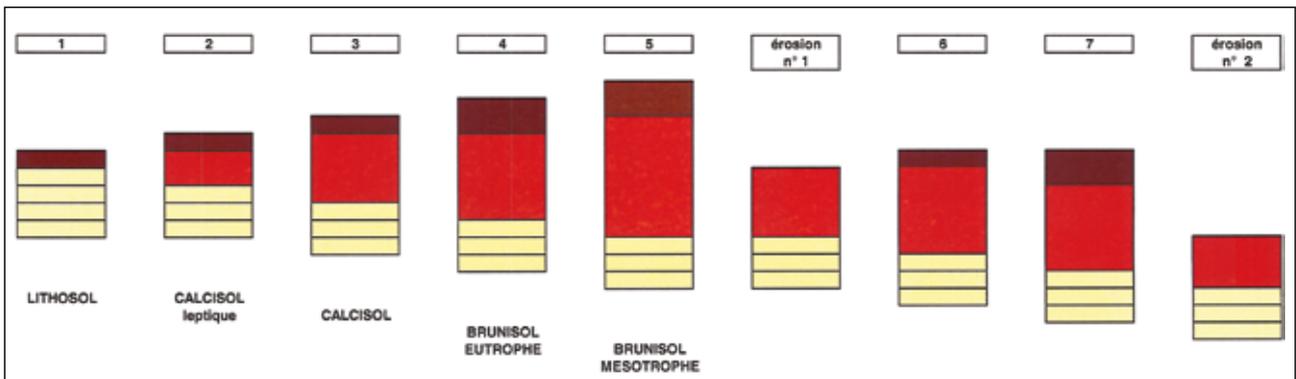


Figure 21 - Chronoséquence schématique, avec deux épisodes d'érosion.

Figure 21 - Diagrammatic chronosequence with two episodes of erosion.



argileux < 2 µm ont donc disparu, presque exclusivement par entraînement en profondeur dans le réseau karstique où il y a beaucoup d'argiles, comme tous les spéléologues peuvent en témoigner.

Un bilan a été réalisé sur un solum épais de 1,80 m en **Forêt de Lichères**, grâce à la connaissance :

- de l'épaisseur des horizons,
- des granulométries 5 fractions,
- des masses volumiques actuelles des 2 grands types d'horizons (éluviaux & illuviaux),
- des teneurs totales en fer, en zinc et en cadmium,
- de la composition du calcaire sous-jacent : teneur en fractions insolubles et leur granulométrie (cf. *tableau 3*).

Hypothèses nécessaires

Pour réaliser ce bilan, il a fallu poser quatre hypothèses.

- Hypothèse K : le calcaire oxfordien était homogène sur toute l'épaisseur qui a été dissoute : ce que l'on sait sur notre échantillon de roche était vrai pour une épaisseur de X mètres.
- Hypothèse E : là où le sol fait aujourd'hui 1,80 m, il n'y a pas eu d'érosion ni d'apports allochtones. Comme on se situe en position horizontale de plateau, on fera appel uniquement à des processus *in situ*, notamment à des transferts verticaux.
- Hypothèse G : les limons (LF + LG = LT) et les sables, principalement constitués de quartz et de feldspaths, sont restés immobiles sur place ; seules les particules < 2 µm ont pu migrer. En

outre, les ratios A/LF ou A/LT, tels que quantifiés dans le résidu non carbonaté de la roche calcaire, ont servi de valeurs de référence pour reconstituer les masses des fractions argiles libérées au cours du temps.

- Hypothèse D : les masses volumiques des différents horizons sont restées constantes.

En outre, le solum a été modélisé sous la forme d'un seul horizon E superposé à un seul horizon BT. Tous les horizons éluviaux sont censés avoir même composition granulométrique et même masse volumique. Idem pour les horizons illuviaux. C'est là une simplification.

Les résultats bruts des calculs sont présentés au *tableau 4*. Trois scénarios un peu différents ont été testés mais ils donnent approximativement les mêmes chiffres.

Âge de la couverture pédologique

La vitesse de décarbonatation a certainement beaucoup changé au cours du temps, en fonction des variations climatiques (pluviosité, températures), d'où la nécessité d'utiliser une vitesse moyenne ! Mais quelle valeur prendre ?

D'après Michel Jauzein (communication personnelle) :

- l'incertitude associée aux estimations retrouvées dans la littérature pour une région donnée serait de plus d'un ordre de grandeur ;
- le paramètre température aurait un effet limité sur le processus en raison d'un effet antagoniste entre celui sur la dissolution des

Tableau 3 - Teneurs en fractions insolubles et leur granulométrie. Résultats pour quatre échantillons de calcaire sublithographique de Bazarnes.

Table 3 - Insoluble residues, contents and particle-size distribution. Results for 4 samples from the Bazarnes sublithographic limestone.

	Teneur en fractions insolubles	Granulométrie des fractions insolubles (en %)				
		Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
Forêt de Lichères	3,0 %	65,2	26,5	5,0	2,5	0,83
Buisson rond	2,2 %	69,4	26,2	2,7	1,2	0,49
Vaugermain	4,2 %	62,1	24,6	10,2	3,0	0,11
C 735	5,7 %	61,4	25,6	11,9	0,9	0,10

Tableau 4 - Principaux résultats des bilans de masses.

Table 4 - Main results of the mass balance.

Épaisseur de roche calcaire oxfordienne dissoute	51 à 59 mètres	
Argile perdue par rapport au résidu de décarbonatation	env. 1 600 kg/m ²	soit environ 57 % de la masse libérée initialement par décarbonatation
Fer perdu par rapport au résidu de décarbonatation	env. 137 kg/m ²	soit 59 %
Cadmium perdu par rapport au résidu de décarbonatation	env. 21 g/m ²	soit 98 %
Zinc perdu par rapport au résidu de décarbonatation	env. 963 g/m ²	soit 82 %
Perte d'épaisseur par rapport à une simple accumulation sur place	env. un mètre	

Tableau 5 - Vitesse de dissolution totale des roches calcaires dures sous climats tempérés ou montagnards ou du sud de la France. Épaisseur dissoute en mm par an.

Table 5 - Velocity of total dissolution of hard calcareous rocks under temperate or mountainous climates or in southern France. Thickness dissolved expressed as mm per year.

Auteur - année	Lieu	Épaisseur dissoute en mm/an	Méthode d'estimation
Thèse Pochon (1978)	Jura Vaudois	0 à 0,031	Expér. plaquettes enfouies dans différents types de sols
Autres auteurs cités dans la thèse de Pochon			
Schardt, 1906	Jura	0,070	Dissolution totale (sup. + prof.)
Werner, 1958	Jura souabe	0,038	Bilan hydrologique
	Jura souabe	0,034	Hydrologie + pédologie
	Jura souabe	0,022	Expér. plaquettes enfouies
Burger, 1959	Jura neuchâtelois	0,090	Dissolution totale
Aubert, 1967	Jura	0,090	Dissolution totale
Aubert, 1969	Jura	0,030	Contact sol/roche
	Jura	0,050 - 0,060	Dissolution superficielle
	Jura	0,021	Expér. plaquettes enfouies
Miserez, 1973	Jura neuchâtelois	0,066 à 0,091	
Trudgill, 1973	Irlande	0,005	Plaquettes dans sol acide
Monbaron, 1975	Jura nord	0,081	Bilan hydrologique
Atteia, 1992	Jura suisse	0,016	
Nicod, 1972 in Campy & Macaire, 1989	Vercors Haut Jura Ardennes, Yorkshire Quercy	0,023 0,009 0,003 0,004 0,007	
Maire, 1990 in Legros, 2007	Haute Savoie 2 400 m	0,015	Bilan climatique
Maurin et Renaud, 2002	Seuil du Poitou	0,030	Modèle physique (isostatique)
Amiotte-Suchet (commun. personn.)	Bourgogne Haut Jura (Doubs)	0,033 - 0,038 0,040	Bilans hydrologiques
Gombert, 1977 in Campy & Macaire, 2003	Ariège	0,073	Bilan hydrologique
Jauzein, 2 005 comm. personnelle)	limite Meuse/Haute Marne	0,01 à 0,04	
Party, 1999	France	0,0015 à 0,01	modèles d'altération
Gamez, 1992	Lorraine septentrion	0,03 à 0,06	Bilan hydrologique
in Bonfils, 1993	Sud de la France	0,05 à 0,06	

carbonates et celui sur la diffusion gazeuse dans le sol (élimination du dioxyde de carbone vers l'air) ;

- le paramètre taux d'infiltration de l'eau pluviale est déterminant pour la capacité d'élimination en profondeur des quantités dissoutes ;

- la dynamique du dioxyde de carbone dans le sol est fondamentale pour estimer le taux de dissolution des carbonates dans cette eau d'infiltration. Les trois paramètres importants de cette dynamique sont le flux de dioxyde de carbone que le sol restitue à l'air (activité biologique principalement), les propriétés physiques du sol vis à vis du transfert de gaz (celles qui déterminent la diffusivité gazeuse) et la profondeur du sol (zone où l'activité biologique génère le flux de dioxyde de carbone en question).

Le *tableau 5* présente un certain nombre de valeurs puisées dans la littérature. Cette revue bibliographique est certainement très incomplète. Elle permet cependant de constater que, pour des roches calcaires dures (*limestones*) sous climats tempérés ou montagnards ou du sud de la France, cette vitesse pourrait être comprise entre 0,003 et 0,09 mm/an.

Selon les méthodes d'estimation employées, lesquelles portent sur des superficies, des durées et des climats différents, la fourchette des valeurs obtenues est vraiment très large. En conséquence, selon la vitesse **moyenne** de décarbonatation retenue, les âges varient de 0,85 à 6 millions d'années (*tableau 6*).

Rappelons qu'il y a un accord assez général pour fixer le début du Pleistocène à -1 800 000 ans (Foucault et Raoult, 2001). Si l'on admet que ces sols ont pu se développer à partir de la fin du Tertiaire, une vitesse moyenne de l'ordre de 0,03 mm par an serait la plus vraisemblable.

En outre, logiquement, c'est la partie supérieure du solum (supposée non érodée) qui a cet âge. La partie basale, au contact du calcaire, doit être beaucoup plus récente !

Critique des hypothèses

Hypothèse K

Il est peu probable que le calcaire ait été totalement homogène sur une épaisseur de plus de 50 m qui correspond à plusieurs millions d'années de sédimentation marine. En outre,

on sait qu'il existe des joints marneux, relativement minces (quelques millimètres) mais contenant quelque 30 à 50 % d'argile ! En conséquence il y aurait moins d'épaisseur de roche à dissoudre pour obtenir la même masse de résidu silicaté.

Hypothèse E

Certes, nous sommes en position de plateau mais l'absence totale d'érosion est peu vraisemblable sur une telle durée. S'il y a eu érosion, même sur une épaisseur modeste, cela implique la dissolution d'une plus grande masse de calcaire et une durée de décarbonatation plus longue.

L'absence d'apports éoliens ou par colluvionnement semble plus vraisemblable car il n'y en a pas trace dans les paysages, et l'homogénéité des squelettes granulométriques sur toute l'épaisseur des solums constitue un argument solide.

Hypothèse G

Certes il y a peu de minéraux altérables (feldspaths) dans les résidus de décarbonatation, mais ils ont probablement donné naissance à une petite quantité d'argile de néoformation. En outre, les limons les plus fins (2-5 µm) ont sans doute subi également une certaine illuviation verticale. Un tel phénomène, quantifiable grâce à des analyses granulométriques détaillant les fractions limons en 5 sous-fractions, avait déjà été décelé pour un solum complet tout proche (Baize, 1971) et par Jamagne (1973) dans un autre contexte.

Hypothèse D

On sait que les masses volumiques n'ont pas pu rester constantes. La pédogenèse a certainement généré progressivement des porosités structurales et biologiques, donc a fait baisser la masse volumique. Mais, quelle densité apparente associer au résidu insoluble fraîchement formé ?

Malgré ces critiques, on peut s'accorder sur le fait que les terres d'Aubues telles qu'observées aujourd'hui sont le résultat d'un bilan de matière positif : d'un côté, la libération constante de matières silicatées par dissolution *in situ* des calcaires durs (qui contiennent le plus souvent de 2 à 5 % de fraction non carbonatée) ; de l'autre, des phases sporadiques d'érosion hydrique

Tableau 6 - Estimation de l'âge de la couverture pédologique.

Table 6 - Age of the soil mantle (estimate).

Si on admet une vitesse moyenne de décarbonatation de :	soit	l'âge serait de :
0,01 mm/an	1 mm/siècle	5,1 à 5,9 millions d'années
0,02 mm/an	2 mm/siècle	2,55 à 2,95 millions d'années
0,03 mm/an	3 mm/siècle	1,70 à 1,97 millions d'années
0,04 mm/an	4 mm/siècle	1,28 à 1,48 millions d'années
0,06 mm/an	6 mm/siècle	850 000 à 980 000 années

et l'entraînement continu de particules argileuses dans le réseau karstique souterrain.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les terres d'Aubues ont été le siège d'une illuviation massive de particules argileuses (et de fer associé) dans un contexte textural argileux qui ne s'y prête pas *a priori*. On observe même une « dégradation morphologique » débutante dans les cas les plus favorables, i.e. quand il n'y a pas eu troncature des matériaux résiduels par érosion.

Soulignons les difficultés pour établir des bilans de matières sur de telles durées qui se comptent en centaines de milliers d'années. Les hypothèses indispensables pour la réalisation de ces bilans sont toutes critiquables.

Nous avons vu que la méconnaissance complète des vitesses (successives et/ou moyenne) de décarbonatation a des conséquences majeures sur l'estimation de l'âge de la couverture pédologique. Cette estimation est donc peu précise et s'inscrit dans une fourchette très large.

Des datations absolues seraient-elles possibles ? Avec quelles méthodes ?

Enfin, ce qui est établi pour la Basse Bourgogne est-il valable ailleurs ? En allant vers l'est, il semble bien que oui, aussi bien sur les plateaux du Barrois (Aube) qu'en Châtillonnais (Côte d'Or - Chrétien, 2000). Encore plus à l'est, en Lorraine sur plateaux calcaires du Jurassique moyen, l'argile de décarbonatation (« terra fusca ») serait souvent mélangée voire recouverte par des limons éoliens (Gury et Duchaufour, 1972 ; Duchaufour, 1995 ; Florentin, 2 005).

En Champagne berrichonne, au-dessus de calcaires durs du jurassique, des sols profonds à forte différenciation texturale rappellent tout à fait les terres d'Aubues profondes (Moulin et al., 1992). Seules des études très approfondies pourraient mettre en évidence les similarités comme les différences.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 2009 - Référentiel pédologique 2008. Versailles, éditions Quæ, 432 p.
- Baize D., 1971 - Contribution à l'étude des sols des plateaux jurassiques de Bourgogne. Essai sur les terres dites « Aubues ». Thèse de 3e cycle. Paris VI. 156 p. + annexes
- Baize D., 1972a - Les sols développés dans la couverture des plateaux jurassiques de Bourgogne. *Science du Sol* n° 1, pp. 37-43.
- Baize D., 1972b - Micromorphologie des « terres d'Aubues » des plateaux de Bourgogne. *Bull. AFES* n° 1-2, pp. 63-71.
- Baize D., 1980 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Tonnerre. Notice 143 p. INRA Éditions, Paris.
- Baize D., 1989 - Typologie des sols de l'Yonne. Les plateaux de Bourgogne. INRA, Orléans. 154 p.
- Baize D., 1991 - Sols et formations superficielles sur calcaires durs dans le sud-est du Bassin Parisien. Première synthèse. *Science du Sol*, 29, pp. 265-287.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Baize D., 1998 - Congrès mondial de Science du sol. Excursion B1. 27 août - 3 septembre.
- Baize D. et Voilliot J.P., 1989 - La cartographie des sols de l'Yonne à 1/50 000. *Science du Sol*, 27 (1), pp. 25-28.
- Bruand A., 1985 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants ; application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse. Paris VII. 234 p.
- Bruand A., 1990 - Improved prediction of water-retention properties of clayey soils by pedological stratification. *Journal of Soil Science* (41), pp. 491-497.
- Bruand A. et Prost R., 1986 - Apport des méthodes d'enrichissement sélectives et des spectroscopies à l'identification des constituants minéraux d'un échantillon de sol. *Agronomie*, 6, (8) pp. 717 -726.
- Bruand A., Tessier D. et Baize D., 1988 - Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de l'organisation de la phase argileuse. *C.R. Acad. Sciences. Paris*, t. 307, série III, pp. 1937-1941
- Buffon G-L.L., 1819 - Oeuvres complètes de Buffon, mises en ordre par M. de Lacépède, seconde édition, 30 vol. Rapet, Impr. Plassan, Paris.
- Callot G., 1977 - Logique de la distribution des sols et formations superficielles sur plate-forme calcaire. Exemple de la région Nord-Aquitaine. *Science du Sol*, n° 4, pp. 189-205.
- Callot G., 1978 - Analyse des litho-systèmes carbonatés. Rôle du substratum calcaire dans la pédogenèse. INRA, SES Montpellier, Note interne n° 484, 94 p.
- Chrétien J., 2000 - Référentiel Régional Pédologique de Bourgogne à 1/250 000. Régions naturelles, pédopaysages et sols de la Côte d'Or. Carte, base de données et notice explicative, 194 p. INRA Éditions, Versailles.
- Concarez J., 1967 - Les plateaux de Bourgogne et leur bordure crétacée. Secteur est d'Auxerre. Notice et cartes au 1/50 000. Station Agronomique de l'Yonne. Auxerre. Multicopie.
- Crahet M., 1981 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Chartres. INRA, Versailles, notice 233 p.
- Duchaufour Ph., 1995 - Abrégé de pédologie. 4^e éd. Masson, Paris, 324 p.
- Feller C. et Blanchart E., 2004 - Quatre grands savants ont observé des profils et/ou décrit des techniques de prospection pédologiques avant 1850 : Palissy, Buffon, Thaer et Darwin. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 11, n° 2, pp. 165-173.
- Florentin L., 2 005 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Metz. INRA Orléans. 207 p.
- Foucault A. et Raoult J.-F., 2001 - Dictionnaire de géologie. 5e édition. Dunod, Paris, 380 p.
- Gury M. et Duchaufour Ph., 1972 - Relations entre les formations superficielles et la pédogenèse sur substratum calcaire. *Science du sol* n° 1, pp. 19-24.
- Isambert M., 1984 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Château-dun. INRA Versailles, notice 259 p.
- Jamagne M., 1969 - Données sur l'évolution pédogénétique des formations limoneuses en Europe occidentale. *Mém. hors série Soc. Géologique de France*, n° 5, pp. 37-52.
- Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédologique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Fac. Sci. Agronomiques de l'État, Gembloux, Belgique 445 p.
- Jamagne M., 1978 - Les processus pédogénétiques dans une séquence évolutive progressive sur formations limoneuses loessiques en zone tempérée froide et humide. *C. R. Acad. Sciences, Paris*, 286, série D, pp. 25-28.
- Lucotte G., 1978 - Les « argiles à chailles » de la région de Nevers et de la Charité-sur-Loire. DEA, Université de Dijon. 52 p. + annexes.
- Mantelet C. et Radet E., 1937 - Étude pédologique des sols des plateaux jurassiques dans l'est de la France. *Bull. AFES*, t. III, 3, pp. 204-237.
- Moulin J., Dupont J et Servant J., 1992 - Les terres de Champagne berrichonne.

- Typologie des sols agricoles et forestiers. Chambres d'agriculture de l'Indre et du Cher. 64 p.
- Pédro G., Jamagne M. & Bégon J.C., 1978. - Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma*, 20, 173-189.
- Plaisance G. et Cailleux A., 1958 - Dictionnaire des sols. La maison rustique. Paris, 604 p.
- Raulin V. et Leymerie A., 1858 - Statistiques géologiques du département de l'Yonne. Perriquet et Rouillé, Auxerre, 863 p.
- Roque J., 2007 - Carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille Meaux. Notice 196 p. INRA Éditions, Olivet.
- Torrent J., Schwertmann U., Fechter H. and Alferez F., 1983 - Quantitative relationships between soil colour and hematite content. *Soil Science*, vol. 136, n° 6, pp. 354-358.

Références bibliographiques spécifiques du tableau 5

- Atteia O. 1992 - Rôle du sol dans les transferts des éléments traces en solution. Application à quelques écosystèmes d'altitude. Thèse doctorat EPF Lausanne n°1031, 253 p.
- Bonfils P., 1993 - Carte pédologique de France à 1/100.000. feuille Lodève. Inra Éditions, Paris.
- Campy M. et Macaire J.J., 1989 - Géologie des formations superficielles. Masson, Paris, 433 p.
- Campy M. et Macaire J.J., 2003 - Géologie de la surface. 2ème édition. Dunod, Paris, 440 p.
- Gamez P., 1992 - Hydrologie et karstologie du bassin du Loison (Lorraine septentrionale). Thèse Metz. 397 p.
- Legros J.P., 2007 - Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaires romandes. 574 p.
- Maire R., 1990 - La haute montagne calcaire. Karsts, cavités remplissages quaternaires paléoclimats. *Karstologia*. Mémoire n°3, Assoc. Fr. de karstologie, 731 p.
- Maurin J.C. et Renaud K., 2002 - Isostasie flexurale et érosion différentielle : modélisation numérique appliquée au seuil du Poitou. *Comptes Rendus Geosciences*, 334, p. 1149-1155.
- Miserez, J.J. 1973 - Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel. 313 p.
- Monbaron M., 1975 - Contribution à l'étude du Jura septentrional. Thèse Univ. Neuchâtel, 220 p.
- Nicod J., 1972 - Pays et paysages du calcaire. P.U.F., 244 p.
- Party, J.P. 1999 - Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français. Thèse de l'Université de Strasbourg, 247 pages.
- Pochon M., 1978 - Origine et évolution des sols du haut Jura Suisse. *Mém. Soc. Helvétique Sci. nat.* XC, 190 p.

Encadré 1

BUFFON PRÉSENTE SES PROSPECTIONS DE TERRAIN FAITES SUR SON DOMAINE ET ÉMET DES HYPOTHÈSES PÉDOGÉNÉTIQUES (citations extraites de Feller et Blanchart, 2004).

« Je fis sonder, en 1734, par plusieurs coups de tarière, un terrain d'environ soixante-dix arpents d'étendue [1], dont je voulois connoître l'épaisseur de bonne terre, et où j'ai fait une plantation de bois, qui a bien réussi : j'avais divisé ce terrain par arpents ; et l'ayant fait sonder aux quatre angles de chacun de ces arpents, j'ai retenu la note des différentes épaisseurs de terre, dont la moindre était de deux pieds, et la plus forte de trois pieds et demi [2]. J'étois jeune alors, et mon projet étoit de reconnoître, au bout de trente ans, la différence que produiroit sur mon bois semé l'épaisseur plus ou moins grande de cette terre, qui partout étoit franche et de bonne qualité [3]. J'observai, par le moyen de ces sondes, que dans toute l'étendue de ce terrain, la composition des lits de terre étoit à très peu près la même, et j'y reconnus clairement le changement successif du terreau en terre limoneuse. Ce terrain est situé dans une plaine au-dessus de nos plus hautes collines de Bourgogne : il étoit, pour la plus grande partie, en friche de temps immémorial ; et comme il n'est dominé par aucune éminence, la terre est sans mélange apparent de craie ni d'argile : elle porte sur une couche horizontale de pierre calcaire dure. [4].

Sous le gazon, ou plutôt sous la vieille mousse qui couvroit la surface de ce terrain, il y avoit partout un petit lit de terre noire et friable, formée du produit des feuilles et des herbes pourries des années précédentes ; la terre du lit suivant n'étoit que brune et sans adhésion : mais les lits au-dessous de ces deux premiers prenoient par degrés de la consistance et une couleur jaunâtre, et cela d'autant plus qu'ils s'éloignoient davantage de la superficie du terrain. Le lit le plus bas, qui étoit à trois pieds ou trois pieds et demi de profondeur, étoit d'un orangé rougeâtre, et la terre en étoit très grasse, très-ductile, et s'attachoit à la langue comme un véritable bol [5].

Je remarquai dans cette terre jaune plusieurs grains de mine de fer ; ils étoient noirs et durs dans le lit inférieur, et n'étoient que bruns et encore friables dans les lits supérieurs de cette même terre...

En suivant les travaux de cette fouille (faite en 1748), et en observant avec soin les différentes matières qui en ont été tirées, j'ai reconnu, à n'en pouvoir douter, que cette terre limoneuse étoit entraînée par l'infiltration des eaux à de grandes profondeurs dans les joints et les délits des couches inférieures [6]..... D'après ces observations, je demeurai persuadé que cette terre limoneuse, produite par l'entière décomposition des animaux et des végétaux, est la première matrice des mines de fer en grains, et qu'elle fournit la plus grande partie des éléments nécessaires à la formation des pyrites... La quantité de fer contenue dans la terre limoneuse est quelquefois si considérable, qu'on pourrait lui donner le nom de terre ferrugineuse » [7].

[1] environ 35 ha

[2] de 65 à 115 cm environ

[3] Buffon veut tester l'influence de l'épaisseur du sol sur la croissance de ses arbres.

[4] le terrain étudié se trouve en position de plateau avec un substratum de calcaire dur mais les sols ne contiennent pas de cailloux.

[5] est décrite ici une succession d'horizons d'abord plutôt limoneux et bruns, puis de plus en plus argileux devenant orangé rougeâtre et franchement argileux. Cela ressemble beaucoup à la description d'une terre d'Aubue profonde.

[6] Buffon reconnaît le transfert des argiles vers la profondeur.

[7] cf. les terres d'Aubues développées sur calcaires à oolithes ferrugineuses (« mine rouge »). Sur la commune de Buffon, il existe toujours une ancienne forge.

L'auteur a lui-même réalisé la cartographie des sols de la commune de Buffon et il a effectivement observé des terres d'Aubues à proximité immédiate et au nord du village de Buffon (Côte d'Or).

Encadré 2**« TERRES D'AUBUES » ET « ARGILES À CHAILLES » : SIMILITUDES ET DIFFÉRENCES**

Les argiles à chailles [1] sont, comme les terres d'Aubues, des formations résiduelles argileuses que l'on observe en Bourgogne au-dessus de calcaires durs.

Les « argiles à chailles » n'existent que là où les calcaires (d'âge callovien) contiennent des chailles (Lucotte 1978 ; Baize, 1991). Cartographiquement, trois limites coïncident : celle de l'existence des calcaires à chailles/les argiles à chailles/la présence de grands massifs forestiers [2].

Leur épaisseur varie de 3 à 10 m. Elles couvrent la plus grande part des plateaux à l'ouest de Vézelay (*figure 1*) et ceux de Bourgogne Nivernaise (régions de Clamecy). Cette couverture résiduelle n'est tronquée, laissant apparaître les calcaires sous-jacents, qu'en tout rebord de plateau.

Les sols développés dans les argiles à chailles montrent de nombreuses similitudes avec les terres d'Aubues. Très acides sous forêts, ils présentent aussi une forte différenciation texturale et morphologique entre des horizons supérieurs limoneux, de couleurs claires, et des horizons profonds très argileux, de couleurs orangées vives avec une grande richesse en fer (dont plus de 90 % sous formes « libres »). Ils contiennent de très nombreux éléments grossiers siliceux, de toutes tailles, plus abondants et plus finement fragmentés dans les horizons supérieurs éluviaux.

Dans sa thèse, Callot (1977) avait déjà établi que : « *la présence de silex ou d'accidents siliceux favorise l'accumulation et la conservation de couvertures épaisses* ». De la même façon, en Basse Bourgogne, les chailles « arment » la formation résiduelle argileuse qui, de ce fait, a résisté à l'érosion tandis que les « terres d'Aubues », dénuées de cailloux, ont été très fortement érodées.

[1] Rappelons que les chailles sont des accidents siliceux qui se trouvent dans certains calcaires jurassiques et se présentent en gros blocs ou en grandes lentilles de dimensions métriques.

[2] En effet, les sols développés dans les argiles à chailles présentent de bonnes potentialités forestières mais étaient (et sont encore) difficiles à cultiver du fait de leur grande acidité et de l'abondance d'éléments grossiers siliceux dont la fragmentation donne des éléments coupants.

