

# Aspects minéralogiques et pédogénétiques des "limons rouges" des plateaux bourguignons

Noël LENEUF\* et Maurice LAMOUREUX\*\*

\*Institut des Sciences de la Terre de Dijon.

\*\*pédologue de l'ORSTOM

## RÉSUMÉ

*Sur les plateaux calcaires jurassiques de Bourgogne des formations rouges posent un certain nombre de problèmes de pédogenèse. L'étude des minéraux lourds de ces « limons rouges » nous conduit à l'hypothèse d'une origine en grande partie allochtone, n'exluant pas des apports éoliens.*

*La fraction fine présente une gamme de minéraux argileux faisant penser à des processus de pédogenèse plus ou moins anciens, pouvant également se reconnaître à la rubéfaction des produits ferrugineux venant en recouvrement des minéraux argileux.*

## ZUSAMMENFASSUNG

*Rotböden auf der Kalkformation des burgundischen Juras stellen uns einige pedogenetische Probleme.*

*Die Studie der Schwerminerale dieser Rot-lehme führt uns zur Hypothese eines allohtonen Ursprung's, welcher Windtransport nicht ausschließt.*

*Die Feinfraktion zeigt uns Tonminerale welche auf Paleopedogenese hindenten.*

*Auf einen ähnlichen Paleoursprung deutet auch die Eisenhydroxid verkrustung der Tonminerale hin.*

## ABSTRACT

*On calcareous jurassic plateau of Burgundy, some red formations set a problem of pedogenesis. The study of the heavy minerals of these red loams leads us to the hypothesis of a mostly allochthonous origin, which does not exclude eolian deposits.*

*The fine fraction offers a range of clay minerals which remind more or less of bygone pedogenetic processes, that can also be recognized with the reddening of the ferruginous products which cover clay minerals.*

## РЕЗЮМЕ

*На известковых юрских плато Бургундии некоторые красные образования ставят ряд вопросов в отношении почвообразования. Изучение тяжёлых минералов этих «красных суглинков» приводит к гипотезе о в значительной мере аллохтонном происхождении, не исключающем эоловые привносы.*

*Тонкая фракция представляет ряд глинистых минералов, наводящих на предположение о более или менее древних почвообразовательных процессах, которые также могут быть опознаны по покраснению железистых продуктов покрывающих глинистые минералы.*

## PLAN

## Introduction

## I. Les gisements de plateaux et la granulométrie

- 1.1. Les gisements
- 1.2. La granulométrie

## 2. Les minéraux lourds

3. Minéralogie de la fraction fine < 2 $\mu$ 

## 4. Nature des sesquioxydes de fer et rubéfaction

## Conclusion

## INTRODUCTION

Les plateaux jurassiques de Bourgogne, dont l'ossature superficielle est constituée par des calcaires durs des étages bajocien, bathonien, callovien ou oxfordien (faciès rauracien) suivant des compartiments faillés qui se succèdent parallèlement d'Ouest en Est, sont recouverts par des sols calcimagnésiques des groupes rendzines, sols bruns calcaires et sols bruns calciques dont l'épaisseur varie en fonction des manifestations récentes et actuelles de l'érosion par ruissellement. Les sols à mull calcique de teinte brune ou brun jaunâtre représentent l'essentiel des formations superficielles de plateaux. Néanmoins apparaissent çà et là des sols plus vivement colorés en rouge et brun rouge, tranchant nettement sur les autres sols : 2,5 YR 4/6, 5YR 4/6 au lieu de 10 YR 5/4 ou 2,5 Y 5/2 par exemple.

Ces formations rouges que l'on trouve soit en recouvrement sur des calcaires durs, soit piégées dans des fissures diaclasiqes et poches karstiques de ces mêmes calcaires suscitent un réel intérêt du point de vue pédogénétique et paléoclimatique.

Si dans les karsts méditerranéens la pédogenèse rubéfiante est souvent en équilibre avec les conditions actuelles du milieu (M. LAMOUREUX 1968 et 1972) on peut s'interroger sur l'âge des formations rouges des plateaux de Bourgogne. En effet, hormis celles qui sont piégées dans le fond des fissures il ne semble pas pensable que de tels sols n'évoluent plus. Aussi nous devons poser cette question : la rubéfaction est-elle encore compatible avec nos conditions climatiques régionales ?

Ces formations rouges, du fait de leur granulométrie à dominante limoneuse le plus souvent, ont été décrites sous l'appellation de « limons rouges », en particulier dans leurs aspects morphologiques et géologiques sur le pied de la côte ; ils se sont déposés dans cette zone, venant des plateaux par colluvionnement et solifluxion postglaciaire, en mélange avec des chailles (R. CIRY, 1953).

Nous signalerons une étude concernant les limons de plateaux qui a été effectuée au Nord de Dijon afin d'établir les relations pouvant exister entre les limons et leur substrat calcaire. Une origine mixte, d'une part autochtone par décarbonatation d'autre part allochtone par apport a été avancée (J. RIGAULT, 1959 ; S. MÉRIAUX, 1961).

Pour notre compte, nous avons souhaité rechercher toutes les informations spécifiques portant sur les limons rouges dans leurs gisements de plateaux à une altitude de 350 à 500 m environ, là où leur déplacement par ruissellement semble avoir été nul ou très limité.

Ce problème d'information et d'analyses minéralogiques sera vu sous les aspects suivants :

- variété des gisements et granulométrie,
- minéraux lourds associés,
- minéralogie de la fraction fine (< 2  $\mu$ ),
- nature de la fraction sesquioxydes de fer et rubéfaction.

## I. LES GISEMENTS DE PLATEAUX ET LA GRANULOMÉTRIE

## 1.1. Les gisements

Ils sont de trois types.

(a) Lithosols calciques épais de 5 à 15 cm reposant sur des calcaires en dalles du Callovien comme à Darois (L. 34) ou à la Combe Pernand (L. 68), du Rauracien comme à Bouze (L. 69) ; parfois le sol est plus épais et peut atteindre par place 50 à 60 cm comme à Bessey-en-Chaume (L. 67).

Le matériel est argilo-limoneux, légèrement humifère, à structure polyédrique fine, parfois à tendance grenue. En profondeur pour les sols les plus épais la structure devient plus nettement polyédrique et plus grossière. La coloration du matériel donne des appréciations de 5YR 4/4, 4/6, 4/8 ou 6/8.

(b) Limons rouges piégés dans des fissures verticales larges de 10 à 20 cm comme à Darois (L. 34) ou aux Vallerots à Nuits-Saint-Georges (L. 8), dans des poches karstiques plus vastes comme à Bouze-les-Beaune (L. 47 et 49) dans la carrière de l'autoroute.

Le matériel est argilo-limoneux, s'organise en agrégats polyédriques ou cubiques grossiers de quelques centimètres. Il peut se présenter en blocs de taille décimétrique à faces luisantes et striées, déformés par gauchissement comme dans les horizons vertiques. Il faut remarquer que les limons rouges en poches ou en fissures présentent souvent les teintes les plus rouges (2,5 YR 4/8 et 5/8). De gros nodules calcaires constitués d'un accolement de nodules de dimensions centimétriques, à structure interne le plus souvent irrégulière mais parfois concentriques se trouvent çà et là dans la masse de ces limons. Ces nodules ont une teinte rosée impliquant par là que leur mise en place s'est faite par concentration secondaire de carbonates dans la masse même des limons rouges (L. 47 à Bouze).

(c) Nappe de limons rouges épaisse de 1 à 1,50 m, comprise entre un substrat de calcaires durs à débris de faciès rauracien et des éboulis gravelo-limoneux superficiels épais de 1 m environ. Cet exemple remarquable est fourni par la coupe de Savigny-les-Beaune près de l'autoroute ; les limons rouges y apparaissent en continu sur une distance de 100 m environ, bien contrastés avec les éboulis superficiels de teinte brune

lesquels ont évolué en rendzines ou sols bruns calcaires.

A la base des limons rouges se sont formées des concrétions carbonatées, à faciès très irrégulier, très granuleux en placages sur les calcaires disloqués de la base. Ce substrat calcaire peut être lui-même fortement altéré le long des diaclases verticales et des strates donnant naissance à un matériel limono-argileux jaunâtre (7,5 YR 7/6 par exemple).

### 1.2. La granulométrie

L'examen des courbes granulométriques (fig. 1) montre que trois types de texture sont observés :

1. Une texture que l'on qualifiera de normale (échantillons L. 34/L. 58/ L. 67/ L. 68/ L. 26/ L. 46) dans laquelle la fraction sableuse totale est très réduite (moins de 10 à 15 %) ; les autres fractions sont représentées avec deux options, l'une nettement argileuse (50 à 60 %), l'autre plus limoneuse (L. 26). Les sables sont constitués essentiellement de matériel non calcaire : quartz et débris d'organismes silicifiés.

2. Une texture plus sableuse (échantillons L. 8 et L. 69) dans laquelle la fraction 2 mm à 50 µ variant entre 30 et 45 % est constituée de sables calcaires de quartz et de débris d'organismes silicifiés. Les autres fractions étant à dominante limoneuse.

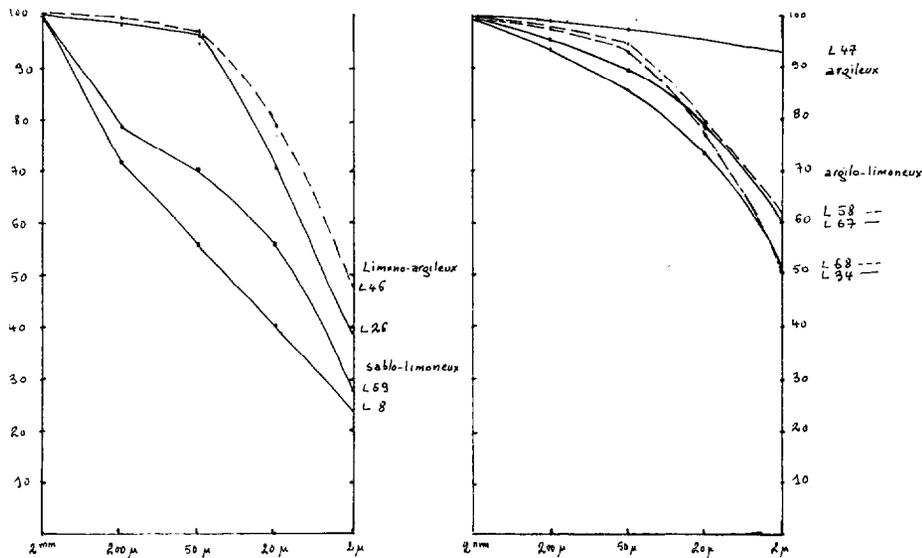


FIG. 1. — Courbes granulométriques des « limons rouges ».

3. Une texture très argileuse (90 % d'éléments  $< 2 \mu$ ) représente des concentrations privilégiées d'argile dans des poches karstiques, où le matériel à tendance à prendre une structure vertique (L. 47).

## 2. LES MINÉRAUX LOURDS ASSOCIÉS

Dans les sables de ces formations rouges, les minéraux lourds ont été extraits des fractions 250  $\mu$ -50  $\mu$ .

Sur certains échantillons peu sableux, le comptage des minéraux lourds est peu significatif du fait du faible nombre de minéraux observés : c'est le cas de L. 47 très argileux et pratiquement sans sables.

L'examen des résultats figurés dans le tableau n° 2 appelle les remarques suivantes :

Zircon et tourmaline, minéraux ubiquistes peu altérables, sont toujours présents en fort pourcentage.

Puis viennent des minéraux comme l'épidote toujours abondante, le sphène toujours fortement représenté et le grenat dont les teneurs sont plus faibles.

La présence de silicates de métamorphisme comme le sillimanite, l'andalousite, le disthène est sporadique et toujours faible, exception faite pour la staurotide

plus régulière et parfois très abondante (échantillon L. 48).

Le rutile est toujours représenté, mais les autres minéraux titanifères sont rares ou absents (brookite, anatase).

Les micas comme la biotite peuvent être abondants, c'est le cas de l'échantillon L. 34 de Darois où elle représente 71 % des minéraux comptés. Les calculs pour les rapports entre les autres minéraux ont d'ailleurs été effectués en pourcentages en excluant cet excès de biotite dû à une variation locale de faciès.

Enfin nous notons l'existence d'amphiboles vertes et brunes dans tous les échantillons et également d'un peu de glaucophane dont l'origine la plus proche est en rapport avec des roches du métamorphisme alpin.

Ce cortège de minéraux lourds semble assez original et il nous a paru opportun de le comparer à d'autres cortèges extraits de formations régionales comme les calcaires jurassiques du substrat local, les calcaires et les sables albiens du Crétacé du Jura et de la Puisaye, les formations oligocènes du Jura, les formations villafranchiennes de la Forêt de Chauv dans la dépression bressanne, afin de formuler quelques suggestions sur l'origine des matériaux originels des « Limons rouges ».

TABLEAU 1

Caractéristiques physiques des « Limons rouges »

Numéro des échantillons	Gisement et localité	Couleur*	Argile	Limon F	Limon S	Sable fin	Sable gravier
L. 46	Lithosol Bouze	5 YR 5/6	47,5	30,9	18,2	2,4	0,9
L. 69	Lithosol Bouze	5 YR 5/8	28,1	27,2	13,6	8,8	22,1
L. 68	Lithosol Concoeur	5 YR 4/8	52,5	21,2	11,8	7,0	7,3
L. 26	Sol épais Crepey	5 YR 4/4	37,5	36,8	21,6	3,3	0,6
L. 67	Sol épais Bessey	5 YR 4/6	60,5	18,5	9,7	5,0	6,2
L. 8	Fissure Vallerots	2,5 YR 4/8	23,9	15,6	14,6	16,5	29,2
L. 34	Fissure Darois	2,5 YR 5/8	50,7	26,8	15,9	2,4	4,2
L. 47	Poche karstique Bouze	2,5 YR 4/8	92,5	4,8	0,3	0,2	0,2
L. 58	Nappe Savigny-les-B.	5 YR 5/6	61,6	16,8	15,6	2,0	4,0

\* Réf. Code MUNSSELL.

TABLEAU 2

Echantillons	Andalousite	Sillimanite	Disthène	Staurotide	Grenat	Epidote/Zoizite	Zircon	Tourmaline	Sphène	Rutile	Brookite	Anatase	Corindon	Muscovite	Biotite	Chloritoïde	Amphiboles	Glaucophane	Pyroxène	Apatite	Monazite
L. 46	+	+	-	+	7	4	25	7	47	1	-	+	-	+	+	-	4	+	1	-	-
L. 69	Minéraux lourds non extraits																				
L. 68	-	-	-	1	3	13	25	27	10	3	-	1	-	1	5	1	8	-	-	-	-
L. 26	+	-	-	1	6	8	50	6	23	1	+	+	-	-	-	-	2	-	-	-	-
L. 67	+	+	-	1	24	12	27	16	6	6	+	+	+	1	1	-	3	-	-	-	-
L. 8	2	-	2	-	2	11	34	2	-	+	-	-	-	-	5	-	3	-	-	-	1
L. 34 <sub>A</sub>	1	-	+	+	7	10	45	3	21	1	-	+	1	3	+	-	2	-	-	-	-
L. 34 <sub>B</sub>	3	-	1	7	9	10	13	16	21	-	-	3	-	-	(71)**	-	11	1	3	-	-
L. 47	Extractions non significatives du fait du faible nombre de minéraux comptés																				
L. 48	+	+	+	33	+	1	22	35	2	2	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
L. 58	1	-	-	6	14	14	20	18	9	2	+	+	+	4	-	-	5	2	+	-	-
L. 98	-	10	1	-	8	8	50	20	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Résultats exprimés en % des minéraux lourds colorés comptés

+ teneurs inférieures à 1 %

- minéral absent

(\*\*) teneur en biotite exprimée en % par rapport à l'ensemble des minéraux comptés ; les autres minéraux sont exprimés en pourcentages excluant le biotite.

Le tableau n° 3 met ainsi en comparaison les cortèges suivants :

— Sables résiduels extraits de calcaires bathonien, callovien et rauracien des plateaux bourguignons, servant de substrat rocheux aux limons rouges (réf. N. LENEUF, recherches non publiées).

— Sables et calcaires albiens du Crétacé du Jura (réf. S. DUPLAIX et S. GUILLAUME 1962) et de la Puisaye (réf. J. TRECARTES 1972).

— Calcaires oligocènes du Jura (r.f. S. DUPLAIX et S. GUILLAUME 1962).

— Sables et graviers villafranchiens de la Forêt de Chaux en faciès superficiel et en faciès profond (réf. J. BONVALOT 1974).

Les « limons rouges » montrent un cortège nettement plus varié que celui des calcaires du jurassique moyen et supérieur.

En effet ces derniers se caractérisent par une absence totale de sphène, d'épidote, d'amphiboles (y compris la glaucophane), de disthène et d'andalousite, de brookite et d'anatase.

Les cortèges de sables et calcaires albiens se différencient par l'absence de sillimanite, de sphène et d'amphiboles.

Les cortèges de l'Oligocène du Jura et du Villafranchien de la forêt de Chaux ne montrent pas de différenciation quantitative majeure bien marquée avec ceux des limons rouges, par contre une différence quantitative peut être observée, en particulier avec les faciès du villafranchien où nous avons une proportion moins élevée de tourmaline, de staurotide, de sphène et une proportion plus élevée d'épidote, de grenat, d'amphibole surtout dans le faciès sain de profondeur.

Que faut-il conclure de cette comparaison ?

Il semble tout d'abord impossible que les « limons rouges » soient issus entièrement de la seule décarbonatation des calcaires du Jurassique moyen et supérieur, ne serait-ce que par la présence des amphiboles, du sphène, et de l'épidote totalement absents dans les substrats calcaires ; dans la mesure où l'échantillonnage de roches étudiées présente des cortèges de minéraux lourds suffisamment représentatifs.

Il y a donc eu enrichissement par d'autres recouvrements sédimentaires aujourd'hui disparus ; ce serait

le cas des argiles et sables albiens qui ont recouvert en partie le jurassique supérieur de Bourgogne. Ils ont pu ainsi contribuer aux apports de silicates de métamorphisme comme l'andalousite et le disthène et de minéraux titanifères comme la brookite et l'anatase.

Il reste ensuite à expliquer la présence des amphiboles. Dans la région, les amphiboles et la glaucophane sont présentes dans l'Oligocène du Jura et surtout dans le Villafranchien de la Bresse. Ces minéraux dont la souche doit être recherchée en partie dans les roches métamorphiques alpines ont pu être transportés en Bresse par l'ancien réseau hydrographique venant de la zone alpine, en particulier le Rhin fossile arrivant par la région de Belfort et la vallée du Doubs. Mais la présence de ces amphiboles ne saurait être justifiée sur les plateaux bourguignons qui étaient déjà surélevés à l'Oligocène et à plus forte raison au Villafranchien par rapport à la dépression bressanne

Il semble que seul un acheminement éolien au Quaternaire puisse justifier la présence d'amphiboles sur les plateaux ; cette affirmation étant émise avec toute la réserve souhaitable.

Le sphène très abondant dans les limons rouges est pratiquement absent de toutes les formations, à l'exception des calcaires oligocènes du Jura. Une explication plausible serait trouvée dans une authigénèse de ce minéral au sein des limons rouges, ce milieu ayant pu être suffisamment pourvu en silice et en titane pour cette néogénèse. Les conditions en sont d'ailleurs peu connues. Il ne semble pas toutefois que cette genèse soit généralisée dans de telles formations rouges régionales puisque nous citons dans le tableau 2, l'exemple d'un échantillon prélevé en Haute-Saône (L. 98 à Romange) où aucune trace de sphène n'a été relevée ; ce même milieu étant d'ailleurs totalement dépourvu d'amphiboles.

TABLEAU 3

Tableau comparatif de différents cortèges de minéraux lourds

Référence des cortèges de minéraux lourds	Tourmaline	Zircon	Andalousite	Sillimanite	Disthène	Staurotite	Grenat	Epidote	Sphène	Rutile	Brookite	Anatase	Amphiboles	Glaucophane	
Calcaires du Jurassique moyen et supérieur (Réf. N. LENEUF)	7/50	5/73	—	0/5	—	0/2	0/10	0/+	0/+	0/16	—	—	—	—	Bourgogne
Sables et calcaires albiens (Crétacé)															
(1 Réf. J. TRECARTES)	11/69	2/48	0/29	0/+	0/31	3/33	0/1	0/5	0/+	+ / 6	0/+	0/5	0/+	—	Puisaye
(2 Réf. S. DUPLAIX)	11/50	8/68	0/3	—	1/10	1/30	0/4	0/3	—	4/27	0/1	1/9	—	—	Jura
	7/60	2/32	0/3	—	+ / 11	3/27	1/8	+ / 1	—	4/22	+ / 2	2/31	—	—	Jura
Oligocène (Réf. S. DUPLAIX)	1/12	2/7	0/1	—	—	1/2	5/24	59/83	+ / 2	0/1	0/+	0/1	0/2	+ / 1	Jura
	3/50	7/68	0/4	0/13	0/6	4/35	0/40	0/33	0/17	4/21	0/1	1/18	0/1	0/1	Jura
Villafranchien (Réf. J. BONVALOT)	3/7	4/15	+ / 1	+ / 3	1/3	2/6	0/6	67/70	0/1	3/5	0/0	0/+	0/2	+ / +	Forêt de Chaux, faciès altéré de surface, sans sondage
	1/3	2/5	+ / +	+ / 1	+ / 1	1/2	12/58	17/56	0/1	1/2	0/+	0/+	11/28	+ / +	
Limons rouges (Réf. N. LENEUF)	2/35	13/50	0/3	0/+	0/2	0/33	0/24	+ / 14	0/47	0/6	0/+	0/3	0/11	0/2	Bourgogne

Dans chaque colonne sont mentionnées les teneurs minima et maxima en %, citées dans les publications en référence.

— ou 0 : minéral absent

+ : teneur inférieure à 1 %.

### 3. MINÉRALOGIE DE LA FRACTION FINE (< 2 μ)

La fraction fine < 2 μ a été examinée aux rayons X après traitement des échantillons au magnésium (MgCl<sub>2</sub>). Des traitements au citrate de Na ont dû être effectués pour atténuer la gêne due à la présence de fer amorphe fixé sur les argiles. Des traitements au citrate de potassium ont été nécessaires pour identifier la vermiculite avec certitude.

Les diagrammes de rayons X ont été obtenus sur plaque orientée normale, sur plaque chauffée à 490° pendant 60 mn, sur plaque ayant subi des essais de gonflement au glycerol.

Pour l'ensemble des échantillons les minéraux suivants ont été identifiés : Kaolinite, Illite, Vermiculite, Interstratifiés Illite-Vermiculite, Goethite, Quartz.

Des observations particulières seront faites sur chacun d'eux.

**KAOLINITE** : les raies à 7 (7,07 - 7,13 - 7,19) à 3,55 (3,53 - 3,54 - 3,57) sont bien caractérisées. La hauteur des pics varie de faible à fort : le problème quantitatif sera vu en liaison avec les autres argiles.

**ILLITE** : à l'exception de l'échantillon L. 58 présentant un fort pic d'illite ouverte à 9,82 Å, la caractérisation nette de ce minéral semble assez difficile car les pics à 10 et à 3,33 sont mal individualisés, en particulier ce dernier qui se trouve pratiquement inclus dans la base élargie d'un pic à 3,55.

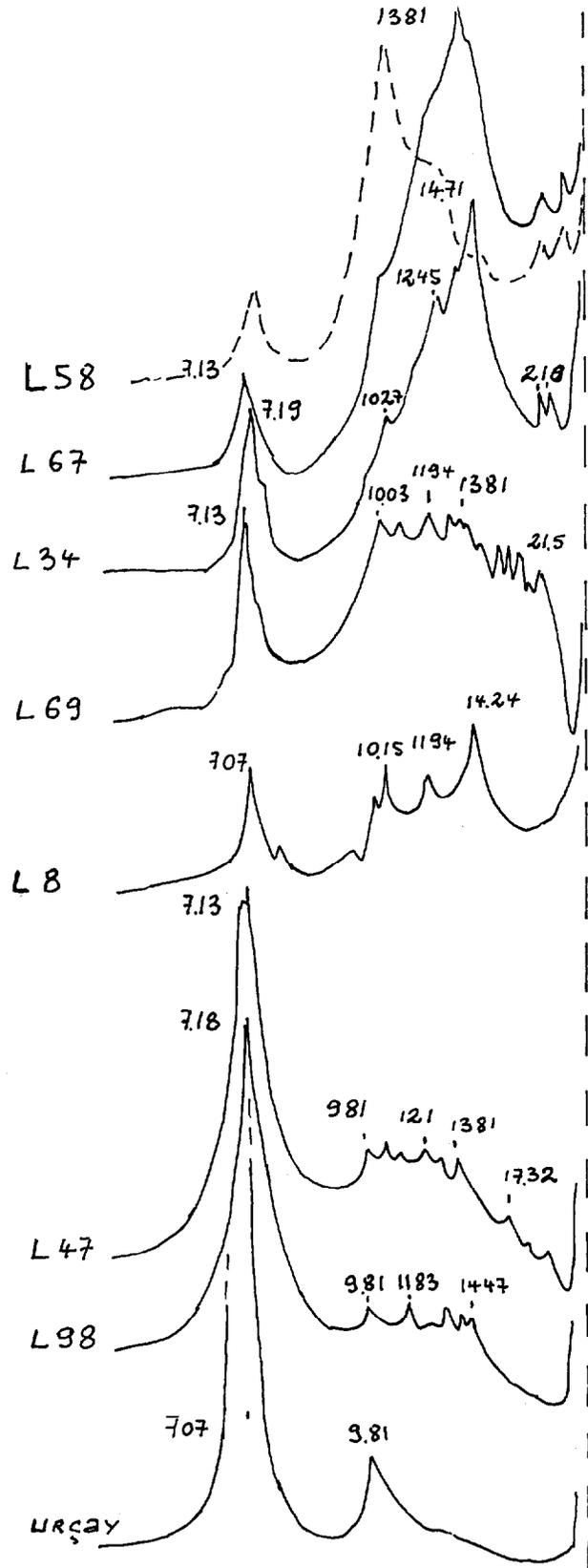
**VERMICULITE** : ce minéral est parfaitement identifié avec une raie principale à 14 Å (13,79 - 13,81 - 14,25). Il n'y a pas de gonflement au glycerol et la raie à 14 se contracte à 10 après chauffage, ou après traitement au citrate de potassium.

Dans un seul échantillon un léger gonflement a été attribué à une vermiculite de basse charge, mais c'est le seul cas (L. 69).

**INTERSTRATIFIÉS ILLITE-VERMICULITE** : certains diagrammes présentent un palier bien différencié entre 10 et 14 Å, dans lequel les pics à 10, 12 et 14 sont peu individualisés. De faibles pics peuvent apparaître vers 20/21 Å. Nous avons diagnostiqué des interstratifiés illite-vermiculite irréguliers.

En ce qui concerne la répartition quantitative relative de ces minéraux argileux, nous pouvons faire les remarques suivantes après groupement des principaux diagrammes sur le graphique II.

FIG. 2. — Regroupement synthétique des diagrammes RX des « limons rouges » (fraction < 2 p).



(a) Un premier groupe d'échantillons (L. 34 et L. 67) montre, soit une domination nette de la vermiculite avec un pic massif à 14 Å associé à une faible proportion d'interstratifiés, un peu d'illite et de kaolinite, soit une proportion importante d'illite associée à des interstratifiés présentant un léger gonflement au glycérol (L. 58).

(b) Un deuxième groupe (L. 69 et L. 8) montre un peu d'illite, des interstratifiés illite-vermiculite en proportion importante associés à de la kaolinite dont le pic à 7 Å à une hauteur équivalente à celui des interstratifiés.

(c) Un troisième groupe (L. 47 auquel nous avons joint l'échantillon L. 98 déjà cité) montre des interstratifiés de faible importance associés à une assez forte proportion de kaolinite.

(d) Nous avons pensé à compléter nos diagrammes par celui d'une formation sidérolitique de limon rouge (Urcay-Allier) où la kaolinite est presque exclusive, se trouvant associée à une très faible proportion d'illite ouverte et peut être quelques interstratifiés. Les limons rouges L. 98 et Urcay bien que n'appartenant pas à notre zone restreinte des plateaux bourguignons complètent harmonieusement ce groupement synthétique.

Ce groupement des courbes nous permet ainsi de caractériser diverses associations quantitatives de minéraux argileux qui pourraient représenter les termes d'une évolution de plus en plus accentuée vers des conditions d'altération kaolinisante.

Notons que la capacité d'échange de ces matériaux suit le sens de ce groupement puisqu'elle est de 36 à 25 mé % dans les échantillons riches en vermiculite, de 25 à 19 mé % pour les échantillons pourvus en interstratifiés et vermiculite, et de 10 mé % pour l'échantillon très argileux L. 47 constitué surtout de kaolinite. L'échantillon L. 58 à illite dominante a une capacité d'échange faible de 10 mé %.

Il est indéniable que ce classement basé sur une kaolinisation relative de plus en plus accentuée montre une disparition progressive de la vermiculite relayée par des interstratifiés illite-vermiculite, et une tendance à la disparition complète de ces derniers dans les matériaux les plus kaolinisés.

Ce que l'on connaît des minéraux argileux des roches-mères carbonatées (LAMOUREUX 1972) pourrait nous incliner à admettre ce groupement comme un schéma évolutif. Le fait que les résultats exprimés dans ce travail ne concernent que des matériaux isolés dans différents sites nous empêche de considérer ce

groupement comme un schéma continu. Trop d'incertitude demeure et il n'est pas dans notre intention d'écartier le schéma évolutif classique : illite → interstratifiés illite-vermiculite → vermiculite → kaolinite.

GOETHITE : ce minéral apparaît partout en faible proportion ; il est identifié par des pics à 4,48, surtout 4,18 et 2,69 ce dernier partage avec l'hématite.

QUARTZ : des traces de quartz sont identifiées par des pics situés entre 4,20 et 4,24, et 3,35 sauf pour les échantillons L. 47 et L. 69.

#### 4. NATURE DES SESQUIOXYDES DE FER ET RUBÉFACTION DES SOLS

Les matériaux prélevés dans les limons et les sols étudiés ont des couleurs allant du brun rouge (7,5 YR 5/4) au rouge franc (2,5 YR 4/8). Les sesquioxydes de fer étant responsables de cette couleur rouge (M. LAMOUREUX et P. SÉGALEN, 1969), aussi nous a-t-il paru intéressant d'en étudier les différentes formes en soumettant les échantillons à certains tests analytiques.

##### (a) MÉTHODES UTILISÉES

Le fer total a été extrait par la méthode aux trois acides (en annexe, le tableau 5 donne les résultats des analyses totales) ; le fer libre par la méthode de Endredy (acide oxalique sous un rayonnement U.V. de deux heures) ; le fer facilement extractible (F.F.E.) par la méthode Ségalen (SÉGALEN 1968).

##### (b) LES RÉSULTATS OBTENUS sont présentés dans le tableau 4.

Les quantités de fer extraites par la méthode de Endredy, correspondent en principe au fer libre non engagé dans les réseaux des minéraux primaires ou argileux (15 à 40 % du fer total). Ces quantités sont relativement faibles par rapport au fer restant qui se trouve engagé dans des minéraux primaires ferrifères (tableau 2) et probablement aussi dans des minéraux argileux ou dans des nodules ferrugineux difficilement dissous par l'acide oxalique.

Le traitement cinétique par HCl/8N permet de tracer d'une part des courbes cumulatives, d'autre part des courbes de vitesse de dissolution dont quatre

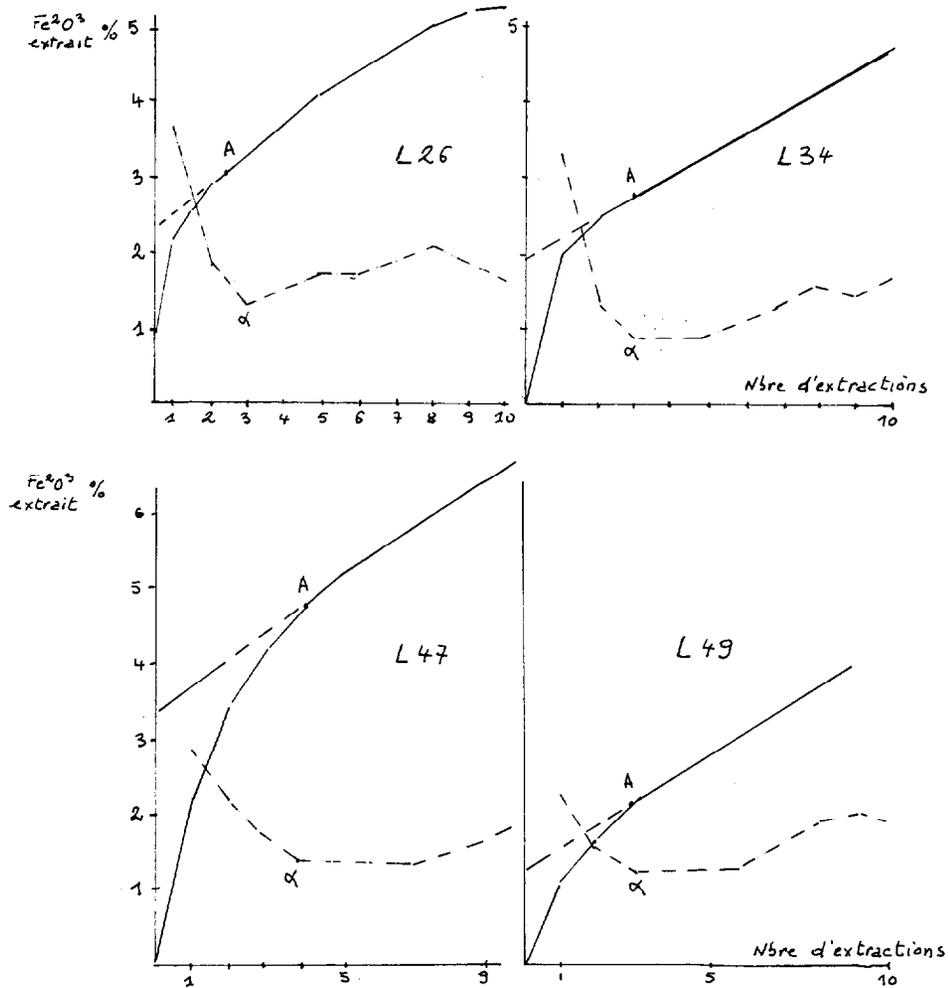


FIG. 3. — Extraction du fer par la méthode Ségalen.  
 en plein : courbes cumulatives  
 en pointillé : vitesses de dissolution.

exemples sont présentés sur la figure 3. Les courbes cumulatives mettent en évidence une branche montante jusqu'en A et un palier permettant de tracer la tangente qui coupe l'axe des ordonnées en un point correspondant à une quantité de fer facilement extractible.

Les courbes de vitesse de dissolution (quantité de fer dissoute en % du fer restant) mettent mieux en évidence les irrégularités qui apparaissent au cours de la dissolution (M. LAMOUREUX et P. QUANTIN, 1973).

### (c) INTERPRÉTATIONS

Les quantités de fer facilement extractible varient suivant les échantillons de 0,77 à 3,10 % et ce fer est bien responsable de la couleur rouge comme le montrent les couleurs avant et après traitement. Entre 2 et 3 % les rapports  $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ F.E.}}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}}$  % sont supérieurs à 20, or nous avons proposé (LAMOUREUX, 1972) qu'au-delà de ce taux les sols rouges formés sur roches

TABLEAU 4

Teneurs en différentes formes de fer et couleurs des échantillons avant et après traitement Ségalen

Numéro des échant.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total (triacide)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre % U.V.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> restant après U.V.	Extraction Ségalen (HCl 8N)			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> F.E. en % de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	Couleur des échantillons	
				Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> F.E. %	Pentes des courbes cumulatives	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % après extraction 10 traitements		Avant traitement Ségalen	Après traitement
L. 26	7,90	2,4	5,5	2,08	0,40	5,23	26,4	5 YR 3/4	10 YR 6/2
L. 34	9,80	3,2	6,6	1,98	0,27	4,74	20,2	5 YR 4/8	10 YR 6/6
L. 47	13,00	3,5	9,5	3,10	0,41	6,78	23,8	2,5 YR 4/8	10 YR 5/6
L. 49	9,10	3,7	5,4	1,17	0,33	4,23	12,8	7,5 YR 5/4	2,5 Y 7/6
L. 58	7,50	1,1	6,4	0,96	0,39	4,32	12,8	5 YR 5/6	2,5 Y 6/4
L. 67	11,10	1,9	9,2	1,90	0,62	7,78	20,5	5 YR 4/6	2,5 Y 6/4
L. 9	4,75	1,9	2,85	0,77	0,20	2,62	16,3	5 YR 5/8	2,5 Y 7/6

carbonatées soient considérés comme des sols fersiallitiques. En dessous de ce taux il s'agirait de sols calcimagnésiques. C'est accorder à cette forme de fer facilement extractible une grande importance au niveau supérieur de la classification, mais n'est-ce pas ce que nous faisons implicitement auparavant en parlant de « sols rouges méditerranéens » ou de « Terra Rossa ».

Nous avons vu par ailleurs que cette forme de fer, aussi bien dans les sols rouges fersiallitiques que ferrallitiques était considérée comme amorphe aux rayons X. Mais il s'agit en fait, et c'est probablement le cas dans ces sols, d'une forme cryptocristalline dont la cristallisation est ralentie par divers constituants inhibiteurs (LAMOUREUX et QUANTIN, 1973 a et b).

TABLEAU 5

Analyses totales après attaque triacide. Résultats exprimés en %

	L. 26	L. 34G	L. 47	L. 49	L. 58	L. 67	L. 69
H <sub>2</sub> O % 105 .....	3,63	4,15	4,19	3,70	4,21	4,56	2,29
H <sub>2</sub> O 105 à 1 000 .....	11,30	16,37	10,75	8,41	8,90	8,15	21,83
Résidu total % .....	41,46	22,71	11,44	26,45	33,51	32,84	22,90
SiO <sub>2</sub> silicates % .....	19,87	19,87	34,19	30,17	25,80	26,06	16,64
TiO <sub>2</sub> % .....	1,02	0,76	1,04	1,54	0,85	0,79	0,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	7,90	9,80	13,00	9,10	7,50	11,10	4,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	14,25	12,60	24,40	19,50	15,40	14,50	9,25
MnO <sub>2</sub> .....	0,178	0,238	0,148	0,238	0,099	0,158	0,089
CaO .....	0,68	14,0	0,70	0,69	2,87	0,84	22,40
MgO .....	0,85	0,88	0,81	0,82	1,21	1,46	0,39
K <sub>2</sub> O .....	1,01	1,10	1,10	1,10	1,57	1,66	0,86
Na <sub>2</sub> O .....	0,27	0,29	0,27	0,25	0,29	0,28	0,28
SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	1,74	1,78	1,77	2,02	2,16	2,04	2,01
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	2,36	2,68	2,38	2,62	2,83	3,04	2,67

## CONCLUSION

En conclusion de notre étude sur certains aspects minéralogiques des limons rouges, deux points essentiels nous paraissent intéressants à évoquer :

1. L'origine des matériaux qui les ont constitués,
2. Leurs stades d'évolution.

Les résultats obtenus par l'examen qualitatif et quantitatif des minéraux lourds dans les limons rouges montrent que les cortèges présents sont plus complets que ceux identifiés dans les roches du substrat jurassique et même que ceux reconnus dans certaines roches post jurassiques comme les sables albiens qui ont été transgressifs dans notre région. La disparition de ces formations crétacées pendant leur émergence tertiaire après décarbonatation et érosion n'a laissé que des produits résiduels meubles épars sur les plateaux, pouvant être occasionnellement reconnus lorsqu'ils ont été piégés dans des fissures karstiques du substrat jurassique. Des résidus de sables albiens peuvent donc être associés dans les matériaux superficiels des plateaux. Mais il semble aussi indispensable de faire appel à d'autres apports pour justifier la présence de minéraux comme l'épidote, les amphiboles dont la glaucophane ; ces minéraux existent régionalement dans le complexe alluvial plio-quadernaire de la Bresse. Mais pour justifier de tels apports sur les plateaux, des interventions dynamiques éoliennes sont nécessaires afin que ces apports soient compatibles avec la morphologie régionale : le fossé bressan étant déjà affaissé et cela depuis l'Oligocène.

Les examens d'argiles contenues dans les calcaires durs du substrat jurassique montrent la présence presque exclusive d'une illite ouverte, associée sporadiquement à de très faibles quantités de kaolinite [réf. LENEUF, travaux non publiés]. Or dans les limons rouges les argiles dominantes sont constituées de vermiculite et d'interstratifiés illite-vermiculite. Seul l'échantillon L. 58 semble présenter une filiation argileuse très proche de son substrat : illite ouverte associée à kaolinite bien caractérisée.

Ces observations sur les argiles ne permettent pas d'apporter d'arguments décisifs sur la présence d'une phase allochtone importante, car interstratifiés illite-vermiculite, vermiculite et kaolinite peuvent être issus de l'altération des illites primaires contenues dans les roches. Dans l'Yonne, D. BAIZE (1972) a considéré la montmorillonite et la vermiculite présentes dans

les sols des « Terres d'Aubues » comme des apports, du fait que ces argiles n'existent pas dans le substrat calcaire portlandien. A notre avis, nous ne pouvons être aussi affirmatifs. Un autre argument en faveur de l'intervention d'une phase allochtone est formulé par J. RIGAUD (1959) qui a effectué une étude sur les plateaux au nord de Dijon et qui a calculé qu'une trop grande épaisseur de calcaire jurassique aurait été nécessaire pour assurer l'individualisation de ces limons après décarbonatation.

Le meilleur argument sur une allochtonie partielle est certainement celui des cortèges de minéraux lourds. Actuellement, le problème n'est plus tellement de prouver l'existence d'une phase allochtone dans les limons, mais d'identifier son origine sans doute complexe.

La nature des minéraux argileux et l'importance des sesquioxides de fer cristallisés et « amorphes » montrent que l'évolution du matériel constitutif des « limons rouges » se situe entre les sols calcimagnésiques décarbonatés (sols bruns calciques) et les sols fersiallitiques à réserve calcique (sols rouges méditerranéens).

Une pédogenèse rubéfiante et légèrement kaolinisante a été nécessaire pour parvenir à ce stade d'évolution de la fraction fine si l'on admet une absence d'héritage kaolinique notable.

Le groupement des différents diagrammes de rayons X, en fonction de la progression en importance du pic de la kaolinite et de sa proportion relative de plus en plus grande par rapport aux pics de l'illite ou de la vermiculite, et du palier des interstratifiés, montre que ces limons rouges ont atteint différents stades dans l'évolution fersiallitique, laquelle a pu s'orienter dans certains cas vers une kaolinisation plus intense que nous avons rapprochée de celle d'un matériel sidérolitique.

En faisant toute réserve sur l'importance des héritages argileux provenant des phases résiduelles jurassiques et post jurassiques des limons, il peut être plausible de préciser que ces matériaux fersiallitiques diversement évolués correspondent à des paléosols d'âge différents ; les plus anciens seraient les plus évolués du point de vue kaolinisation et rubéfaction. C'est une hypothèse de travail qui pourrait nous permettre d'intégrer le temps dans la pédogenèse de ces formations et que nous pouvons rapprocher des observations formulées par M. BORNAND (1969) sur les terrasses de la vallée du Rhône, où les sols les plus rubéfiés sont installés sur les terrasses les plus anciennes ; des caractères évolutifs de plus en plus accentués portant sur la réserve calcique, les

teneurs en sesquioxydes de fer, la rubéfaction, le degré d'altération des cailloutis lui permettent de différencier les sols des terrasses würmiennes, rissiennes, mindeliennes et plus anciennes. Sans référence précise sur l'évolution minéralogique des argiles de ces terrasses rhodaniennes, il n'est pas possible d'aller plus avant dans une comparaison avec l'évolution de nos limons rouges régionaux. Des recherches pourront être développées dans ce sens afin d'essayer de préciser l'âge de certaines formations rubéfiées pour lesquelles nous ne possédons pas de référence géomorphologique pratique comme la position des terrasses quaternaires.

La Bourgogne qui se trouve située à la limite septentrionale des sols rouges fersiallitiques méditerranéens et en prolongement de la vallée du Rhône est-elle encore susceptible de fournir une pédogenèse rubéfiante ? Nous ne le pensons pas, mais il n'est pas exclu que certains sites en particulier le haut des versants exposés au sud parfois riches en espèces végétales méditerranéennes, puissent réunir des conditions favorables pour prolonger une rubéfaction lorsque des reliquats de limons rouges y subsistent.

Manuscrit reçu le 20 février 1974

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAIZE (D.), 1971. — Contribution à l'étude des sols des plateaux jurassiques de Bourgogne. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Université de Paris.
- BEL (B.), 1955. — Les sols de Nuits-Saint-Georges. *Ann. agron.*, Paris, III, pp. 385-421.
- BONVALOT (J.), 1974. — Les cailloutis de la Forêt de Chaux : leurs rapports avec les matériaux détritiques du Sundgau et du Nord de la Bresse. Thèse 3<sup>e</sup> cycle. Université de Dijon.
- BORNAND (M.), 1969. — Les sols rouges du confluent Rhône-Isère. *Science du Sol*, n° 2, pp. 3-27.
- CALLOT (C.), 1971. — Etude pédologique du bassin de la Charente. Notice de la carte au 1/100 000. INRA, Montpellier, 195 p.
- CALLOT (C.), 1972. — Les « terres de groies » sur calcaires jurassiques en Charente. *Science du Sol* n° 1, pp. 45-61.
- CIRY (R.), 1953. — A propos des limons à chailles de la région de Nuits-Saint-Georges. C.R. 24<sup>e</sup> Congrès de l'Association bourguignonne des Sociétés Savantes, 6 p.
- DUPLAIX (S.), GUILLAUME (S.), 1962. — Etude stratigraphique et minéralogique des formations tertiaires du Jura. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.* (2), vol. V, fasc. 1, pp. 37-54.
- DUPLAIX (S.), GUILLAUME (S.), 1962. — Etude de quelques formations détritiques du Crétacé moyen du Jura. *Bull. Soc. Géol. France*, 7<sup>e</sup> sér., t. IV, pp. 311-321.
- JOURNAUX (A.), 1956. — Les plaines de la Saône et leurs bordures montagneuses. Thèse Doctorat es Sciences. Université de Caen.
- LAMOUREUX (M.), SEGALIN (P.), 1969. — Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. *Science du Sol*, n° 1, pp. 63-75.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. *Mém. ORSTOM*, n° 56. Paris, 266 p.
- LAMOUREUX (M.), QUANTIN (P.), 1973 a. — Utilisation des courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de Ségalin. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XI, n° 1, pp. 3-14.
- LUCAS (J.), 1962. — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. Carte Géol. Als.-Lorr.*, n° 23, Strasbourg, 202 p.
- LUCAS (J.), CAMEZ (Ph.), MILLOT (S.), 1959. — Détermination pratique aux Rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, t. 12, fasc. 2, pp. 21-31.
- MERIAUX (S.), 1961. — Observations complémentaires sur les sols du plateau jurassique bourguignon. *Bull. AFES*, pp. 334-341.
- QUANTIN (P.), LAMOUREUX (M.), 1973 b. — Application et adaptation de la méthode cinétique de Ségalin à différents sols et constituants de ces sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 2, pp. 3-14.
- RAT (P.), TINTANT (H.), 1963. — Notice détaillée de la carte géologique au 1/80 000, 3<sup>e</sup> édition.
- RIGAUD (J.), 1959. — Les limons sur les plateaux jurassiques au Nord de Dijon. *Bull. AFES*, 1961.
- ROBERT (M.), BARSHAD (I.), 1972. — Sur les propriétés et la détermination des minéraux argileux 2/1 expansibles (Vermiculites - smectites). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 275, pp. 1463-65.
- SEGALIN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, pp. 105-125.
- TRESCARTES (J.), 1971. — Les sables albiens de part et d'autre du seuil de Bourgogne, 125 p. Thèse 3<sup>e</sup> cycle. Université de Dijon.