

Les apports éoliens dans les sols du Jura

Etat des connaissances et nouvelles données en pâturages boisés

Elena Havlicek et J.-M. Gobat

Laboratoire d'écologie végétale- Institut de botanique - 11, rue Emile-Argand - CH - 2007 Neuchâtel 7 - Suisse

RÉSUMÉ

Vingt ans après la découverte des limons éoliens dans les sols du Jura, un bilan tiré de la littérature pédologique montre une confirmation évidente de leurs effets importants sur la pédogenèse sur calcaire. Quelques caractères nouveaux sont précisés : présence primaire ou secondaire (après transport) des limons, rôle important dans la brunification des sols, présence dans des sols à évolution calcique ou calcaire, rôle de l'épaisseur du dépôt dans l'orientation de la pédogenèse, relations entre les dépôts et la couverture végétale.

L'étude originale de nombreux sols des pâturages boisés du Jura suisse, réalisée par les auteurs, met également en évidence une présence généralisée de limons d'origine éolienne. Ces résultats permettent de discuter plus avant les relations entre les sols et la végétation qui, par le jeu du cycle biogéochimique, joue un rôle important dans le maintien ou la création d'une ambiance pédogénétique calcique. L'intensité de l'effet de l'éolien sur la pédogenèse dépendrait ainsi d'une combinaison trifactorielle, intégrant non seulement l'épaisseur du sol et la porosité du substratum rocheux, déjà largement prouvées, mais aussi la profondeur d'enracinement physiologique de la végétation.

Mots clés

Pédogenèse, minéralogie, loess, relations sol-végétation, pâturage boisé, Jura, Suisse

SUMMARY

THE LOESS IN THE SOILS OF THE SWISS JURA MOUNTAINS. STATE OF ART AND NEW DATAS FROM WOODED PASTURES

Twenty years after the detection of eolian deposition in the Swiss Jura mountains, a review of literature is undertaken. It corroborates the idea of the important effect of loess on pedogenesis of soils formed over limestone bedrock. According to Pochon (1973, 1978) the windblown dust is considered to be contemporaneous with the end of the last European glaciation (Würm) and originating from the alpine crystal rocks.

Some new features are specified : the primary or secondary (after carriage) presence of eolian deposition ; its important role in brunification ; its presence in soils with calcic evolution ; the part played by loess depth in pedogenesis orientation ; the relationships between eolian deposition and vegetation. The phenomenon of mineralogical discontinuity between bedrock and windblown dust was also

(1) : Ce travail fait partie de la thèse de l'auteur et a bénéficié d'un subside du Fonds national suisse de la Recherche scientifique (Subside 3100-30853.91).

observed by several authors in the United States and by the authors in the Dolomites (Italy) and in the Vercors (France).

Moreover, the study, by the authors, of numerous soils in wooded pastures of the Swiss Jura (figure 1) shows the very wide distribution of loess (figure 2). All samples contain a non negligible fraction of allochthonous minerals (tab. 1), as revealed by semiquantitative X-ray diffraction analysis. The comparison with the mineral composition of limestone bedrock and the results of physico-chemical analysis of the soils (tab. 2-I and 2-II) corroborate the allochthony of half of prospected soils.

These results allow a broader discussion about relationships between soils and vegetation, who appear, by the biogeochemical cycle, to play an important role in calcification of deposited silt (figure 3). The accessibility of limestone bedrock for the vegetation is the critical point of the orientation of evolution. The intensity of the effect of loess on the pedogenesis over limestone should finally depend of an integration of 3 prevailing factors : (i) thickness of the eolian layer, (ii) bedrock porosity and (iii) depth of roots.

Key-words : soil evolution, mineralogy, loess, soil-vegetation relationships, wooded pasturage

Key-words

Soil evolution, mineralogy, loess, soil-vegetation relationships, wooded pasture, Jura mountains, Switzerland

RESUMEN

LOS APORTES EÓLICOS EN LOS SUELOS DEL JURA.

Estado del conocimiento y nuevos datos en pastizales enmaderados

Veinte años después del descubrimiento de los limos eólicos en los suelos del Jura suizo, un análisis de la literatura pedológica muestra una evidente confirmación de sus efectos importantes sobre la pedogénesis sobre calizas. Ciertos caracteres nuevos son precisos: presencia primaria o secundaria (después del transporte) de los limos, importancia de la brunificación de los suelos, presencia en los suelos con evolución calcica o calcárea, impotancia del espesor del deposito en la orientación de la pedogénesis, relación entre los depósitos y la cubierta vegetal.

El estado original de numerosos suelos de pastizales enmaderados del Jura suizo, realizado por los autores, pone igualmente en evidencia una presencia generalizada de limos de origen eólico. Estos resultados permiten discutir más adelante las relaciones entre los suelos y la vegetación que, por el juego del ciclo biogeoquímico, juega un papel en el mantenimiento o la creación de un ambiente pedogenético cálcico. La intensidad del efecto del aporte eólico sobre la pedogénesis dependería así de una combinación trifactorial, integrando, no solamente el espesor del suelo y la porosidad del substrato rocoso, ya fuertemente probados, pero también de la profundidad de enraizamiento fisiológico de la vegetación.

Palabras claves

Evolución del suelos, mineralogía, loess, suelos-vegetación relaciones, pastizales enmaderados, Jura suizo.

Dans le cadre d'une étude phytoécologique sur les pâturages boisés (ou pré-bois) de l'arc jurassien (Gallandat et al., 1995), de nombreux sols distribués sur l'ensemble de la partie suisse de la chaîne ont été décrits. Les observations faites incitent à porter l'attention, en particulier, sur l'origine du matériau constitutif de ces sols et sur les relations entre les sols et les groupements végétaux (Havlicek et al., à paraître). Parmi ces constituants, les limons éoliens⁽²⁾ qui apparaissent dans la quasi totalité des profils ou sondages décrits, sont essentiels.

Ces récentes observations dans un écosystème sylvo-pastoral à large répartition dans le Jura, ainsi qu'une revue de la littérature pédologique s'y rapportant, permettent une vision globale de l'extension et de l'influence des limons éoliens dans la pédogenèse jurassienne, vingt ans après leur mise en évidence par Pochon (1973, 1978).

Rappel de la découverte des limons éoliens dans les sols du Jura

Si l'hypothèse de la présence de loess sur le Jura n'était pas entièrement nouvelle, le mérite de l'avoir démontrée revient à Pochon (1978) qui a étudié quatre situations géologiques dans la région du Mont-Tendre (Jura vaudois), dont les sols et les résidus insolubles des roches sous-jacentes ont été soumis à des analyses minéralogiques et granulométriques, résumées ci-dessous.

Sur calcaires durs, la discontinuité existant entre la composition minéralogique et granulométrique du substrat et celle des sols démontre clairement l'origine allochtone de ces derniers. La proportion importante de plagioclases dans les sols est une preuve minéralogique de l'origine allochtone du matériau constitutif, puisque ce minéral est absent du résidu insoluble des roches concernées. La fraction élevée des chlorites dans les sols par rapport à celle des résidus insolubles est également un indice. Enfin, le quartz et les feldspaths potassiques sont plus abondants dans les sols que dans le substratum, en proportions étroitement liées à celles des plagioclases et de la chlorite. La granulométrie des sols, distribuée selon le mode 16-32 μm (alors que celle du résidu insoluble de la roche est du type 4-8 μm), est homogène du

haut en bas des profils, démontrant ainsi l'impossibilité d'un réarrangement des fractions grossières par suite de l'éluviation des fractions fines.

Sur les marnes des combes anticlinales, les sols des bords de combes contiennent le cortège minéralogique typique de l'allochtone, alors que ceux du centre présentent une association minéralogique concordante avec celle du substrat, conséquence d'une exportation des éléments allochtones par soutirage karstique. Le sol peut y être maintenant qualifié d'autochtone.

La position topographique sommitale de la région étudiée par Pochon (1978) exclut des apports autres qu'éoliens. Il ne peut s'agir par exemple d'un résidu glaciaire alpin, l'endroit étant couvert autrefois par un glacier de calotte jurassien. Le seul vecteur plausible est le vent, dont l'action est confirmée par la morphoscopie des grains de limons, avec des traces de chocs en lunules caractéristiques du transport éolien.

OBSERVATIONS RÉCENTES EN PÂTURAGE BOISÉ

Matériel et méthodes

Dans le cadre de l'étude des pâturages boisés, une centaine de profils pédologiques ont été décrits dans l'arc jurassien suisse (figure 1). Le milieu prospecté n'est toutefois pas parfaitement représentatif de l'ensemble des sols de la chaîne jurassienne. En effet, le pâturage boisé est un milieu semi-naturel, caractérisé par une exploitation mixte sylvo-pastorale et sa répartition géographique est largement dépendante des conditions géomorphologiques originelles. Ainsi, les premiers colons du Jura ont défriché d'abord les terres les plus fertiles essentiellement situées dans les vallons, cuvettes et replats et permettant l'établissement de pâturages, de prairies ou même de cultures si le climat l'autorisait (Rieben, 1957). Ces positions topographiques correspondent aux lieux d'accumulation des limons éoliens et, par conséquent, l'échantillonnage aura tendance à surreprésenter les sols profonds. Néanmoins, les pâturages boisés constituent une part importante des formations végétales de la chaîne jurassienne. Entre 600 et 1400 m d'altitude, ils occupent 17 % du paysage, mais plus de 30 % dès 1 200 m. Ainsi, on peut considérer que l'échantillonnage reflète la diversité des sols jurassiens.

Les méthodes d'analyses physico-chimiques des sols sont celles habituellement utilisées par les pédologues. Les pH H_2O et KCl ont été réalisés dans des suspensions selon le rapport pondéral 1 : 2,5 et mesurés à l'aide d'un pH-mètre à électrode du type Metrohm. Le carbone organique et l'azote total ont été dosés respectivement par les méthodes Anne et Kjeldahl. Le calcaire total a été mesuré avec un calcimètre Bernard. Les cations échangeables ont été dosés par spectrophotométrie

(2) : Dans la littérature, en particulier chez Duchaufour (1983), le loess est donné comme synonyme de limons. Lozet et Mathieu (1990) le définissent comme une formation limoneuse d'origine éolienne alors que les limons, dans une acception géologique, sont considérés comme une formation superficielle continentale meuble (où domine la fraction inférieure à 50 μm) dérivant de sédiments d'origine éolienne et alluviale. Malgré une certaine confusion lexicale, les deux termes «loess» et «limons éoliens» seront ici considérés comme équivalents.

Figure 1 - Situation géographique de la région concernée et lieux d'échantillonnage des sols pour les analyses RX.

Figure 1 - Geographical position of the prospected region and sampling sites for X-ray analysis.

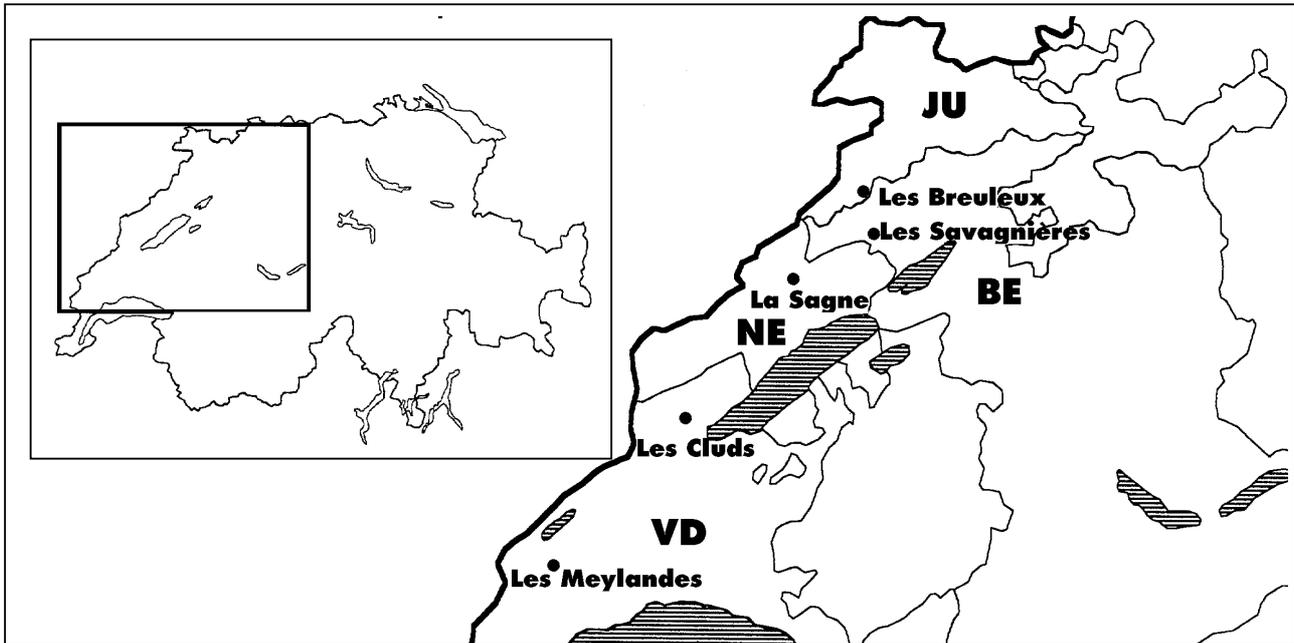


Tableau 1 - Répartition des minéraux majeurs (analyse RX) dans 9 profils de trois types de sols du Jura (5 BRUNISOLS, 2 BRUNISOLS sur CALCOSOLS, 2 NEOLUVISOLS). Résultats d'analyses en % relatifs.

Table 1 - Major mineral element distribution in nine profiles of three soil patterns in the Jura mountains (5 BRUNISOLS, 2 BRUNISOLS on CALCOSOLS, 2 NEOLUVISOLS). Analysis results expressed in relativ %.

Type de sol	Localité	Horizon	Quartz	Fsp-K	Plagio.	Calcite	Goethite	Phyllo.	non dosé
BRUNISOL	La Sagne	A	19,2	1,1	2,6	0,0	0,0	18,9	58,3
		S	26,9	1,8	1,9	0,0	0,0	26,4	43,1
	LesBreuleux	A	34,9	1,3	1,8	0,0	0,0	17,5	44,4
		S	41,5	1,8	3,2	0,0	0,0	19,6	33,9
	LesSavagnières	AS	22,3	1,4	2,2	0,0	1,6	29,5	43,0
		S	21,4	1,4	2,5	0,5	1,4	25,8	47,0
	Les Meylandes	AS	23,5	1,9	1,7	0,0	1,2	32,8	38,9
		S	20,9	2,0	1,3	0,0	0,0	29,1	46,7
	La Sagne	A	25,8	1,2	2,2	0,0	0,0	24,7	46,0
		S	20,7	4,1	2,4	0,0	0,0	24,7	48,1
BRUNISOL sur CALCOSOL	LesSavagnières	ASca	20,1	1,5	2,1	0,8	1,5	27,3	46,7
		Sca	21,7	1,7	1,5	1,4	2,0	31,1	40,6
	Les Meylandes	Aca	22,2	1,7	0,7	1,5	1,2	29,7	42,9
NEOLUVISOL	LesCluds	Sca	19,2	1,9	0,8	0,5	1,3	34,6	41,3
		A	37,5	3,2	4,6	0,0	0,0	21,0	33,7
		AE	40,6	2,2	1,5	0,0	0,0	22,5	33,2
	LesBreuleux	BT	34,8	3,9	3,9	0,0	0,0	22,6	34,7
		A	45,1	1,9	3,0	0,0	0,0	20,1	29,9
		AE	42,2	2,3	2,3	0,0	0,0	18,5	34,7
		BT	42,5	1,6	2,4	0,0	0,0	20,1	33,5
IIBT	25,6	1,4	2,0	0,0	0,0	19,0	52,0		

d'absorption atomique après extraction par KCl (ou NH_4Cl pour K^+). Les fractions granulométriques ont été établies par la méthode des pipettes Robinson. Après destruction des carbonates et de la matière organique, puis dispersion des éléments fins ($< 50 \mu\text{m}$), les argiles, limons fins et grossiers sont séparés par prélèvement à la pipette Robinson. Les sables fins, moyens et grossiers sont obtenus par tamisage. Les sols sont nommés selon le Référentiel pédologique (Baize et Girard, 1995).

Une analyse par diffraction des rayons X a été effectuée sur 21 horizons des trois types les plus fréquents dans les pâturages boisés : BRUNISOL, BRUNISOL sur CALCOSOL et NEOLUVISOL. Les minéraux majeurs ont été quantifiés par les intensités des pics de diffraction RX des poudres désorientées. Ce dosage semi-quantitatif a été adapté à un diffractomètre SCINTAGTM XDS 2000 (Rolli, 1992). Une partie des minéraux n'a pu être dosée. Elle comprend essentiellement des minéraux argileux pour lesquels il n'existe pas, à l'heure actuelle, de bon standard défini sur SCINTAGTM. Les sols prélevés pour les analyses pédologiques ne sont pas les mêmes que ceux qui ont été utilisés pour les analyses minéralogiques. Ils sont néanmoins comparables, car ils proviennent de régions mésoclimatiques identiques (figure 1).

Résultats des analyses minéralogiques

La présence de plagioclases est un indicateur fiable d'un matériel allochtone dans le Jura, car ce minéral est absent de la composition minéralogique des roches totales des calcaires crétacés (Jouaffre, 1989) et jurassiques (Pochon, 1978). En analysant le résidu insoluble des roches du Valanginien, du Barrémien et de l'Hauteriviien, Jouaffre (1989) n'en décèle aucune trace. Le même auteur note que les feldspaths potassiques sont également absents des différents faciès géologiques de ces trois couches, à l'exception de deux échantillons où ce minéral représente 0,4 % du résidu insoluble. L'analyse minéralogique des sols des pâturages boisés (tableau 1) révèle la présence constante de plagioclases (entre 0,7 et 4,6 %) et un pourcentage de feldspaths potassiques plus élevé que dans le résidu insoluble de la roche (1,1 à 4,1 %).

A l'exception du faciès gréseux du Valanginien, le quartz et les phyllosilicates ne représentent qu'une faible proportion du résidu insoluble de la roche calcaire, alors que dans les sols issus des apports allochtones, leur pourcentage moyen s'élève respectivement à 27,5 % et 24,8 %. On peut noter que les amphiboles (témoins d'apports allochtones), mis en évidence dans le Jura pour la première fois par Gobat et al. (1989) n'ont pas été retrouvées dans nos échantillons.

Résultats des analyses pédologiques

Les tableaux 2-I et 2-II présentent les caractéristiques physico-chimiques des quatre types de sols les plus représentés dans le domaine des pâturages boisés du Jura suisse. On peut

noter en particulier que les sols développés exclusivement sur limons éoliens (BRUNISOLS et NÉOLUVISOLS) présentent des pH inférieurs à 6,0. Ceci confirme la position taxonomique des BRUNISOLS. En effet, le pH de l'horizon Sci des CALCISOLS, véritables sols jurassiens décalcifiés, est par définition supérieur à 6,5 (Baize et Girard, 1995). L'analyse granulométrique confirme également l'allochtonie du matériel parental des BRUNISOLS et des NÉOLUVISOLS. L'abondance des limons fins, liée à la raréfaction des limons grossiers et la très faible proportion des sables, a été décrite comme typique de l'association allochtone par Pochon (1978).

Répartition des sols

Les sols décrits se répartissent en six catégories principales selon le processus pédogénétique dominant (figure 2). Près de la moitié de l'échantillon (45 %) peut être rangée dans la catégorie des sols sous influence prépondérante de limons allochtones. Ces sols, qui comprennent les BRUNISOLS et les NÉOLUVISOLS, sont issus d'un matériel à l'origine acide et ils ont suivi la voie de la brunification, voire d'un début de lessivage. Complètement abstraits du contexte calcaire au début de leur évolution, ils ont subi par la suite une recalcification plus ou

Figure 2 - Répartition des sols des pâturages boisés du Jura suisse d'après le processus pédogénétique dominant.

Figure 2 - Distribution of the wooded pastures' soils in the Swiss Jura mountains according to the main pedogenetic process.

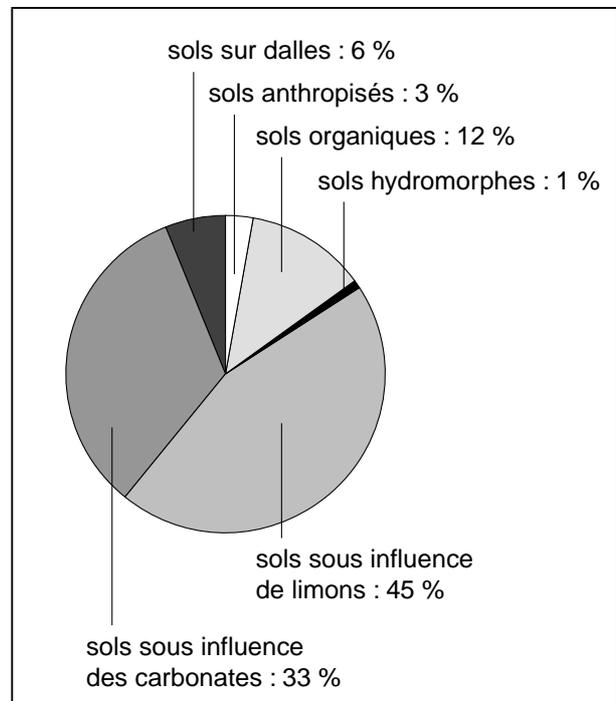


Tableau 2 - Analyses physico-chimiques des quatre types de sols les plus représentés dans les pâturages boisés du Jura suisse : CALCOSOL, BRUNISOL sur CALCOSOL, BRUNISOL, NEOLUVISOL.

Table 2 - Physico-chemical analysis of fourth most frequent wooded pastures' soil patterns in the Swiss Jura mountains : CALCOSOL, BRUNISOL on CALCOSOL, BRUNISOL, NEOLUVISOL.

tab. 2-1	argiles	limons		sables			Ca	Mg	K	Na	Mn
	<2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	0.2-0.5mm	0.5-2mm	meq/100g de sol				
CALCOSOL											
horizonA	60,7	27,5	09,8	1,8	0,1	0,1	45,4	1,7	0,6	0,3	0,1
horizonSca	51,8	36,0	10,5	1,3	0,1	0,1	54,1	0,9	0,5	0,3	0,0
BRUNISOL/CALCOSOL											
horizonA	51,6	39,6	05,7	2,6	0,3	0,2	35,1	0,3	0,5	0,2	0,1
horizonSci	67,6	21,2	06,1	3,9	0,6	0,6	59,1	0,4	0,5	0,3	0,1
BRUNISOL											
horizonA	42,1	27,3	23,1	5,6	1,3	0,6	20,9	1,1	1,2	0,3	0,6
horizonS	39,6	26,4	26,4	5,7	0,6	1,3	19,7	0,5	0,7	0,3	0,5
NEOLUVISOL											
horizonA	39,7	36,5	19,3	3,9	0,5	0,1	11,6	1,0	0,9	0,3	0,9
horizonAE	33,5	39,8	22,4	3,5	0,5	0,3	04,4	0,4	0,3	0,3	0,3
horizonBT	39,3	39,0	17,7	3,3	0,5	0,2	14,7	0,3	0,4	0,3	0,1

tab. 2-2	pH H ₂ O	pH KCl	C org (%)	N tot (%)	C/N	CaCO ₃ tot (%)	code Munsell
CALCOSOL							
horizon A	6,5	5,6	13,6	1,3	10,8	0,1	10YR2/2
horizon Sca	7,4	6,6	10,9	1,1	9,7	0,6	10YR3
BRUNISOL/CALCOSOL							
horizon A	6,4	5,4	11,3	1,0	11,1	0,0	10YR3/2
horizon Sci	6,5	5,4	9,3	0,8	11,4	0,1	10YR2/2
BRUNISOL							
horizon A	5,5	4,4	5,4	0,6	9,5	0,0	10YR4/3
horizon S	5,6	4,4	2,8	0,3	8,3	0,0	10YR5/3
NEOLUVISOL							
horizon A	5,0	3,8	6,0	0,3	18,7	0,0	10YR5/3
horizon AE	5,2	3,8	1,8	0,2	8,0	0,0	10YR5/4
horizon BT	6,3	4,8	0,6	0,2	4,0	0,0	10YR6/4

moins modérée grâce à la remontée des cations par la végétation. Leur signification agronomique est importante car, dans le contexte des sols filtrants sur calcaire, leur composition granulométrique permet l'établissement d'un régime hydrique favorable à la végétation (Gallandat et al., 1995).

Les sols sous influence prépondérante de carbonates (CALCOSOLS et BRUNISOLS sur CALCOSOL), souvent considérés comme typiques du Jura, représentent environ un tiers de l'échantillonnage.

Les quatre dernières catégories de la figure 2 se répartissent entre des sols stationnels. Les LITHOSOLS sont liés à des dalles calcaires affleurantes, souvent décapées secondairement par le piétinement du bétail, alors que les sols anthropisés (ANTHROPOSOLS) se sont développés sur des tas de pierres (murgiers) amoncelés par les agriculteurs lors du nettoyage des champs. Les sols organiques (ORGANOSOLS INSATURÉS) doivent leur existence à la présence d'une litière acidifiante sous climat froid. On les observe essentiellement sur des calcaires compacts fissurés, lapiazés, à partir de 1 400 m d'altitude. Les rares sols hydromorphes (RÉDOXISOLS) se développent sur des affleurements marneux, en présence de nappe permanente. Ils ne sont que très faiblement représentés dans notre échantillonnage car ils n'ont aucune valeur agronomique.

Apports de ces nouvelles observations

Trois hypothèses quant à l'extension des limons éoliens dans les sols du Jura et aux facteurs délimitant leur rôle dans la pédogenèse peuvent être établies à ce stade de la discussion :

a) L'échantillonnage effectué permet d'étendre à l'ensemble du Jura plissé le processus mis en évidence par Pochon (1978) dans la partie sud-ouest de la chaîne et déjà confirmé par plusieurs auteurs dans le Jura français (voir plus bas).

b) Les limons éoliens existent dans une très large gamme de sols jurassiens, y compris en ambiance calcique ou calcaire.

c) La végétation joue un rôle clé dans l'évolution des sols sur limons éoliens, par sa régulation du cycle du calcium (Havlicek et al., à paraître).

Ces hypothèses seront discutées après une large et nécessaire revue de la littérature pédologique de ces vingt dernières années, faisant le point des connaissances sur les limons éoliens dans les sols du Jura et de quelques autres massifs.

ETAT DES CONNAISSANCES

Les limons éoliens dans le massif jurassien

Les études pédologiques sur le massif jurassien se divisent en

trois catégories : celles où les limons éoliens ne sont pas signalés, celles où ils sont signalés sans être discutés, celles enfin qui abordent la problématique de manière plus approfondie.

Articles ne mentionnant pas les limons éoliens

Cette catégorie regroupe d'abord tous les articles antérieurs à la thèse de Pochon (1978), sauf un mentionné plus bas, et d'autres plus récents où la discussion de cette problématique n'était pas nécessaire. Ils ne sont pas cités ici, à l'exception de celui de Boulaine (1972), qui propose deux voies d'évolution des sols jurassiens : la voie basique sur calcaires friables, la voie acide sur calcaires durs, tout en signalant que les sols réellement calcaires sont rares.

Articles avec simple mention des limons éoliens

La quasi totalité des articles s'intéressant à l'évolution ou à la répartition des sols du Jura reprennent la découverte de Pochon (1978). La présence de couches limoneuses épaisses sur la roche calcaire est mentionnée par Gaiffe et Schmitt (1980), qui décrivent des sols bruns sur limons, et par Gaiffe et Bruckert (1984), pour lesquels existent des sols à couches limoneuses riches en fer, d'origine récente et épaisses de 40 à 60 cm, avec rupture granulométrique nette en profondeur.

Les publications où la présence de limons éoliens est explicitée - mais non discutée ou analysée - sont nombreuses. Citons Bruckert et Gaiffe (1980), où ils peuvent être à l'origine des sols brunifiés, en complément aux matériaux de décarbonatation restés sur place ou migrés. Les mêmes auteurs (1993) présentent deux sols (humocalcique, brun calcique) dont le matériau d'origine est composé du résidu insoluble de la roche et des limons éoliens. Ils confirment aussi la présence de dépôts alloctones dans plusieurs sols de l'étage montagnard (Gaiffe et Bruckert, 1985).

Michalet (1982) développe peu le thème des limons éoliens, malgré une vision générale de l'évolution des sols en climat jurassien subalpin. Il définit trois types de pédogenèse, selon la proportion entre silicates et carbonates (voie calcaire, voie calcique, voie brunifiante), mais il ne mentionne les limons éoliens que dans un sol brun ocreux.

Articles analysant et discutant les limons éoliens

Même si certains de ces travaux ne font que prouver, par analyse, la présence des limons, la plupart discutent leur influence sur la pédogenèse jurassienne, du point de vue spatial (extension du phénomène) ou fonctionnel. C'est ainsi que l'intensité de l'influence des limons sur la pédogenèse est contrôlée, selon les auteurs, par l'épaisseur du dépôt ou (et) par le degré de fissuration de la roche sous-jacente.

Preuves de la présence des limons éoliens

A notre connaissance, la première mention des limons éoliens dans la littérature pédologique jurassienne (exception faite de suppositions du siècle dernier relatives par Pochon, 1978) est le fait de Béguin et Pochon (1971), dans un article sur les sols des nardaies du Jura, où les limons sont fortement suspectés d'être présents. Pochon (1976) met en évidence un assemblage minéralogique d'origine allochtone constant dans le domaine jurassien, d'âge tardiwürmien et postwürmien. Aubert et al. (1979) rappellent que le dépôt éolien a atteint 45 cm d'épaisseur environ sur le Jura et que sa texture et sa composition minéralogique sont différentes de celles du substratum. Sa décarbonatation précoce (Pochon, 1978) a amené la formation de sols brunifiés et non de sols calcimagnésiques.

En 1989, Jouaffre développe une réflexion importante sur la pédogenèse et la rubéfaction post-würmienne des sols du Jura en climat montagnard humide. Dans ce contexte, il reprend largement les idées de Pochon et s'intéresse à la composition minéralogique des sols et du résidu insoluble des roches crétacées. Il démontre, pour une partie des sols étudiés, la provenance allochtone du sol par rapport à la roche sous-jacente.

Extension des limons sur l'arc jurassien

En 1978, Bouyer et al. précisent que la plupart des sols de l'arc jurassien sont constitués aux trois-quarts par un matériau d'apport éolien tardi-würmien à post-würmien, le reste provenant du résidu de décarbonatation des formations calcaires du substrat. Cet apport est riche en Mg et en Fe, fournis par les chlorites, et influence ainsi directement l'intensité de la brunification des sols. Dans une synthèse sur les sols de Franche-Comté, Bruckert et Gaiffe (1985) signalent les limons éoliens à deux reprises, en précisant leur mise en place et leur large répartition dans le Jura. À côté des limons éoliens s. str. se trouvent aussi « des limons ruisselés qui peuvent provenir du remaniement des premiers par les eaux de ruissellement, ou bien être déposés lors des crues importantes dans le lit majeur des rivières ». La présence de limons éoliens « primaires » et de limons remaniés par alluvionnement ou colluvionnement est aussi attestée par Bruckert et Bekkary (1992).

En 1987, Guenat cite les limons éoliens comme composants de base de la pédogenèse jurassienne. Mais, sur les versants du pied du Jura suisse, les caractéristiques granulométriques et minéralogiques des apports glaciaires directs (moraines alpines) orientent préférentiellement la pédogenèse..

Enfin, dans une comparaison de pelouses du Haut-Jura, Gobat et al. (1989) montrent qu'au point de vue minéralogique la ressemblance est très grande entre le sol humo-calcaïque et le sol brun lessivé, à caractères physico-chimiques pourtant très différents, l'ensemble des résultats corroborant l'origine éolienne des sols. Un lien étroit unit les types de végétation et

les sols à ambiance acide ou calcaïque, selon que les limons influencent ou non la pédogenèse.

Rôle de l'épaisseur du dépôt éolien dans la pédogenèse

En 1982, Balesdent mentionne les limons comme éléments importants du substratum de sols du Crêt de la Neige. Il estime que le premier critère morphologique de distinction des sols est l'épaisseur des profils. En 1986, Michalet et Bruckert montrent que la profondeur du sol est essentielle pour séparer les voies pédogénétiques calcaïques ou acides mises en évidence par Boulaine (1972), la limite d'influence de l'ion calcium s'établissant à 35 cm environ. Dans les sols profonds, l'éolien, par sa richesse en fer, est un frein à la podzolisation, conjointement à la proximité du calcaire.

Rôle de la fissuration de la roche sous-jacente aux limons éoliens

En 1987, Gaiffe décrit de nombreux sols avec limons, parfois d'origine éolienne, mais aussi d'origine non précisée. L'épaisseur moyenne des sols est évaluée à 60 cm, dont 50 cm d'éolien et quelques centimètres de résidu insoluble et de matière organique. Selon le degré de fracturation des roches, les limons éoliens sont encore présents en traces dans les sols sur calcaire concassé, ont disparu des calcaires lapiazés ou sont encore bien présents sur les calcaires en dalle. Bruckert et Gaiffe (1989) et Gaiffe et Bruckert (1990, 1991), confirment que l'aptitude des roches à la fracturation joue un rôle primordial dans l'orientation de la pédogenèse.

Les limons éoliens dans d'autres massifs

En France, Bonte (1963) semble être le premier à souligner le rôle particulier joué par des matériaux silicatés dans l'altération des calcaires qu'ils recouvrent. Bouma et al. (1968) aux Pays-Bas ainsi que Magniant et al. (1973) en France décrivent des sols lessivés glossiques développés sur limons éoliens. Dans les deux cas, il s'agit de dépôts profonds (2,5 à 3 m) où le loess constitue l'unique roche-mère du profil étudié. Esteoule et al. (1971) décrivent et analysent des sols sur placage superficiel de limon loessique en Bretagne, sans en discuter toutefois l'origine ni la pédogenèse. Jamagne (1973) analyse de manière approfondie les formations loessiques du nord de la France, portant l'accent sur les processus pédogénétiques.

Dans le Vercors, massif calcaire analogue au Jura, Bottner et Paquet (1972) décrivent de nombreux sols depuis les lithocalcaïques humifères et les rendzines jusqu'aux sols lessivés. Ils les situent implicitement dans une même série évolutive, car ces auteurs n'ont pas identifié de dépôts d'origine allochtone. Ils concluent que sur calcaires tendres en montagne, les sols ont des caractéristiques comparables à celles des sols sur terrain siliceux. Cette convergence n'est effective-

ment pas fortuite car, d'après nos propres observations (Havlicek et al., 1996), le Vercors a également subi des dépôts éoliens d'origine cristalline orientant la pédogenèse dans la voie acide.

Duchaufour (1983) traite de l'évolution des sols sur loess en fonction de l'âge du dépôt de limons. Il cite des sols bruns lessivés sur loess würmien en Allemagne du Sud-Ouest qui résistent aux processus de dégradation en raison d'une réserve profonde de calcium. Il mentionne également des sols à pédogenèse multiple sur limons, où les horizons supérieurs brunifiés sont issus de loess récent et reposent sur des horizons glossiques profonds, appelés paléoargilliques. Dans les sols sur calcaires durs des Alpes suisses occidentales, Spaltenstein (1984) prouve la presque omniprésence des limons éoliens, qui ont atteint une épaisseur de 30 cm environ, après un dépôt entre le retrait des glaciers et 4 000 av. J.-C. Ces limons sont minéralogiquement très homogènes, riches en fer, micas blancs, chlorites et amphiboles. Spaltenstein ajoute que, pratiquement où que l'on soit en Suisse, l'hypothèse de l'éolien doit être prise en compte. Il s'étonne également que les loess aient été en général singulièrement négligés lors de l'étude des sols de montagne, y compris après leur découverte dans le Haut-Jura par Pochon (1978).

Au Texas, Rabenhorst et Wilding (1986) étudient les sols issus de deux matériaux parentaux et démontrent l'origine allochtone du matériel non carbonaté. Dans un autre article, Rabenhorst et al. (1984) analysent les dépôts actuels de loess. Ceux-ci sont peu importants (1 mm/100 ans) mais, vu la faible épaisseur des sols et la discontinuité granulométrique et micromorphologique entre l'éolien actuel et les sols avoisinants, leur contribution peut être potentiellement considérable. Toujours en Amérique, Levine et al. (1989) constatent la présence simultanée, sous un même climat, de sols lessivés et de sols calcaires sur le Plateau du Colorado. Ayant mis en évidence la présence du loess du Peorian (glaciation contemporaine du Würm) recouvrant des roches calcaires dolomitiques, ils analysent la porosité de la roche. L'orientation pédogénétique, selon ces auteurs, est un effet combiné de la perméabilité de la roche sous-jacente, caractère prioritaire, et du dépôt éolien.

Dans la vallée de la Binn (Alpes suisses), Freléchoux (1990) observe des formations végétales calcicoles sur des gneiss. Il s'agit ici du phénomène inverse, où des dépôts éoliens dolomitiques recouvrent la roche cristalline. Enfin, Lelong et al. (in : Bonneau et Souchier, 1994) citent de nombreux cas de sols sur limons éoliens en Ile-de-France, en Lorraine, en Allemagne et en Tchécoslovaquie.

DISCUSSION

Extension des limons éoliens dans les sols du Jura

La revue de la littérature et les résultats originaux présentés valident la première hypothèse et confirment la présence de limons éoliens dans l'ensemble du Jura plissé franco-suisse, dans des milieux très divers : prairies, pelouses sommitales, pâturages, pâturages boisés et forêts. La deuxième hypothèse est également vérifiée : tous les types de sols, sauf exceptions dues à l'érosion ou au sous-tirage karstique, contiennent des limons éoliens. Ces derniers ne sont donc pas limités aux sols où ils s'expriment fortement dans la morphologie ou la pédogenèse (NEOLUVISOLS, BRUNISOLS), mais on les trouve aussi répandus dans des sols à ambiance calcique (CALCISOLS, RENDISOLS, ORGANOSOLS CALCIFIQUES) ou calcaire (CALCOSOLS, RENDOSOLS).

Rôle de la végétation dans la pédogenèse sur limons éoliens

L'observation conjointe des sols, des humus et des synusies végétales, herbacées, arbustives ou arborescentes des pâturages boisés (Gallandat et al., 1995 ; Havlicek et Gobat, 1996), nous amène de surcroît à attribuer un rôle essentiel à la végétation dans le maintien (sur dépôts minces), voire la création (sur dépôts épais) d'une ambiance calcique. La remontée biologique d'éléments, notamment de cations basiques nutritifs, est un fait établi, empêchant une acidification trop prononcée du sol (Duchaufour, 1983). Les recherches sur les pâturages boisés confirment ce rôle actif de la végétation dans le contrôle de l'influence des limons éoliens, contrôle dont les mécanismes seront détaillés ailleurs (Havlicek et al., à paraître). En particulier, le rôle des arbres à enracinement profond sera examiné, qui peuvent atteindre ou non, selon l'épaisseur du dépôt et la fracturation de la roche, les réserves calciques profondes.

Intensité de l'influence des limons éoliens sur la pédogenèse dans le Jura

Plusieurs des auteurs cités ont parfaitement montré la place essentielle occupée par les limons éoliens, conjointement ou non au résidu insoluble, dans l'orientation de la pédogenèse. Il est particulièrement net dans les sols bruns lessivés (NEOLUVISOLS) des situations de replat ou de dépression mais s'exprime aussi dans des sols de type brun oligotrophe ou brun ocreux (ALOCRISOLS), dans lesquels le loess, ralentit la podzolisation au profit de la brunification. En revanche, les limons éoliens, même présents, ne semblent guère jouer de rôle dans les sols à forte ambiance calcique (sols humo-calciques = RENDISOLS OU ORGANOSOLS CALCIFIQUES).

Entre ces deux pôles, la situation est plus complexe pour des sols de type général brun mésotrophe ou brun calcique. Dans ces situations, nous émettons l'hypothèse que l'importan-

ce du rôle de l'éolien dans la pédogenèse sur calcaire dépend d'une combinaison trifactorielle entre l'épaisseur du dépôt, la porosité de la roche sous-jacente et la profondeur physiologique d'enracinement de la végétation. Nous complétons ainsi les visions mono- ou bifactorielles des auteurs, qui ne mettent généralement en évidence que le rôle de la porosité de la roche, souvent jugé prioritaire, et (ou) celui de l'épaisseur du dépôt.

La végétation paraît ainsi être à nos yeux un des trois éléments clés de la compréhension de l'évolution des sols brunifiés s.l. du Jura. Elle seule peut lutter contre la forte lixiviation

du calcium observée sous le climat jurassien et, par le jeu du cycle biologique, « contraindre » la pédogenèse dans la voie calcique (figure 3).

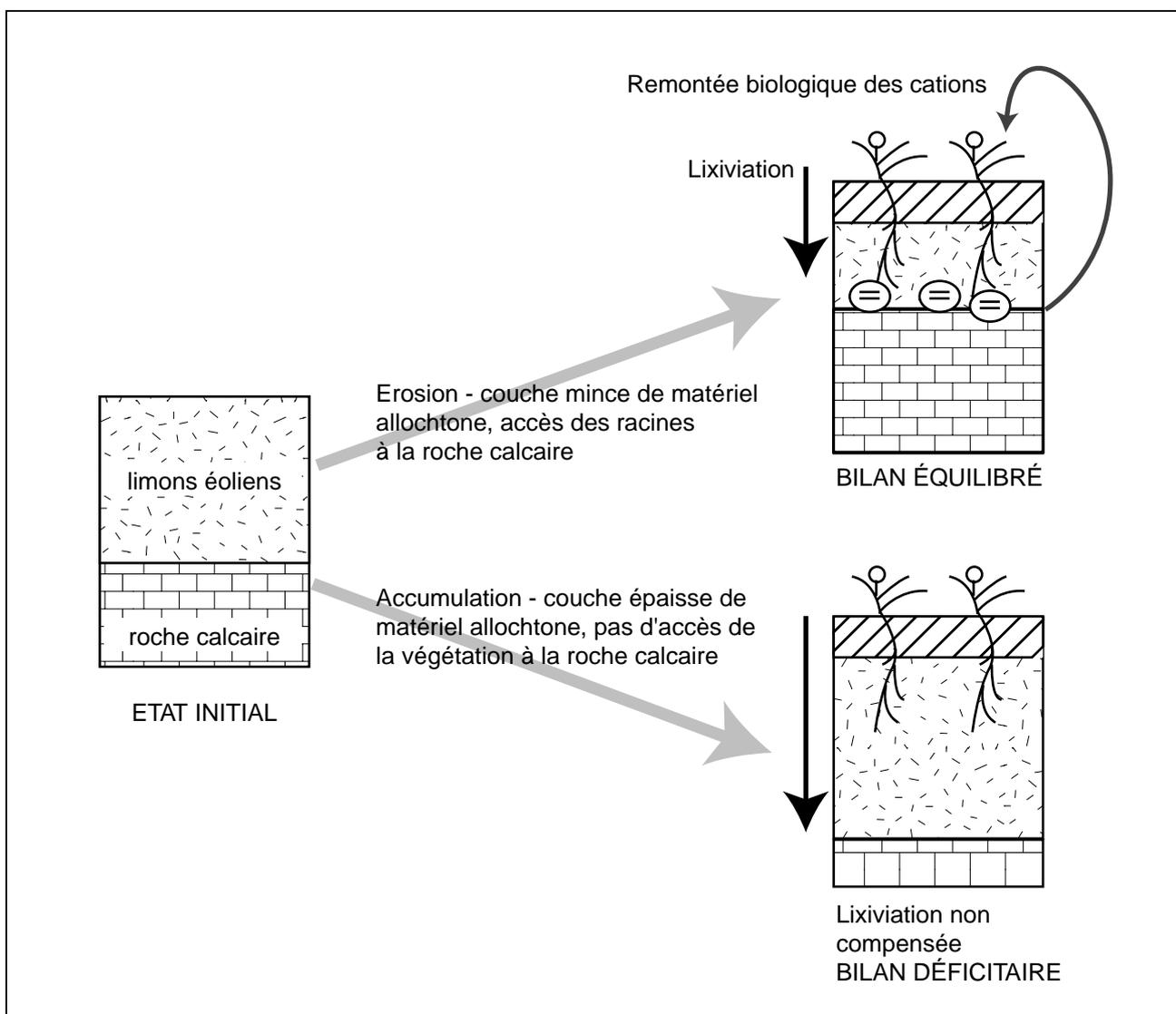
Bilan des connaissances actuelles

Depuis vingt ans, la présence des limons éoliens dans les sols du Jura a été largement confirmée après leur découverte par Pochon (1973, 1978). Parmi les éléments précisés ou observés depuis, les faits suivants ressortent :

- les nouveaux profils décrits montrent que le dépôt concerne la quasi totalité de la chaîne jurassienne ;

Figure 3 - Rôle de la végétation dans la pédogenèse en relation avec l'épaisseur du dépôt éolien.

Figure 3 - The role of the vegetation in soil evolution related to the depth of loess deposits.



- les limons éoliens observés dans les sols sont « en place » ou proviennent d'un remaniement secondaire par colluvionnement ou alluvionnement ;
- ils ont pu disparaître des sols par érosion sur les calcaires lapiézés, le sous-tirage karstique ayant déjà été prouvé par Pochon (1978) pour les dolines ;
- ils peuvent être à l'origine des sols brunifiés, en complément aux matériaux de décarbonatation restés sur place ou ayant migré, mais ils s'opposent à la podzolisation ;
- ils ne se retrouvent pas seulement dans les sols brunifiés ou lessivés, mais aussi dans des sols plus minces à ambiance calcaïque ou calcaire ;
- en revanche, leur effet réel sur la pédogenèse dépend fortement de l'épaisseur du dépôt qui, lui-même, dépend de la porosité de la roche sous-jacente : jusqu'à 35 à 40 cm, la pédogenèse reste sous l'influence primordiale du calcium ;
- l'effet des limons sur la pédogenèse s'estompe au profit de la moraine, en cas de mélange avec cette dernière ;
- la végétation, à la fois reflète parfaitement l'intensité du rôle des limons dans la pédogenèse et l'épaisseur des dépôts et en contrôle cette même intensité par rétroaction (effet de feed-back).

CONCLUSION

La littérature pédologique montre que de très nombreux sols se sont formés sur des apports éoliens et qu'il s'agit d'un cas fréquent à la surface du globe. A l'exclusion des effets dus aux modifications texturales lentes, l'évolution pédologique générale n'est guère modifiée si la qualité minéralogique des limons déposés est semblable à celle de la roche-mère. En revanche, la pédogenèse peut être complètement réorientée si la minéralogie du dépôt et celle de la roche ne concordent pas. Le cas le plus fréquent est celui où des limons éoliens, décarbonatés dès l'origine ou alors rapidement décarbonatés et décalcifiés, conduisent à une pédogenèse par voie acide sur des roches carbonatées, comme dans le Jura. La situation inverse est aussi possible, comme dans la vallée de Binn, où des roches siliceuses supportent des sols à évolution calcimagnésique, eux-mêmes recouverts d'une végétation calcicole.

L'histoire des limons éoliens dans les sols n'est ainsi pas encore terminée ! Leur rôle précis dans les différentes voies pédogénétiques reste à établir, ainsi qu'une comparaison générale de leurs effets sous différents climats. Leur vitesse d'évolution serait également intéressante à étudier, en particulier en la comparant à celle de la végétation, notamment dans des remplacements éventuels de groupements végétaux acidophiles par des groupements calcicoles ou inversement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. M. Burkhard et B. Kübler, professeurs, et M. Th. Adatte, chef de travaux, de l'Institut de géologie de l'Université de Neuchâtel, pour leurs remarques pertinentes et la mise à disposition du laboratoire d'analyses minéralogiques, MM. J.-D. Gallandat, professeur, F. Gillet, chef de travaux et A. Perrenoud, de l'équipe de recherche sur les pâturages boisés du Jura suisse, ainsi que Mmes M. Gaiffe, de l'Université de Besançon et Cl. Guenat, de l'Ecole polytechnique de Lausanne, pédologues, pour leur lecture critique du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Aubert D., Gratier M. et Pochon M., 1979 - Livret-guide de quelques sols types du Haut-Jura et du pied du Jura. EPFL, Péd. 4., 48 pp.
- Baize D. et Girard M.-C., 1995 - Référentiel pédologique. INRA, Paris, 332 pp.
- Balesdent J., 1982 - Etude de la dynamique de l'humification de sols de prairies d'altitude (Haut-Jura) au moyen des datations ¹⁴C des matières organiques. Thèse Univ. Nancy I, 90 pp. + annexes.
- Béguin C. et Pochon M., 1971 - Contribution à l'étude pétrographique et géochimique des sols des nardaies jurassiennes (Nardetum jurassicum). Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat. 94 : 67-76.
- Bonneau M et Souchier B., 1994 - Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 665 pp.
- Bonte A., 1963 - Les remplissages karstiques. *Sedimentology* 2 : 333-340.
- Bottner P. et Paquet H., 1972 - La pédogenèse sur roches-mères calcaires tendres dans les étages bioclimatiques montagnard, subalpin et alpin des Préalpes françaises du Sud. *Suppl. Ass. Fr. Etude Sol*, 1 : 63-79.
- Boulaine J., 1972 - Au sujet de quelques sols formés sur roches calcaires en climat perhumide frais (Jura méridional). *Sci. du Sol*, 1 : 79-84.
- Bouma J., Pons L.J. et van Schuylenborgh J., 1968 - On soil genesis in temperate humid climate. VI. The formation of a glossudalf in loess (silt loam). *Neth. J. Agric. Sci.*, 16 : 58-70.
- Bouyer Y., Miserez J.-J. et Pochon M., 1978 - Inventaire géochimique et bilan du fer dans le sol et les eaux du karst jurassien : état, importance, déplacements. EPFL, Péd. 1, 94 pp.
- Bruckert S. et Bekkary M., 1992 - Formation des horizons diagnostiques argiliques et de fragipan en fonction de la perméabilité des roches. *Can. J. Soil Sci.* 72 : 69-88.
- Bruckert S. et Gaiffe M., 1980 - Pédogenèse en pays calcaire glaciaire ou karstique. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, 4e série Biol. vég. : 19-68.
- 1985 - Les sols de Franche-Comté. C.U.E.R. Univ. de Franche-Comté, Besançon, 141 pp.
- 1989 - Processus de formation et de fonctionnement des sols en relation avec le réseau poral des roches. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, Géol. 4 (9) : 37-48.
- 1993 - Rôle de la porosité des roches dans le transfert de l'eau et le régime hydrique des sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 316 (II) : 1455-1461.
- Duchaufour Ph., 1983 - Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Paris, Masson. 2e éd. 510 pp.
- Esteoule J., Guyader J. et Touffet J., 1971 - Les sols de la forêt de Villecartier. *Bull. Ass. Fr. Etude Sol*, 2 : 29-46.
- Freléchoux F., 1990 - Typologie et cartographie de la végétation du Haut Val de Binn. *Trav. dipl. Univ. Neuchâtel*, 102 pp.
- Gaiffe M., 1987 - Processus pédogénétiques dans le karst jurassien. Analyse de la complexation organo-minérale en ambiance calcaïque. Thèse

- doct. Etat Univ. Fr. Comté, Besançon, 160 pp.
- Gaiffe M. et Bruckert S., 1984 - Un problème lié au karst : la fuite des terres du Jura. Publ. C.U.E.R., Univ. Besançon, 5 : 32-50.
- 1985 - Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Soils and Geomorphology, Catena suppl.*, 6 : 159-174.
- 1990 - Origine paléoécologique de l'aptitude des calcaires jurassiens à la fracturation. Conséquences tectoniques, pédogénétiques et écologiques. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 113 : 191-206.
- 1991 - Déterminisme paléoécologique des écosystèmes actuels du Haut-Jura, en relation avec la fracturation des roches. *Ann. Sci. For.* 48 : 575-591.
- Gaiffe M. et Schmitt A., 1980 - Sols et végétation à l'étage montagnard dans les forêts du Jura central (Haute vallée du Doubs, de Mouthé à Pontarlier). *Sci. du Sol*, 4 : 265-297.
- Gallandat J.-D., Gillet F., Havlicek E. et Perrenoud A., 1995 - Typologie et systémique phytoécologique des pâturages boisés du Jura suisse. Rapport final de mandat. Univ. Neuchâtel.
- Gobat J.-M., Duckert O. et Gallandat J.-D., 1989 - Relations entre microtopographie, sol et végétation dans les pelouses pseudoalpines du Jura. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.*, 112 : 5-17.
- Guenat C., 1987 - Les sols forestiers non hydromorphes sur moraines du Jura vaudois. Pédogenèse et relations sol - végétation. Thèse E.P.F.L. No 693, Lausanne, 142 pp. + annexes.
- Havlicek E., Adatte Th et Gobat J.-M. - 1996. Les apports allochtones dans les sols du Jura, du Vercors et des Dolomites. Colloque « Sols et végétation de montagne », Grenoble, 8-12.7.1996, Résumés des communications.
- Havlicek E. et Gobat J.-M. - 1996. L'humus, un révélateur du fonctionnement de l'écosystème. Un exemple des pâturages boisés du Jura suisse. Colloque « Sols et végétation de montagne », Grenoble, 8-12.7.1996, Résumés des communications.
- Havlicek E., Gobat J.-M. et Gillet F., à paraître - Relations mutuelles entre la végétation et les sols sur matériel allochtone dans le Jura.
- Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations lacustiques du Nord de la France. INRA. 438 pp.
- Jouaffre D., 1989 - Pédogenèse et rubéfaction post-würmienne en climat montagnard humide (Jura). Thèse doct. Univ. Franche-Comté, Besançon, 277 pp.
- Levine S.J., Hendricks D.M. et Schreiber J.F.jr., 1989 - Effect of bedrock porosity on soils formed from dolomitic limestone residuum and eolian deposition. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 856-862.
- Lozet J. et Mathieu C., 1990 - Dictionnaire de la science du sol. 2e éd. Technique et Documentation. Lavoisier. 384 pp.
- Magniant D., Dutil P. et Jamagne M., 1973 - Etude d'un sol lessivé glossique développé sur limon éolien en forêt des Trois-Fontaines (Marne). *Ann. agron.*, 24 (2) : 219-240.
- Michalet R., 1982 - Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage sub-alpin du Jura. Thèse 3ème cycle Univ. Nancy I, 120 pp.
- Michalet R. et Bruckert S., 1986 - La podzolisation sur calcaire du subalpin du Jura. *Sci. du sol*, 24 (4) : 363-375.
- Pochon M., 1973 - Apports allochtones dans les sols jurassiens (Jura vaudois et Jura neuchâtelois). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.*, 96 : 135-147.
- 1976 - Les argiles, indicateurs chronologiques d'un encroûtement calcaire. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.*, 99 : 109-118.
- 1978 - Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. *Mém. Soc. helv. Sci. nat.*, 190 pp.
- Rabenhorst M.C., Wilding L.P. et Girdner C. L., 1984 - Airborne dusts in the Edwards Plateau Region of Texas. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 621-627.
- Rabenhorst M.C. et Wilding L.P., 1986 - Pedogenesis on the Edwards Plateau,