

J. P. LAUTRIDOU\*, P. GIRESSE\*\*

Caen-Brazzaville

## GENÈSE ET SIGNIFICATION PALÉOCLIMATIQUE DES LIMONS À DOUBLETS DE NORMANDIE

### Abstract

The bedded structure of *limons à doublets* is not due to morphological processes such as sheet wash and laminar solifluxion. It is to be explained by the migration of fine clay and iron in the loess. The first stage is the loss of carbonate during the accumulation of the loess. Next the liberated fine clay and iron accumulates in the less permeable layers during milder climatic periods (bioturbation). The formation of *limons à doublets* implies a moister periglacial environment than typical loess with short periods of climatic amelioration.

### Résumé

Les structures litées des limons à doublets ne sont pas liées à des processus morphologiques (ruissellement, solifluxion laminaire). Elles s'expliquent par des migrations d'argile fine et de fer dans le loess. La première étape est la décarbonatation du loess pendant le dépôt éolien. Ensuite l'argile fine et le fer libérés s'accumulent dans les niveaux à perméabilité plus faible pendant des phases d'adoucissement climatique (bioturbations). La genèse des limons à doublets implique un environnement périglaciaire plus humide que pour les loess typiques et de courtes phases de rémission climatique.

Les "limons à doublets" constituent un faciès loessique très particulier, fréquemment représenté en Normandie. Ils ont été définis par GRAINDOR en 1948 dans un diplôme sur les limons quaternaires des environs de Rouen: "alternance de lits clairs et sombres formant des doublets, l'épaisseur des lits change d'un lit à l'autre: elle varie de 1 mm à 1 cm; généralement ces lits sont assez réguliers". Rappelons que le terme "doublet", maintenant peu usité, vient du mot double: "formé de deux choses analogues ou identiques qui ne composent pas un tout, mais qui ne peuvent exister ou fonctionner l'une sans l'autre" (Grand Larousse de la langue française, 1972).

Comme BORGES (1954) nous avons repris ce terme en 1965 pour ce faciès non carbonaté, très caractéristique, et accepté l'interprétation "nivéo-éolienne" proposée par VAN STRAELEN en 1946 au Congrès de Géologie des Terrains récents de l'Ouest de l'Europe. Cette hypothèse insistant sur le rôle de la neige (et exprimée aussi par EDELMAN à la même réunion) a été présentée à propos de sables et sables limoneux de couverture lors d'une excursion de ce Congrès, puis généralisée avec des variantes aux limons par TAVERNIER (1948), GRAINDOR (1948: reprise par le vent du dépôt étalé par les eaux de fonte), BORGES (1954) et LAUTRIDOU (1965, 1968: importance des ruissellements). Récemment BERTOUILLE (1978) s'inspirant de travaux récents sur les thermomigrations de particules fines par le mouvement de la glace vient de

\* Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., Rue du Tilleul, F — 14000 Caen, France.

\*\* Département de Géologie, Université de Brazzaville.

présenter une nouvelle interprétation sur la formation de limon à doublets, par "migration des colloïdes dans un gradient thermique en période de gel". Ayant remarqué que le faciès du limon à doublets s'étend largement vers l'Est (Vexin) et vers le Sud de la Normandie (Baie du Mont-Saint-Michel) nous avons repris l'étude de cette structure (LAUTRIDOU, à paraître), dont nous présentons ici un résumé.

#### DESCRIPTION DES LIMONS À DOUBLETS

Les limons à doublets sont toujours non carbonatés, mais peuvent contenir du calcium, leur pH se situant entre 6 et 7 en Haute-Normandie où la smectite domine dans la fraction argileuse, alors que dans les pourtours de la Baie du Mont-Saint-Michel l'acidité est plus grande (pH autour de 5) avec de la Kaolinite comme minéral argileux directeur.

Les doublets constituent une alternance de lits à 1 cm en moyenne (photo 1); il existe des cas où la séquence dépasse 2 à 3 cm, mais nous verrons que cette macro-séquence, caractéristique des limons où la fraction soluble augmente (plus de 15%), comporte des microséquences à doublets fins et courts. L'épaisseur commune pour les doublets les plus réguliers, ceux du Pléniglaciaire supérieur, avoisine 2 à 5 mm pour chaque lit. L'importance respective de chaque lit (marron et jaune) varie: dans le Pléniglaciaire supérieur la bande marron peut s'avérer sensiblement plus fine que la jaune, mais à l'inverse dans le Saalien le lit marron l'emporte nettement et on passe à une strate grise de plus en plus fine devenant discontinue: c'est le limon à traînées grises, puis à taches grises.

Une autre caractéristique importante est l'allure du contact entre chaque lit: le passage supérieur du lit jaune au lit brun (marron) est souvent progressif avec parfois une petite zone intermédiaire légèrement colorée, alors que le sommet de la bande brune (sous le lit jaune) est particulièrement net et foncé.

Le lit marron s'avère plus compact que le lit jaune. Cependant le contact supérieur lit brun-lit jaune, bien que marqué, ne possède pas l'allure rectiligne et tranchée de nombreuses formations de pente litées du type des formations à litage périodique de Pologne ou des limons lités (*peaty loam*) décrits en Belgique et dans le Nord de la France par PAEPE et SOMMÉ (1970) pour le Pléniglaciaire moyen. Même dans la zone la plus régulière (partie médiane des limons à doublets du Pléniglaciaire supérieur) on peut déceler des petites ondulations; dans les autres couches les formes sont encore plus irrégulières comme nous le verrons.

Un autre élément important consiste dans la longueur des doublets: apparemment ils semblent continus sur une bonne distance lorsqu'ils sont réguliers. En fait leur longueur dépasse rarement 30 à 50 cm excepté les macroséquences qui peuvent atteindre 2 à 3 m.

Enfin dans les doublets des concrétions ferromanganiques sont disséminées: minuscules dans les beaux doublets du Pléniglaciaire supérieur elles deviennent plus grosses (1-3 mm) et plus nombreuses dans les loess du Pléniglaciaire inférieur et du Saalien.

## CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES, MINÉRALOGIQUES, CHIMIQUES

Toutes les analyses (sédimentologie, chimie, Rayons X, pétrographie, lames minces, microscope électronique) que nous avons effectuées au Centre de Géomorphologie sur une dizaine d'échantillons confirme le point essentiel mis en évidence dès 1965 (LAUTRIDOU, 1965) pour les limons de Saint-Romain (Nord de Tancarville, Est de la ville du Havre): la seule différence entre les lits consiste en une augmentation de la quantité d'argile fine (30—40 %) et de fer total (20 %) dans la bande brune par rapport à la bande jaune (fig. 1); cette augmentation est signalée aussi par BERTOUILLE (1978) à partir de nos travaux (1965—68). Le rapport fer libre/fer total reste stable (0,5 %), la teneur en fer total se situant autour de 3 %. L'étude des lames minces à Saint-Romain et à Sartilly (Baie du Mont-Saint-Michel) montre bien cet enrichissement en argile fine non orientée et en fer (photo 1—B) dispersés irrégulièrement dans le lit marron ou entourant partiellement les grains de quartz. On n'observe pas de différence nette entre la taille des silts et sables fins des lits marron et jaunes, toutefois il y a une tendance à un affinement des quartz (nettement majoritaires par rapport à la muscovite et aux feldspaths) dans la bande jaune.

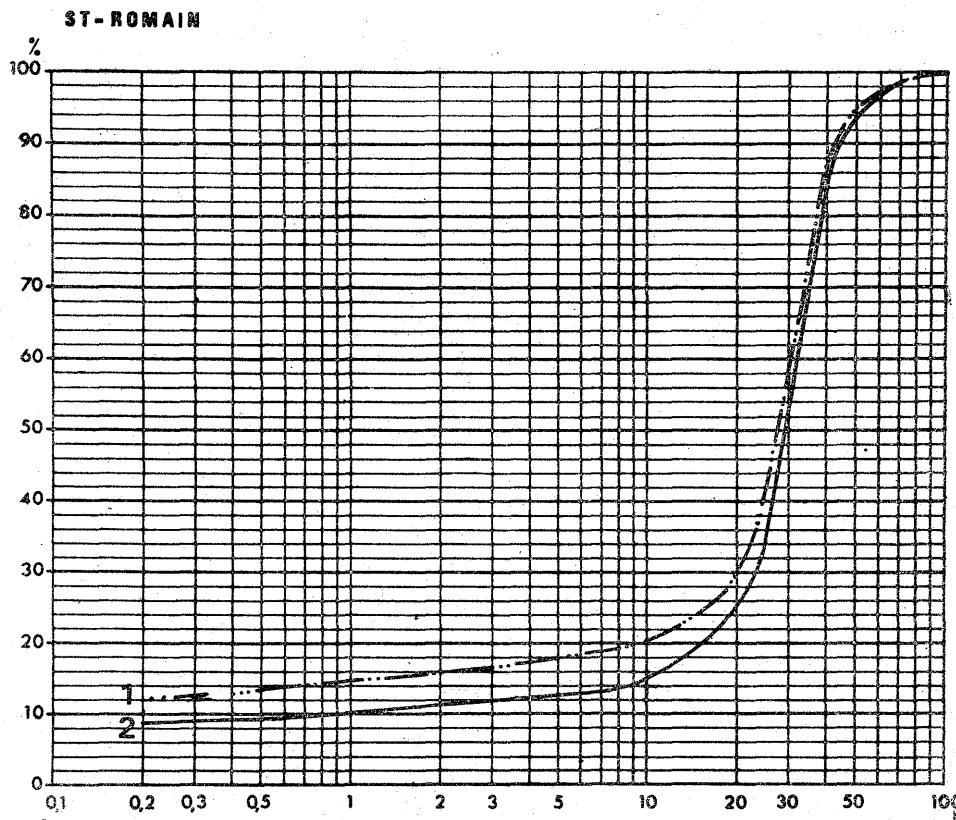


Fig. 1. Exemple de courbes granulométriques cumulatives du lit brun (1) et du lit jaune (2) de limon à doubles

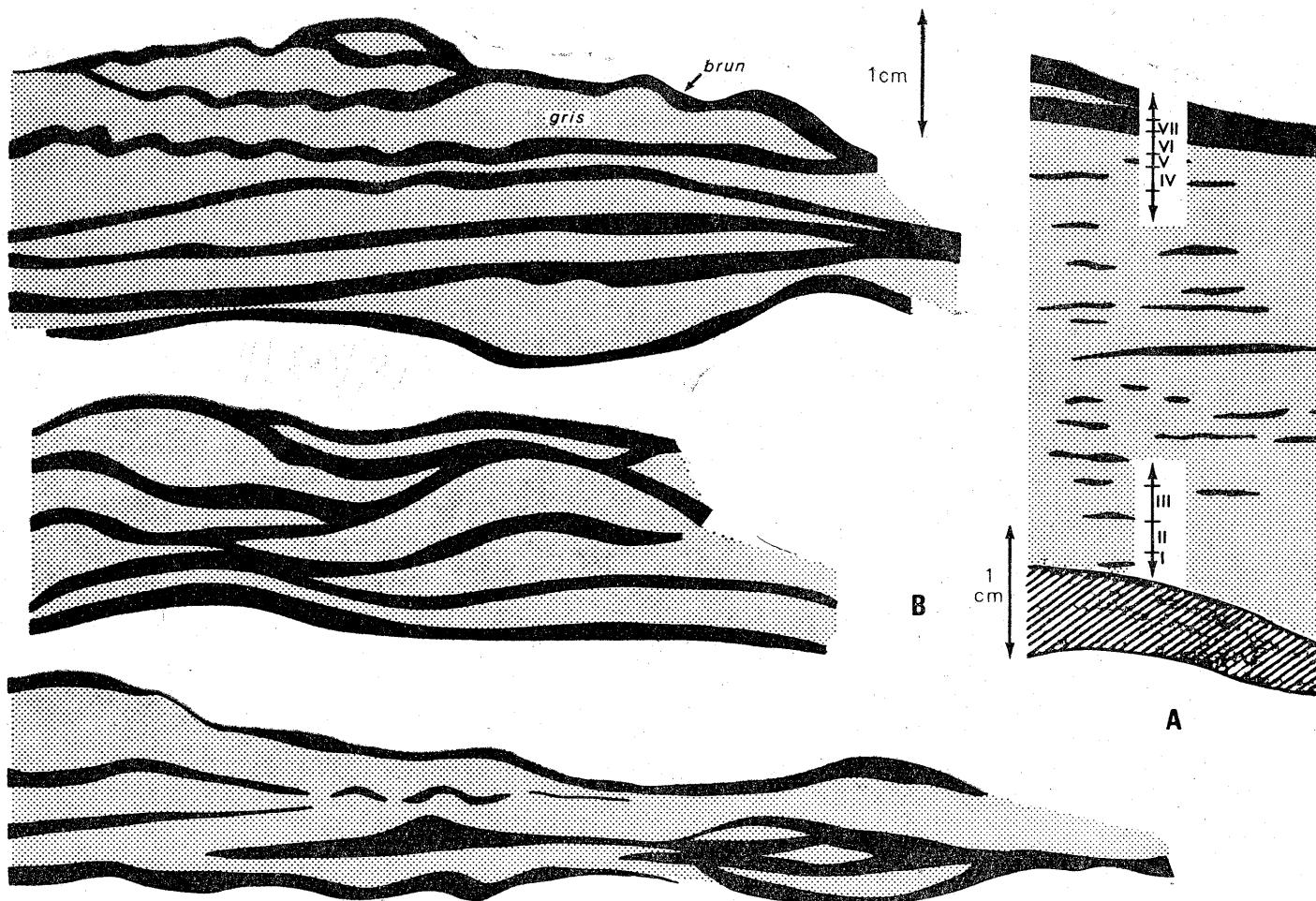
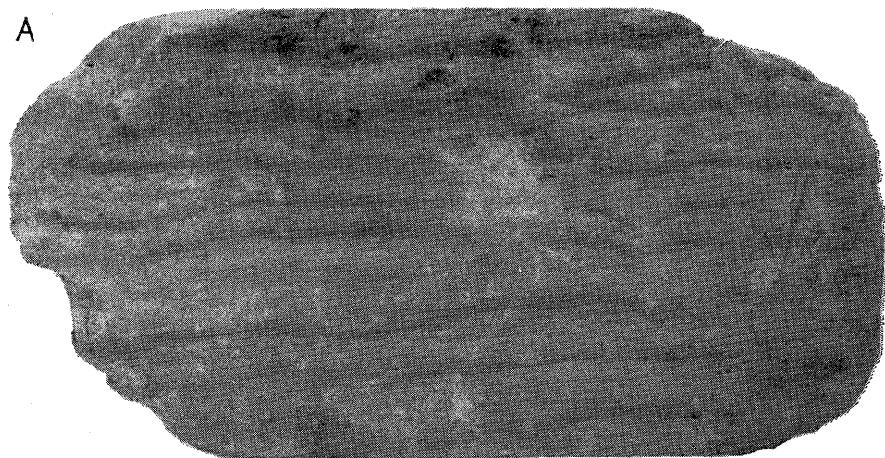


Fig. 2. Structure de doublets

A — macroséquence (Saint-Romain); B — séquence d'épaisseur normale mais à doublets anastomosés

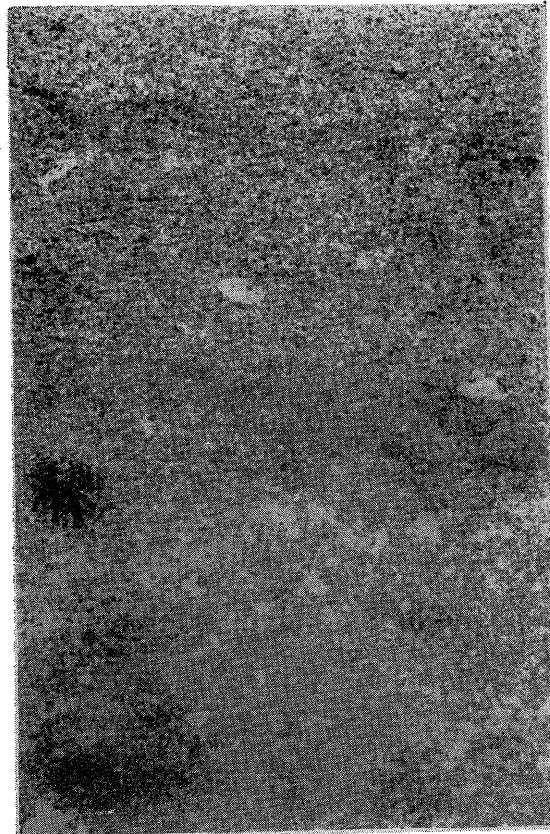
A



0

10 Cm

B



C



Photo 1. Photos de limons à doublets de Saint-Romain:

A — coupe, B — lame mince ( $\times 11,5$ ), C — de Sartilly: bioturbation ( $\times 11,5$ )

L'un d'entre nous (P. G.) a fait des observations après un grattage superficiel ou par peeling sur scotch sur trois limons (deux de Saint-Romain et un loess saalien de Mesnil-Esnard, près de Rouen) afin de calculer l'indice de clasticité de Passegae: cinq à huit couches élémentaires théoriques sont distinguées dans lesquelles on mesure les six plus gros grains de quartz au micromètre. Sur les cinq essais initiaux dans les limons à doublets fins (Saint-Romain, Mesnil-Esnard) seuls les deux premiers montrent une différence entre le lit brun supérieur (indice de clasticité de 47 à 50 micromètres et 42 à 54,1) et le lit gris inférieur (46 à 61 micromètres et 49 à 62,5). Un autre essai est ensuite effectué sur limon à gros doublets de Saint-Romain, avec 14 couches: l'indice de clasticité s'avère plus élevé (fraction sable plus importante): 108 à 138 micromètres, mais il n'apparaît pas de granoclassement vertical. Par contre les microséquences bien visibles se détachent parfois, avec des microlits grossiers (indice: 138, 130, 145) et des microlits marron plus fins (108—110 micromètres). Enfin, en reprenant plus en détail le quart supérieur et inférieur d'un gros doublet et en distinguant 7 microséquences (fig. 2, A) avec 38 couches élémentaires nous retrouvons (P. G.) les mêmes caractéristiques: pas de granoclassement dans la macroséquence (avec cependant un indice de clasticité légèrement plus élevé à la base), mais des différences peu nettes dans les microséquences entre lits marron et gris comme dans le premier cas à Saint-Romain pour les doublets fins.

On remarquera aussi:

- (1) la présence de vides planaires subhorizontaux à la base du lit gris-jaune;
- (2) l'existence de bioturbations nombreuses déformant les doublets (photo 1—C)
- (3) la forme parfois anastomosée (P. G.) des lits (fig. 2, B); la strate brune varie souvent d'épaisseur et même on croit discerner des microchenaux qui l'érodent.

### LES HYPOTHÈSES SUR LA GENÈSE DES DOUBLETS

L'hypothèse nivéo-éolienne et les hypothèses associées (ruissellement, gélifluxion laminaires) ne tiennent plus après l'analyse que nous venons de faire; il n'y a aucune trace nette d'orientation des minéraux, de remaniement, de granoclassement, de pavage, montrant le rôle de l'eau sous forme de ruissellements en lames ou de fines nappes fluides gélifuidales. En micro et en macromorphologie nous n'observons pas de troncature, d'érosion, de changement de granulométrie. Ceci n'implique pas pour autant l'absence d'eau comme nous le verrons. D'ailleurs les structures obtenues au cours des expériences de ruissellement par MUCHER et DE PLOEY (1977) sont bien différentes des doublets.

### LES HYPOTHÈSES DE THERMOMIGRATION DES PARTICULES FINES

La migration des sels et des argiles peut s'expliquer par plusieurs processus rappelés par BERTOUILLE (1972, 1978) et par MAZO (1978); nous retiendrons essentiellement l'effet SORET (migration des sels vers la partie froide), l'électrophorèze (migration d'ions sous l'action d'un champ électrique par différence de température et par congélation de solutions aqueuses), l'évaporation, et le refoulement des sels et particules par l'eau qui, en gelant, rejette les impuretés. Ces phénomènes commen-

cent à être connus à la suite des expériences de physiciens, mais en général dans un milieu particulier (suspension par exemple); de plus leur intensité est variable et encore mal définie. Il semble que les deux derniers mécanismes (évaporation, refoulement des particules par la glace) soient les plus efficaces et nous allons les examiner de plus près.

*L'hypothèse cryergique de refoulement des particules par la glace* a été exprimée par BERTOUILLE (1972, 1978). Elles s'appuie sur quelques expériences de physiciens, (entre autres, AGUIRRE-PUENTE, *et al.*, 1974–1975; ROWELL, DILLON, 1972) de géomorphologue (CORTE, 1966) et de pédologue (DUMANSKI, 1964). Toutefois tous ces essais concernent des milieux différents de celui d'un loess; c'est une suspension contenant des particules fines dans le cas d'AGUIRRE-PUENTE, un milieu hétérogène pour les expériences CORTE, un limon sableux d'origine glaciaire du Saskatchewan avec DUMANSKI. AGUIRRE-PUENTE et AZOUNI ont obtenu une stratification de couches de glace pure et d'argile (avec glace), mais on ne réussit pas à passer de cette suspension à un loess peu sableux à pores fins. En tout cas nos essais de gel se sont révélés infructueux (LAUTRIDOU, à paraître). Seul DUMANSKI parvient à reproduire expérimentalement une ébauche de structure ressemblant aux lamelles des horizons A de sols lessivés du Saskatchewan, développés sur limon sableux. Ces structures que VAN VLIET (1976) appelle "structures lamellaires triées" sont proches des doublets; DUMANSKI et St. ARNAUD (1966) les définissent comme des "banded fabrics" où ils distinguent trois types A, B, C, les types B et C en particulier comportant vers le haut une ou deux bandes enrichies en plasma et parfois à la base une ligne de quartz grossiers (type C). DUMANSKI a réussi à reconstituer seulement une structure proche du type A: film argileux au sommet d'une structure feuillettée. Cette "banded fabric" A ne ressemble pas aux limons à doublets; de plus le matériel est plus sableux, donc plus perméable que le loess et cet essai devrait être confirmé par de nouvelles expériences. Ajoutons que les types B et C diffèrent des doublets par leur finesse (moins d'un millimètre), leur longueur très restreinte (quelques millimètres), leur allure ondulée (en vagues).

Par conséquent aucune expérience probante n'est venue confirmer l'hypothèse cryergique; mais bien sûr il faut encore refaire d'autres essais.

*L'hypothèse de l'évaporation*, présentée par KUBIENA dès 1938 dans son fameux traité de micropédologie, (migration de l'eau et de l'argile vers le front d'évaporation) est reprise par DUMANSKI (1964) qui reconstitue expérimentalement une petite croûte superficielle. En conclusion de ses expériences (gel, évaporation) ce chercheur attribue un rôle essentiel au gel, renforcé par les effets de l'évaporation, dans la genèse des "banded fabrics". Mais nous n'avons pas réussi expérimentalement à reconstituer des doublets dans du limon en partant de cette hypothèse.

#### L'HYPOTHÈSE DE LAVAGE

L'hypothèse de lavage du lit jaune et d'accumulation plasmique dans le lit brun par l'eau de fonte des fines lentilles et feuillets de glace; c'est une autre explication des structures lamellaires triées (VAN VLIET, 1976; HARRIS — voir l'article dans ce

Bulletin, ainsi que ROMANS, *et al.*, 1974, et les pédologues étudiant les sols de montagne). Dans un milieu limoneux, peu sableux, au sein duquel l'eau migre très lentement cette hypothèse ne peut être retenue.

#### LES HYPOTHÈSES DE BATTEMENT DE NAPPE ET D'HYDROMORPHIE

L'hypothèse de battement de nappe explique les bandes ferrugineuses dans les sables selon SIUTA (1969). Dans les limons à forte ascension capillaire ce mécanisme est difficilement concevable. A propos des limons à doublets qui deviennent moins nets à l'est de Rouen, vers Paris, DEWOLF présente, pour la coupe d'Iville, l'hypothèse de décarbonatation suivie d'une migration du fer liée à l'hydromorphie laminaire, l'argile n'ayant pratiquement pas subi de déplacement (DEWOLF, 1978; DEWOLF, HELLUIN, LAUTRIDOU, à paraître).

#### L'HYPOTHÈSE D'UNE CROÛTE DE SURFACE FORMÉE PAR EFFET DE SPLASH

Cette hypothèse, suggérée par DE PLOEY, ne nous paraît pas rendre compte de la structure des doublets si on compare les lames minces de croûtes constituées sous une pluie artificielle (BRYAN, 1973) et celles de nos loess; il est vrai que BRYAN a effectué ses essais sur un matériel plus sableux que le limon normand.

#### L'HYPOTHÈSE PÉDOLOGIQUE DE LANGOHR

Pendant l'excursion en Belgique de la commission U.G.I. du périglaciaire (1978) LANGOHR a émis l'hypothèse que les limons à doublets sont l'équivalent en milieu loessique des illuviations en bande sur sable de couverture et sur loess sableux, sous l'horizon Bt du sol post vistulien; par conséquent cette structure d'horizon B en bandes est liée à la pédogenèse développée pendant l'Holocène, quels qu'en soient les processus encore mal connus et très discutés entre pédologues. Dans ce cas, en particulier sur loess sableux, on observe sous l'horizon Bt une évolution très nette vers le bas des bandes marron qui diminuent progressivement d'épaisseur et de netteté. Si on ne peut pas exclure cette hypothèse pour les doublets argileux et sombres situés immédiatement sous l'horizon B, il nous paraît que cette structure ne peut pas se développer sur plusieurs mètres d'épaisseur avec un loess peu sableux et peu perméable. De plus nous allons voir en prenant l'exemple de la coupe de Saint-Romain qu'il existe sous le sol actuel plusieurs générations bien différentes de limons à doublets, séparés par des discontinuités et qui ne peuvent relever d'une seule pédogenèse. Nous en arrivons donc à notre interprétation.

#### L'HYPOTHÈSE DE DÉCARBONATATION ET DE PETITE PÉDOGENÈSE

##### *La complexité des séquences normandes de limons à doublets*

Il y a dans la coupe de Saint-Romain (Pays de Caux, Nord de Tancarville) une grande variété de limons à doublets, dans le Vistulien, mais aussi dans le Saalien puisque sous le sol éémien ("sol de Saint-Romain") on retrouve des doublets, certes moins argileux et moins nets (fig. 3:1), puis sous un autre sol interglaciaire à nouveau des limons à doublets très caractéristiques (LAUTRIDOU, 1977). Nous rappelons

sommairement la stratigraphie de la coupe de Saint-Romain (fig. 3) pour le Vistulien : le sol brun lessivé éémien est étiré et géliflué au Vistulien ancien, puis deux loess pléniglaciaires se succèdent, séparés par le niveau de Kesselt (érosion et langues de gélifluxion post Denekamp). Le Pléniglaciaire supérieur (post Kesselt) est subdivisé en trois par les niveaux de Saint-Romain et de Goderville.

Dans le Vistulien nous distinguons essentiellement quatre générations de limons à doublets en partant du haut, sous le sol actuel :

- une première série souvent altérée par le pédogenèse récente, mais visible à Goderville (fig. 3: 3), à doublets marron foncé et gris clair peu continus, post-niveau de Goderville,

- une deuxième génération, la plus nette et la plus régulière à doublets marron et gris-jaunes à jaunes, contenue entre les niveaux de Goderville et de Saint-Romain (fig. 3:1 et photo 1-B),

- une troisième génération à doublets variés, déformés, plissotés, légèrement hydromorphes parfois,

- enfin la dernière série, située sous le niveau de Kesselt, d'âge Pléniglaciaire inférieur, à gros doublets épais, marron et jaune, visibles localement (fig. 3: 1) mais fréquemment tronqués et dégradés comme on le voit sur la figure 3. En fait, la succession est encore plus complexe pour les niveaux de Saint-Romain et de Kesselt. Ces niveaux sont caractérisés par la déformation plus ou moins importante de petites fentes (fig. 3), pouvant aller jusqu'à la formation de langues de gélifluxion (Kesselt). Un liseré brunâtre jalonne souvent ces niveaux; petit horizon humifère d'un sol de steppe (fig. 3: 2); de plus les premiers doublets (n° 2 et 6, fig. 3: 2) au-dessus du niveau sont gris clair à gris cendre et marron foncé et se terminent parfois par un autre liseré brun ou noirâtre, humifère. Il y a donc là une petite pédogenèse avant le dépôt des limons à doublets typiques.

On remarquera aussi un autre point important: les doublets sont déformés soit au niveau de Kesselt (fig. 3: 1-2), soit par les niveaux de Saint-Romain (fig. 3: 2) et de Goderville (fig. 3: 3); en particulier pour ces deux derniers cas, les doublets sont redressés près de la lèvre aval de la fente fauchée, et flous, étirés près de la lèvre amont. De même les bioturbations remanient des doublets déjà constitués. Par conséquent la formation des doublets ne peut relever d'un seul épisode pédogénétique et s'avère donc contemporaine des loess du Pléniglaciaire inférieur et supérieur.

Nous considérons que la genèse des doublets s'est effectuée d'abord à la suite d'une décarbonatation des limons, contemporaine de la sédimentation, puis par faible migration d'argile fine et de fer pendant des épisodes plus doux et plus humides.

#### *La décarbonatation*

Nous avons montré qu'une bonne partie de l'apport éolien provient de sédiments marins et estuariens carbonatés des fonds de la Manche exondée (LAUTRIDOU, 1965, 1968). Les loess carbonatés, que nous appelons des "faciès séquanien", de la vallée de la Seine et du Centre du Bassin Parisien passent latéralement aux limons à doublets non calcaires. Nous en déduisons que ces limons à doublets appartenant

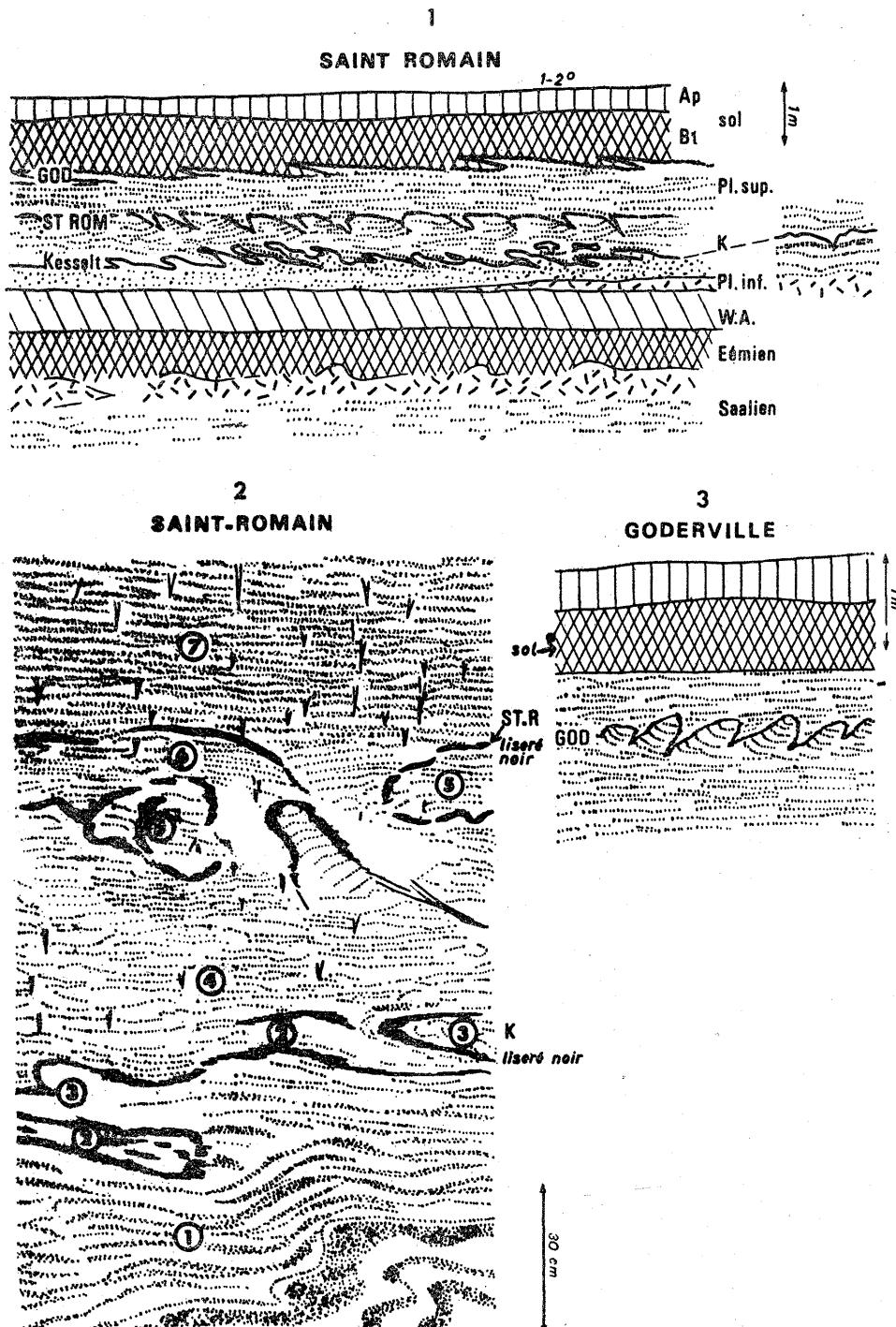


Fig. 3. Coupes de limons à doublets

1. Saint-Romain coupe de la paroi; 2. Saint-Romain détail, avec les niveaux de Kesselt (K) et de Saint-Romain (ST-R);
3. Goderville, avec le niveau de Goderville (GOD) dans le Pléniglaciale supérieur

à la séquence normande à influences humides (gley, gélifluxion, faciès non calcaires) ont été décarbonatés pendant le dépôt ou peu après, le carbonate subissant un lessivage oblique. L'autre hypothèse, celle d'une décarbonatation liée à l'altération post vistulienne, ne rend pas compte de plusieurs éléments; la décarbonatation de trois à quatre mètres de loess non sableux s'explique difficilement par la pédogenèse récente, et l'absence de zone d'accumulation du carbonate (soit au sommet d'un horizon calcaire qui existe localement au niveau du Pléniglaciaire inférieur, soit au contact d'une couche argileuse imperméable comme le sol interglaciaire fossile) nous paraît étonnante.

BERTOUILLE (1978) considère que la décarbonatation d'un loess contenant 10% de carbonate, de densité sèche 1,8, ne peut être contemporaine du dépôt éolien: sachant que 14,12 milligrammes de  $\text{CaCO}_3$  peuvent être dissous dans un litre d'eau de pluie, il faut une colonne d'eau de 127 mètres, soit 180 ans pour un cube de 1 cm de côté en tenant compte des précipitations annuelles (700 mm actuellement à Caen). Si on fait le calcul, très approximatif à cause des hiatus, de la vitesse de sédimentation éolienne pendant le Pléniglaciaire, on arrive aux environs de 0,2 mm par an; il faudrait donc moins de quatre années pour décarbonater cette tranche annuelle. Ce calcul ne tient pas compte de la matière organique du sol; la pression partielle de  $\text{CO}_2$  dans

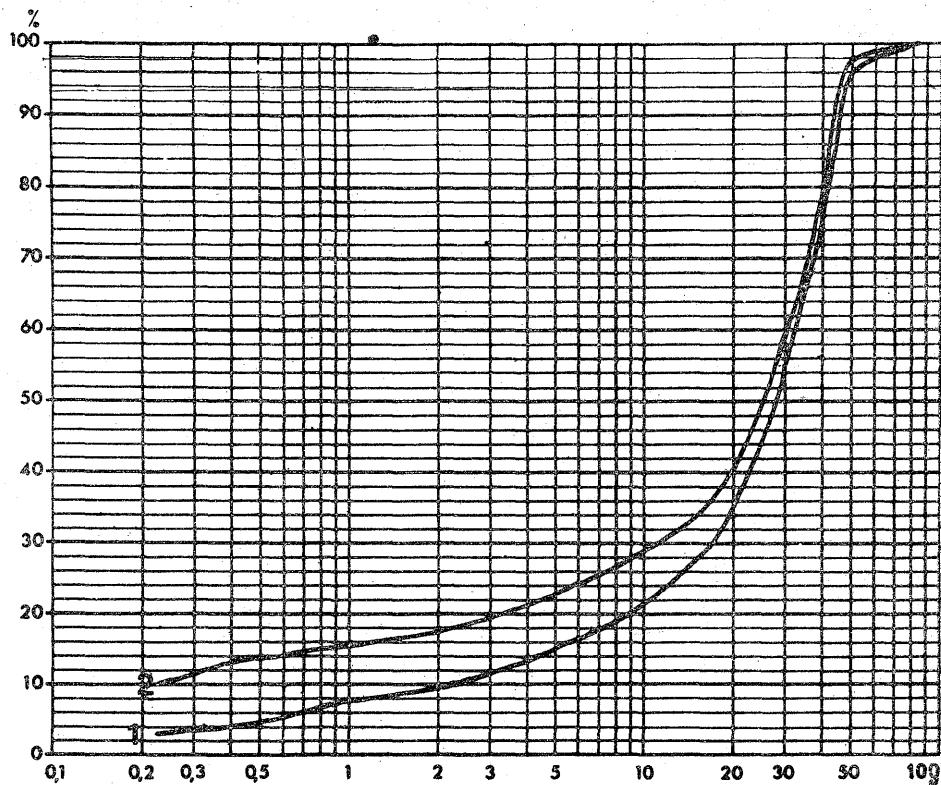


Fig. 4. Comparaison entre les courbes granulométriques d'un loess calcaire (1) de Roumare et du même loess décarbonaté dans sa partie supérieure, mais non altéré (2)

les horizons humifères pouvant être près de 100 fois plus élevée que dans l'eau de pluie; or le loess ne s'est pas déposé dans un désert polaire, mais sur une steppe et il nous semble donc qu'en dépit du caractère très approximatif de ce calcul (vitesse de sédimentation et chiffre de précipitation mal connus, taux de matière organique non mesurable) il n'apparaît pas impossible que le loess ait été décarbonaté rapidement, quatre fois plus vite dans le milieu de sol steppique que par l'eau de pluie, ce qui équivaut à une décarbonatation annuelle complète. D'ailleurs dans toute l'Europe ces changements latéraux de faciès loessiques sont bien connus (travaux de la Commission des loess) de même qu'aux Etats-Unis (SMITH, 1942), la teneur en carbonate de calcium correspondant à un équilibre entre la vitesse de sédimentation et celle du lessivage.

La décarbonatation libère un quantité importante d'argile fine; lorsqu'on compare la granulométrie d'un loess calcaire et celle du même loess décarbonaté expérimentalement ou prélevé dans un horizon décalcifié (mais non altéré) il apparaît une nette différence de teneur en argile fine (fig. 4). Cette différence ne peut s'expliquer totalement par une inégale répartition du carbonate dans le loess (8,3 % dans la fraction inférieure à 2 micromètres, 22,5 % entre 2 et 20 micromètres, 13,3 % entre 20 et 50 micromètres, 12,5 % dans la fraction sable) de Roumare près de Rouen; il faut admettre après d'autres pédologues comme DUCHAUFFOUR (précis de pédologie) qu'une partie de l'argile se trouve cimentée avec du carbonate pour donner des particules limoneuses (phénomène du "loessification"). Lors de la décarbonatation un stock d'argile fine et de fer se trouve disponible dans des conditions de pH favorables (légèrement inférieur à 7).

#### *La migration de l'argile fine et du fer*

L'argile fine et le fer ont migré sur une courte distance depuis le lit maintenant gris vers le lit marron. La migration sera d'autant plus importante que la fraction sable augmente. Le blocage de l'argile se fait dans les zones de moindre perméabilité que nous avons distinguées en lame mince (quartz légèrement plus petits dans le lit marron). L'origine de cette très légère différenciation granulométrique est encore discutée: purement éolienne (J. P. L.) ou liée à un léger remaniement (P. G.) par écoulement lent et diffus d'eaux de fonte (lit gris), puis par adhérence (lit marron). En tout cas le déplacement des argiles et du fer est faible; il implique une légère pédogenèse dans des conditions climatiques moins rudes et arides que pendant le dépôt éolien. C'est aussi l'hypothèse de LIEBEROTH (1963) pour les "lamellenfleckenzone" qui ressemblent aux limons à doublets: petite migration d'argile en climat modérément froid et humide, avec probablement un rôle de la glace qui accentue la différenciation entre les lits.

Les phases de pédogenèse nous semblent donc nombreuses. Elles ne sont pas saisonnières car le nombre de doublets est insuffisant: nous en connaissons quelques unes: elles sont en rapport avec les petits sols de steppe ("liserés bruns ou noirâtres") que nous avons reconnus au-dessus des niveaux de Kesselt et de Saint-Romain. Elles permettent d'expliquer l'antériorité de la formation des lits marron et jaunes par rapport aux déformations puisque, par exemple, les langues de Kesselt recouvrent

et piègent des doublets du début du Pléniglaciaire supérieur. Mais surtout nous ne voyons pas le climat du Pléniglaciaire comme parfaitement stable même en dehors des petites oscillations précitées; nous croyons que de nombreuses phases de rémissions ont provoqué un adoucissement relatif du climat (bioturbations), une humidité plus grande et sans doute un ralentissement de la sédimentation éolienne.

### CONCLUSION

Le limon à doublets est une formation caractéristique de la séquence loessique normande dominée par des influences humides (gley, concrétions ferromanganiques, gélifluxion, décarbonatation) à la différence de la séquence loessique séquanienne à faciès carbonatés et à horizons humifères épais, se rapprochant des cycles éoliens d'Europe Centrale. La formation des doublets est liée à une décarbonatation syngénétique de la sédimentation éolienne, suivie d'une migration de l'argile fine et du fer pendant de courtes périodes de réchauffement.

Le limon à doublets est un faciès particulier de loess, si on ne restreint pas l'acception de ce terme au limon éolien carbonaté, homogène, poreux, sans structure. La définition du limon à doublets doit donc être précisée afin de bien distinguer ce faciès des autres formations litées; loess non carbonaté, constitué par une alternance de lits marron ou bruns et gris ou jaunes, d'épaisseur moyenne 2 à 10 millimètres, qui se différencient essentiellement par la teneur en argile fine et en fer.

### Bibliographie

- AGUIRRE-PUENTE, J., AZOUNI, M. A., 1974 — Theoretical model of repulsion of a particle by freezing front in movement and experimental study. I.I.F., I.I.R., Commission B1, C1, C2, Bressanone, et Lab. Aérothermique, CNRS, Meudon, rapport 499.
- AZOUNI, M. A., AGUIRRE-PUENTE, J., 1975 — Etude de la congélation des suspensions aqueuses. *15ème Congrès Intern. du froid, Moscou*; 6 p., multigr.
- BERTOUILLE, H., 1972 — Effet du gel sur les sols fins. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 2; p. 71—84.
- BERTOUILLE, H., 1978 — Théorie nouvelle de la formation des doublets des limons. *Bulletyn Peryglacjalny*, 37; p. 11—22.
- BORDES, F., 1954 — Les limons quaternaires du Bassin de la Seine. Thèse, Paris, Arch. Inst. Paléont. Hum., 26; 472 p.
- BRYAN, R. B., 1973 — Surface crusts formed under simulated rainfall on Canadian soils. *Lab. Chimica del Terreno Conferenze*, 2, Pise (Italie); p. 3—30.
- CORTE, A. E., 1966 — Particle sorting by repeated freezing and thawing. *Bulletyn Peryglacjalny*, 15; p. 176—240.
- DEWOLF, Y., 1978 — Contribution à l'étude des marges occidentales du Bassin de Paris. Th. Lettres, Paris VII; 589 p.
- DUMANSKI, J., 1964 — A micropedological study of eluviated horizons. Master thesis. Univ. Saskatchewan; 124 p. (Non publié).
- DUMANSKI, J., St. ARNAUD, 1966 — A micropedological study of eluvial soil horizons. *Can. Jour. Soil. Sci.*, 46; p. 287—292.
- EDELMAN, Ch., 1946 — Les limons et sables de couverture des Pays-Bas. *Congr. Géol. Terrains Rec. Ouest Europe*; p. 303—309.
- GRAINDOR, M. J., 1948 — Les limons quaternaires aux environs de Rouen. *Ann. Agr.*, 6; p. 2—28.

- LAUTRIDOU, J. P., 1965 — Les formations superficielles de Saint-Romain (Pays de Caux); leur contribution à l'étude morphologique de la région. Th. 3-ème cycle, Caen; 262 p. dactyl.; édition 1968: Ass. Norm. Géogr., Univ. Caen; 200 p.
- LAUTRIDOU, J. P., 1968 — Les loess de Saint-Romain et de Mesnil-Esnard (Pays de Caux). *Bull. Centre Géomorph.*, 2; 55 p.
- LIEBEROTH, I., 1963 — Lößsedimentation und Bodenbildung während des Pleistozäns in Sachsen. *Geologie*, 12; p. 149—187.
- MAZO, L., 1978 — Bibliographie sur la thermomigration des particules fines. *Bull. Centre Géomorph.*, 23; (sous presse).
- MUCHER, R., DE PLOEY, 1977 — Experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. *Earth Surf. Proc.*, 2; p. 117—124.
- PAEPE, R., SOMMÉ, J., 1970 — Les loess et la stratigraphie dans le Nord de la France et en Belgique. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 90; p. 191—201.
- ROMANS, J. C., ROBERTSON, L., 1974 — Some aspects of the genesis of alpine and upland soils in the British Isles. In: Soil microscopy, *Proc. 4th Intern. Meet.-Soil micromorphology*, ed. G. D. RUTHERFORD, Kingston, Ontario, Canada; p. 498—510.
- ROWELL, D., DILLON, P., 1972 — Migration and aggregation of Na-Ca clays by freezing of dispersed and flocculated suspensions. *Jour. Soil Sci.*, 23; p. 442—447.
- SIUTA, J., MOTOWICKA-TERELAK, T., 1969 — The origin and systematics of ferruginous precipitates in Quaternary formations and in present day soils. *Biuletyn Peryglacjalny*, 18; p. 209—257.
- SMITH, C. D., 1942 — Illinois loess: variations in its properties and distributions. *Univ. Ill. Bull.*, 490; p. 139—183.
- TAVERNIER, R., 1948 — Les formations quaternaires de la Belgique en rapport avec l'évolution morphologique du pays. *Bull. Soc. Géol. Paléont. Hydr.*, 57; p. 609—641.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1976 — Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles. *Biuletyn Peryglacjalny*, 26; p. 41—55.