

HORACE BERTOUILLE*

Caen

THÉORIE NOUVELLE DE LA FORMATION DES DOUBLETS DES LIMONS

Résumé de l'auteur

L'analyse des doublets des limons, très fréquents en Normandie, montre qu'ils sont constitués par la juxtaposition d'un horizon enrichi et d'un autre appauvri en colloïdes argileux et ferriques. Les formations du type „snowdrifts” auxquelles on les assimile ne permettent pas la dispersion, la complexation et la migration des colloïdes. La théorie présentée ici assigne aux doublets une formation *in situ*, dans la masse du limon décalcifié durant une période chaude avec ensuite migration des colloïdes dans un gradient thermique en période de gel.

Le terme *Limons à Doublets* semble avoir été utilisé pour la première fois par VAN STRAELEN au Congrès de Géologie des Terrains récents de l'ouest de l'Europe — Bruxelles 1946. On désigne sous ce vocable des limons présentant de minces lits de couleur foncée, généralement brune, alternant avec d'autres de couleur plus claire. Les limons à doublets que nous avons observés montrent 3 zones distinctes passant verticalement et insensiblement de l'une à l'autre. Au sommet, on trouve une première zone avec taches floues, plus ou moins décolorées, oblongues et allongées en alignements discontinus horizontaux, à laquelle fait suite une zone médiane ou zone à doublets proprement dits. Dans celle-ci, les doublets c'est-à-dire la réunion d'un horizon foncé avec un autre clair contigu s'élargissent du haut en bas de la couche, passant de quelques millimètres au sommet à 50 mm et parfois davantage à la base. Les couleurs sont plus contrastées dans les doublets étroits et les plus larges ont leurs parties foncées souvent subdivisées en horizons secondaires, très fins, peu contrastés. Le rapport des largeurs: horizon foncé/horizon clair varie entre 1/1 et 1/10; plus ce rapport est petit plus le contraste des couleurs est grand, plus la limite supérieure de la partie foncée est nette et plus la base de cette même zone foncée apparaît dégradée sans toutefois qu'il y ait passage insensible de l'horizon foncé à l'horizon clair.

Les doublets sont généralement plissotés et présentent des ondulations dont l'amplitude dépasse rarement le centimètre et qui ne se reproduisent pas systématiquement tout au plus un même dessin peut-il se reproduire sur 2 ou 3 doublets contigus.

* Ponts et Chaussées, Centre d'Expérimentation du Gel. Rue des Tilleuls, 14-Caen, France.

Les doublets peuvent s'anastomoser s'ils sont étroits. Parfois, une même nappe de doublets peut affecter plusieurs couches de limon d'âges différents et se superposer à d'autres nappes plus anciennes. Au séchage, il apparaît souvent des fissures à la limite supérieure des horizons foncés, marquant par là une faiblesse mécanique, une solution de continuité dans le sol. A la partie inférieure de cette seconde zone, les doublets de plus en plus larges sont aussi de plus en plus flous pour se fondre en une 3ème zone avec les mêmes taches décolorées que la 1ère et en plus des nodules d'accumulation ferrique et d'autres généralement un peu plus bas que les précédents, d'accumulation des sels de manganèse.

L'analyse comparative des 2 horizons des doublets, montre une proportion beaucoup plus élevée des particules fines argileuses et du fer dans les parties foncées et l'intimité du mélange de ces 2 éléments de polarités électriques opposées indique comme nous le verrons plus loin une complexation sous une forme non ionique. En sorte que les doublets des limons apparaissent comme étant une alternance de zones claires appauvries en colloïdes argileux et en fer et de zones foncées d'accumulation de ces mêmes éléments ayant migré d'une zone à l'autre en ordre principal sous forme de complexes ferro-argileux.

ORIGINE ET CONSTITUANTS DES LIMONS À DOUBLETS DE NORMANDIE

Les limons de Normandie, particulièrement riches en doublets, sont ainsi que l'a montré par l'étude des minéraux lourds J. P. LAUTRIDOU (1968a) un dépôt éolien de poussières prélevées dans l'estuaire de la Seine et sur la plate-forme continentale de la Manche partiellement exondée par suite de l'abaissement du niveau de la mer. Cette origine marine confère à ce sédiment une composition et des propriétés particulières ayant influencé son évolution ultérieure. Nous allons en étudier les principales particularités et l'évolution dans les 2 éventualités suivantes:

(1) climat froid, périglaciaire, lorsque par suite du gel, la végétation est réduite ainsi que toute activité biologique, ce qui conduit d'une part à la formation de cryosols dans lesquels l'humus s'accumule peu (FEDOROFF, 1966) et d'autre part à la raréfaction du CO₂ dans le sol et partant dans l'atmosphère;

(2) climat tempéré des interstades, périodes durant lesquelles une végétation abondante et une action micro-biologique intense produisant dans notre cas la lehmification du loess avec production massive de CO₂.

ALCALINO-TERREUX, CALCIUM, MAGNÉSIUM

Les sédiments marins sont en grande partie hérités des fleuves et rivières. Il est donc normal que ceux de la Manche contiennent du calcaire puisque les bassins de la Seine et des autres rivières qui s'y jettent, couvrent de vastes surfaces de terrain calcaire. Il en est de même de la

plateforme continentale et les coquilles marines fournissent une grande quantité de CaCO_3 . Les loess normands, même s'ils sont actuellement complètement décalcifiés, à l'origine contenaient du calcaire. La présence de montmorillonite en dominante dans la fraction argileuse l'atteste. Les bases en effet, et plus particulièrement Ca^{++} provoquent l'apparition de la montmorillonite ou tout au moins sa stabilité dans les équilibres géochimiques de la surface lorsqu'elle provient d'un héritage en sorte que CaCO_3 joue un rôle "pilote" dans la formation de la montmorillonite (MILLOT, 1964).

Dans le sol, le carbonate de calcium est à l'état solide, pratiquement insoluble dans l'eau pure. Toutefois, il est solubilisé à l'état de bicarbonate en présence de CO_2 , lequel provient soit de l'atmosphère soit de la décomposition des matières organiques du sol; le calcaire peut alors migrer. En période glaciaire, le CO_2 de l'atmosphère, à cause de la raréfaction des activités biologiques dans le sol fut, sinon le seul à agir du moins son action sur le calcaire fut largement prépondérante, mais généralement surestimée. L'eau de pluie en effet contient au maximum $10^{-4,8}$ moles de CO_2 par litre pouvant solubiliser 1,59 milligramme de CaCO_3 (GARRELS et CHRIST, 1967). Si nous considérons 1 cm³ de limon ayant 1,8 de densité sèche apparente et contenant 10 % de CaCO_3 , il faut faire percoler à travers cette masse 113 litres d'eau de pluie pour la décalcifier soit une colonne d'eau de 1 cm² de section et de 1130 m de hauteur, en supposant l'eau saturée en CO_2 , la réaction totale et en l'absence de CO_2 dans le sol. Ceci correspondrait pour une précipitation moyenne annuelle de 700 mm d'eau (région de Caen) à une période de plus de 1600 ans. Selon MEYER et DUCHAUFFOUR il faut 2 à 3000 ans en climat tempéré pour décalcifier 50 à 60 cm de loess contenant 20 % de CaCO_3 ; en se basant comme dans l'exemple précédent sur la seule action des eaux atmosphériques percolant à travers ce sol, il faudrait dans des conditions optimales quelque 120.000 ans. On voit dès lors que l'action du CO_2 de l'air est pratiquement négligeable et que la décalcification des loess n'a pu se faire qu'en période tempérée ou chaude d'autant plus que les eaux du sol en gelant abandonnent les sels en dissolution, le bicarbonate de calcium dissous reprécipite à l'état de CaCO_3 actif et le CO_2 est restitué à l'atmosphère. EK et PISSART (1965) opérant sur une eau de ville ont constaté que la pression partielle du CO_2 dissous dans l'eau était après congélation, le soixantième de ce qu'elle était initialement. Cette chute de pression est accompagnée d'un dépôt correspondant de CaCO_3 et le phénomène n'est pas immédiatement réversible. C'est donc bien sous l'action du CO_2 du sol qu'a pu s'effectuer la décalcification relativement rapide des loess. L'élaboration du CO_2 y est proportionnelle à l'activité biologique laquelle très réduite durant les périodes glaciaires du Quaternaire fut maximale durant les interstades.

Quel que soit le climat l'ion Ca^{++} est un floculant énergique des argiles et des colloïdes ferriques, mais en période pédogénétique active, il agit „par l'influence qu'il exerce sur la nature des acides humiques, plus que

par son action floculante" (DUCHAUFOUR, 1965). En effet, le CaCO_3 actif précipité des solutions bicarbonatées, par le gel en particulier, forme avec l'humus des pellicules protectrices autour des grains et agrégats ce qui les rend stables et conduit à une structure grumeleuse. En présence de CaCO_3 actif, les acides humiques floculent en formant des humus calciques peu lessivables et peu altérables, le profil pédologique est alors du type A/C. Le gonflement des argiles calciques est faible, il n'y a pas dispersion bien que le pH supérieur à 7 soit théoriquement favorable. La présence de CaCO_3 empêche les complexes de fer de se former et ceux existants restent stables. Le fer est pratiquement insolubilisé et les hydrates de fer électro-positifs sont floculés par le milieu alcalin.

Les fermentations de matières organiques dans le sol dégagent du CO_2 qui comme nous l'avons dit, solubilise CaCO_3 les réserves de Ca^{++} échangeables sont plus ou moins rapidement épuisées, il y a acidification progressive du milieu ce qui à la longue conduit à un pH acide propice à la dispersion des éléments électropositifs (sexquioxydes) (BÉTRÉMIEUX, 1951) mais aussi à la floculation des argiles électro-négatives.

La magnésium agit comme le calcium, ses sels solubilisés par les résidus des fermentations.

PHOSPHATE TRICALCIQUE

Le phosphate tricalcique provient de la décomposition des os et des coquilles de mollusques. Il immobilise le fer et renforce l'action déprimante, floculante du calcaire. Il est pratiquement insoluble dans l'eau mais il est légèrement solubilisé par les fermentations et les processus réducteurs biologiques du sol. L'anion P_2O_5 s'allie alors à Fe^{++} pour donner du phosphate de fer par épigenie, ce dernier insoluble en présence du phosphate tricalcique.

IONS ET SELS ALCALINS, CHLORURES

A l'origine, les dépôts marins ou lagunaires contiennent des ions alcalins adsorbés ou associés à un anion, au chlore en particulier. Le sédiment originel des loess était un matériau mixte contenant à la fois des cations et des sels alcalins, surtout du chlorure de sodium, sels contenues dans les eaux connées, difficiles à éliminer ou apportées pour les embruns, selon MARKOV, et par des débris éoliens de glace marine ainsi que l'a observé MAWSON (A. CAILLEUX, 1963). Les ions K^+ et Na^+ floculent les argiles, l'eau de mer qui en contient est particulièrement déprimante en sorte qu'il y a floculation immédiate des argiles entraînées par les fleuves, dès leur entrée dans l'estuaire. La montmorillonite est particulièrement sensible. Les agrégats de montmorillonite sodique gonflent mais résistent à la dispersion (MÉRING, 1946). En période d'activité biologique, les chlorures sont défavorables à la fermentation des matières organiques et le chlorure de sodium est généralement nocif à la végétation.

ARGILES - MONTMORILLONITE

Les limons à doublets de Normandie contiennent en mélange de l'illite, de la kaolinite et de la montmorillonite, cette dernière, dominant dans les formations récentes (Wurm) pour ensuite céder le pas à l'illite et à la kaolinite dans les formations plus anciennes. C'est là une évolution normale après décalcification. Les argiles sont constituées par des particules très fines électro-négatives floculant en milieu acide et dispersant en milieu alcalin; cependant en pH supérieur à 7, le calcaire et les ions alcalins les floculent. En présence d'humus, les argiles peuvent former des complexes argilo-humiques insolubles, difficiles à disperser lorsqu'ils sont floculés et lorsque les molécules organiques sont polymérisées, ou des complexes pseudosolubles susceptibles de migrations.

La montmorillonite est en général un minéral de néoformation à partir des calcaires. Ses particules sont très fines et gonflantes, sa sédimentation est très lente, sauf en mer où sous l'action déprimante des alcalins et alcalino-terreux particulièrement énergique sur elle, la montmorillonite se dépose près des côtes. Dans les sols, une fois dispersée, elle migre plus rapidement que les autres types d'argile. Par contre ses agrégats sont plus stables que ceux de la kaolinite.

FER

Dans les limons à doublets, le fer est présent en ordre principal sous forme d'hydrate ferrique ou sexquioxyde, c'est à dire à l'état de colloïdes électro-positifs se dispersant en milieu acide et floculant en milieu alcalin ainsi qu'en présence des électrolytes du sol, du CO_3Ca et du phosphate tricalcique. Sous l'action des produits de fermentation, les sels ferriques insolubles dans l'eau, sont réduits en sels ferreux solubles, avec acidification du milieu. Certains micro-organismes agissent dans le même sens: *Clostridium*, *Escherichia*, et surtout *Bacillus polymixa* isolé par ROBERTS dont l'action est particulièrement énergique vers 30/35°C, en présence de glucides. Ces réductions par fermentation et micro-organismes se font en milieu anaérobie, elles sont donc plus rapides dans les sols à particules fines et elles prédisposent aux phénomènes d'hydromorphie. Les sels ferriques peuvent être aussi solubilisés par des composés organiques labiles, exemple, l'acide oxalique. Les sels ferreux sont très instables, en présence d'oxygène, ils précipitent à l'état ferrique Fe^{+++} d'autant plus rapidement que la température est élevée et la solution diluée. Cette grande instabilité des sels ferreux en présence de l'oxygène minimise l'action oxydante des ferro-bactéries aérobies (STARKEY et HALVORSON, 1927).

En l'absence de calcaire, les colloïdes ferriques électro-positifs peuvent se fixer aux colloïdes électro-négatifs en formant des complexes insolubles, stables, difficiles à disperser; ils peuvent aussi donner avec la matière organique des complexes pseudo-solubles de types Chelates au de Werner

selon l'édifice moléculaires. Ils peuvent également s'allier à d'autres colloïdes électro-négatifs indifférents à l'argile et moins sensibles aux électrolytes du sol: silice, alumine... (BASTISSE, 1949). Une particularité des horizons d'accumulation de ces complexes, consiste dans l'homogénéité du dépôt et l'intimité du mélange argile-oxydes ferriques. Selon BARBIER (1938) le fer complexé peut être floculé par les électrolytes du sol sous forme de gels redispersables libres ou fixés irréversiblement par l'argile. Des processus microbiologiques peuvent précipiter le fer des ferri-humates et des complexes organiques et Fe^{++} peut subsister à l'état de combinaisons organiques, tant que les radicaux organiques ne sont pas consommés par les micro-organismes. Notons enfin que mécaniquement, les oxydes ferriques s'opposent à la dispersion en augmentant la résistance à l'éclatement des agrégats et en empêchant le gonflement des grains d'argile qu'ils enrobent.

CONCLUSIONS

Les limons de Normandie sont le remaniement d'un sédiment marin, côtier, floculé contenant une part importante d'éléments flocculants: sels et ions alcalins, alcalino-terreux, phosphate tricalcique..., pauvre en matières organiques, très sujet à une structuration qui en augmentant la macro-porosité diminue les possibilités de lessivage.

Dans un loess, la migration sous forme colloïdale, phorétique, est liée à la disparition des éléments flocculants, en particulier du CaCO_3 le plus important de tous. La disparition de ces éléments devra être totale si l'on fait abstraction des processus pédogénétiques. Il y aura dans ce cas précis la succession de fait suivants:

(1) disparition par lixiviation sous l'effet des eaux atmosphériques des ions et sels alcalins, solubilisation extrêmement lente du CaCO_3 en présence de CO_2 . Le phosphate tricalcique insoluble s'il est abondant risque de compromettre la suite de l'évolution;

(2) après disparition du CaCO_3 , en pH alcalin, dispersion et migration des argiles;

(3) acidification progressive du milieu, dispersion et migration des sels de fer et de manganèse en pH acide. Les formes oxydées du manganèse ayant un potentiel oxydo-réducteur plus élevé que celles du fer sont plus facilement réductibles que celles-ci, les solutions de Mn^{++} étant plus stables à l'air que celles de Fe^{++} , les solutions manganeuses migrent plus facilement et plus loin que les solutions des sels de fer.

En l'absence de processus pédologiques, la migration est sélective et prédispose les horizons d'accumulation à présenter la succession suivante: à la base accumulation d'argile colmatant le réseau de porosité, surmontée par les sels de manganèse et au sommet accumulation des oxydes ferriques. On n'observe pas un tel litage dans les doublets des loess (*sensu stricto*).

Ce processus qui fait appel aux seuls éléments atmosphériques, fut à peu près réalisé dans les sols durant le gel quaternaire, il le fut d'une façon totale en ce qui concerne les poussières retenues dans la neige. Durant les glaciations quaternaires, la végétation était réduite à cause de la rigueur du climat et des actions mécaniques du gel : déchaussement des plantes, rupture de leur système radiculaire..., en sorte que la pédogénèse était ralentie tant par cette raréfaction de la végétation que par les effets sur le sol, de l'abaissement de la température : humus non ou à peine décomposé, peu ou pas de fermentations et de micro-organismes donc peu de CO_2 dans le sol et partant dans l'atmosphère. Dans ces conditions, l'action des agents atmosphériques était largement prépondérante, et nous avons vu avec quelle lenteur s'opère la décalcification d'un sol dans ce cas. De plus, le gel reprécipite une partie du CaCO_3 solubilisé, dégazifie les eaux et imperméabilise le sol. Sous l'effet des seules causes atmosphériques, la décalcification des loess Wurm serait actuellement à peine commencée.

La disparition des floculants est beaucoup plus rapide en période chaude ou tempérée, la végétation est abondante, les fermentations et les processus micro-biologiques de réduction et de dissolutions sont activés, il y a production de CO_2 en abondance, complexation des argiles et des sels ferriques en sorte que ces colloïdes peuvent migrer sous forme de complexes peu ou pas ionisés dans des conditions physiques, de pH en particulier, où ils seraient immanquablement précipités s'ils étaient restés à l'état ionique. Les horizons d'accumulation de ces complexes sont homogènes, le fer et les argiles sont intimement mélangés ; c'est le cas des doublets. De plus, les résidus de fermentation et les micro-organismes peuvent solubiliser des corps, tel le phosphate tricalcique qui ne peuvent l'être par les seuls agents atmosphériques.

Les conditions susceptibles de permettre les migrations et accumulations homogènes d'argile et d'hydroxyde ferrique c'est à dire d'en permettre la dispersion et la complexation n'ont été réalisées durant le Quaternaire que pendant les interglaciaires et les interstades chauds ou tempérés. Ceci est vrai aussi bien pour les doublets que pour les horizons d'accumulation pédologique. Mais nous verrons plus loin que ces 2 types de formation relèvent de processus génétiques différents, les doublets ne pouvant être considérés comme un cas particulier de profil pédologique au sens strict de ce terme.

DISCUSSION DES HYPOTHÈSES ACTUELLES

Si à la lumière des observations précédentes, nous examinons les hypothèses émises jusqu'ici pour expliquer la formation des doublets des limons, nous constatons leur insuffisance. M. J. GRAINDOR (1946) y voit une formation cryo-nivale de type *snowdrifts* à laquelle J. P. LAUTRIDOU (1968) ajoute l'effet du ruissellement.

Les particules éoliennes bloquées dans la neige échappent totalement aux éventuelles actions physiques et chimiques du sol, seule l'atmosphère (y compris la neige) agit sur elles. Jusqu'au moment de la fonte des neiges, ces agrégats loessiques étant secs, sont restés intacts chimiquement et intacts physiquement, leur petite taille leur permettant d'échapper aux cryoclastisme: le gel divise les roches jusqu'à une certaine limite mais ne disperse pas. C'est seulement au moment de la fonte des neiges qu'une transformation chimique en milieu humide a pu se produire, mais l'extrême lenteur de l'action des agents atmosphériques ne pouvait permettre, durant le court temps de la fonte des neiges, l'établissement des conditions requises pour l'accession à l'état colloïdal, de masses importantes de poussières loessiques, d'autant plus, que dans la neige, l'alternance des dégals diurnes et règles nocturnes, provoque la Névéification et alors, les poussières contenues dans la neige migrent à la surface supérieure (LIBOUTRY, 1964) échappant ainsi à l'action des eaux de fonte. D'ailleurs l'eau de fonte des neiges, ayant un pH de l'ordre de 5,5, est flocculante vis à vis des colloïdes électro-négatifs: argiles, CaCO_3 , ... si donc après dépôt dans la neige, des particules loessiques ont été entraînées que ce soit par le vent ou par ruissellement, ce sont des agrégats flocculés et non des colloïdes dispersés qui ont été déplacés, en sorte que le sédiment remanié est qualitativement et morphologiquement identique à celui resté sur place.

Il apparaît difficile dès lors d'expliquer la formation des doublets, accumulation colloïdale, par la présence de neige au moment du dépôt. D'autres arguments peuvent être avancés: absence de doublets dans les loess calcaires, homogénéité du dépôt malgré les tassements consécutifs à la décalcification...

THÉORIE NOUVELLE

Les doublets avons nous dit, sont constitués par l'alternance de zones appauvries et de zones enrichies en colloïdes ferro-argileux par migration, laquelle n'a pu s'effectuer qu'en milieu dispersant et complexant c'est à dire après l'élimination des éléments flocculants (alcalins, CaCO_3 , ...) au cours d'une période chaude, la pédogénèse active produisant le CO_2 nécessaire à la solubilisation du CaCO_3 . Ces conditions remplies, leur formation n'a pu s'effectuer qu'au sein même des masses argileuses décalcifiées (Lehms ou limons) dans des circonstances que nous allons préciser.

Dans un limon en cours de gel, nous pouvons considérer la progression vers le bas des 3 éléments suivants: l'isotherme 0°C , le front de gel et le front de migration colloïdale ou phorétique.

L'eau gèle à 0°C mais dans un sol poreux cette température de congélation est abaissée à cause de la présence de sels dissous et surtout de la

capillarité du réseau de porosité, en sorte que le front de gel est toujours situé plus haut que l'isotherme 0°C et l'abaissement du point cryoscopique est d'autant plus grand que les capillaires sont plus fins. Dans un milieu poreux idéal c'est à dire homogène et dans lequel aucune migration n'est possible, l'avancement de l'isotherme 0°C est continu et obéit à la loi de Berggren. Lorsque le gel progresse en profondeur, si les conditions thermiques ne varient pas à la surface du sol, le mouvement vers le bas des isothermes ralentit, et celles-ci s'écartent les unes des autres avec l'étirement du gradient des températures.

Mais dans les sols poreux humides, les thermomigrations compliquent ce processus simple.

Supposons un front de congélation à la température négative T rencontrant au cours de sa progression vers le bas une zone d'accumulation colloïdale dont la température de congélation est T_1 inférieure à T . A ce contact, le front de gel va s'arrêter. Durant cet arrêt, il se crée par cryo-osmose au niveau du front une lentille de glace plus ou moins épaisse, au détriment de l'eau contenue dans la couche riche en colloïdes non gelée sous jacente qui va ainsi s'assécher et se consolider d'avantage. En outre, cette couche non gelée va hériter des sels et colloïdes rejetés par les cristaux de glace, en sorte que finalement, à ce niveau, l'eau gélera à une température T_2 plus basse encore que T_1 ; l'arrêt du front de gel va donc se prolonger. Pendant ce temps, en-dessous de cet horizon surconsolidé, la migration phorétique continue, avec formation d'un horizon appauvri en colloïdes, dont le réseau de porosité moins encombré par les particules fines permet le gel de l'eau à une température T' supérieure à T_2 et T_1 . Lorsque le front de gel qui est à la température la plus basse T_2 sort par le bas de l'horizon enrichi et entre par le haut dans l'horizon appauvri, il rencontre une zone horizontale de sol limitée au sommet par l'isotherme T_2 c'est à dire le front de congélation et à la base par l'isotherme T' . Dans toute cette tranche de sol la température est inférieure à la température de congélation T' du milieu; l'eau y est soit gellée, on peut alors observer simultanément et momentanément 2 fronts de gel très proches l'un de l'autre et progressant dans le même sens mais à des vitesses différentes, soit en surfusion. De ce fait et par suite de la libération quasi instantanée des frigories emmagasinées dans le sol au voisinage du front de gel et correspondant à la différence de température $T_2 - T'$, le gel fait un bond en avant et sa vitesse de progression après s'être stabilisée, s'annulera à nouveau devant un autre horizon d'accumulation. Mais il est possible aussi que le front de gel dans sa progression rapide à travers la zone appauvrie rattrape le front de migration avant que celui-ci ait saturé le réseau de porosité. Le front de migration figé par le gel s'arrête formant un horizon riche en colloïdes, mais pas complètement engorgé, tandis que les processus thermiques et thermo-migratoires se poursuivent vers le bas. Le phénomène peut se reproduire périodiquement, c'est l'origine des doublets.

La formation des doublets est donc un phénomène cyclique dû à l'interférence de 2 mouvements de même sens mais de vitesses instantanées différentes, tous deux liés à la valeur du gradient thermique: la migration colloïdale d'une part et l'avancement du front de gel d'autre part. Au début du gel le gradient thermique est généralement très fort en surface en sorte que dans une certaine zone superficielle du sol, le phénomène migratoire phorétique, à cause de son inertie, n'a pas le temps de s'ébranler que déjà le sol est figé par le gel. Mais à mesure que celui-ci progresse, le gradient de température diminue (si les conditions thermiques ne varient pas), ainsi que la vitesse de propagation du gel; durant tout un temps cependant, celle-ci est trop élevée pour que des migrations importantes susceptibles de perturber le processus thermique, aient le temps de se produire. C'est l'origine de la zone floue supérieure sans doublets bien nets. Ceux-ci apparaissent pour une vitesse d'avancement du front de gel permettant une migration phorétique telle que la différence entre les températures d'engel dans la zone appauvrie à travers laquelle le front de gel se déplace et dans le front d'onde phorétique sous-jacent soit suffisante pour arrêter durant un temps, la progression du gel au moment de la rencontre front de gel/front de migration. La période du phénomène c'est à dire le temps écoulé entre 2 arrêts consécutifs du front de gel est très importante car elle conditionne la longueur d'onde c'est à dire la largeur des doublets et avec elle leurs caractères physiques que nous observons actuellement. En effet, la période du phénomène est inversement proportionnelle à la valeur du gradient thermique. Or dans des conditions thermiques constantes, cette valeur diminue lorsque l'épaisseur de la couche gelée augmente, ce qui entraîne d'une part l'augmentation du temps entre les arrêts avec le long du profil élargissement progressif des doublets vers le bas et, d'autre part, la migration phorétique étant proportionnelle au gradient de température, la diminution progressive elle aussi, du volume de colloïdes entraînés et avec elle, du contraste des 2 horizons du doublet. A une certaine profondeur dans le sol, les migrations diminuant sans cesse, ne sont plus suffisantes pour perturber le processus thermique. On obtient alors la zone floue inférieure.

On observe que les doublets proprement dits des limons normands se développent dans les zones relativement pauvres en colloïdes que constituent les horizons A_2 des profils pédologiques (sols bruns lessivés) et qu'ils se limitent souvent à la base, au contact de l'horizon d'accumulation B_{2t} (LAUTRIDOU, 1968a: fig. 18, 19, 21, et 1968b: fig. 3, 10) dans lequel au cours des phases finales de lessivage et de dégradation le fer et le manganèse se sont désolidarisé de l'argile pour migrer séparément et former les accumulations visibles actuellement. Ceci s'explique par le fait que la migration phorétique s'effectue d'abord par les voies les plus faciles et il est évident que dans ce sens, un horizon lessivé offre le maximum de possibilités. Ceci montre bien que l'on est en présence de 2 phénomènes

superposés : l'élaboration en climat chaud ou tempéré du profil pédologique d'abord, et ensuite, la formation des doublets par le processus migratoire que nous venons d'indiquer.

Une nappe de doublets est le reflet plus ou moins amorti selon la profondeur à laquelle elle s'est formée, des conditions de température en surface. Si celles-ci étaient rigoureusement constantes, on observerait en milieu homogène un écartement entre horizons variant régulièrement suivant une progression de raison constante. Les irrégularités dans la progression sont donc liées aux variations de la température extérieure : un doublet plus large que la normale correspondant à une courte période de température plus clémence, un doublet trop étroit étant l'indice d'un court refroidissement. Les lentilles ou films de glace sont à l'origine des fissures que la dessication fait apparaître au sommet des horizons enrichis.

Il reste à préciser pourquoi les doublets ne se rencontrent pas dans toutes les formations limoneuses ayant subit le gel quaternaire. Au cours du gel, la structure du sol se modifie de diverses manières selon les conditions thermiques imposées. La formation des doublets est liée à l'élaboration d'une structure feuilletée selon les isothermes du sol dont le mécanisme est connu ; par contre, les conditions thermiques nécessaires varient d'un sol à l'autre et sont toujours des cas d'espèce. La présence de doublets est liée aussi à la formation d'un front de migration phorétique, il doit donc exister une relation entre la porosité du sol, quantité de particules fines dispersées susceptible de migrer et les conditions thermiques imposées, il y a donc une question de granulométrie et une autre de pH. Nous avons vu que la montmorillonite migre plus vite que les autres argiles, la nature minéralogique de la roche est donc importante et l'accumulation sous forme de complexes ferro-argileux met en cause le climat et la pédogénèse. Les ions alcalins jouent certainement un rôle primordial.

En conclusion, les doublets sont formés par une migration cyclique des oxydes de fer et des argiles préalablement complexés par pédogénèse en période chaude, migration liée au gel, qui s'est effectuée dans la masse même du limon, en climat froid, postérieurement au dépôt.

Il y a donc dans la formation des doublets 3 phases climatiques à considérer :

1° une période froide avec dépôt éolien du loess calcaire à partir des sédiments de l'estuaire des rivières et de la plateforme continentale ;

2° une période tempérée durant laquelle s'élabore la lehmification du loess avec formation d'un sol brun lessivé classique ;

3° une seconde période froide avec formation des doublets le long du profil pédologique par interférence de l'onde de gel et de l'onde de migration phorétique.

Ainsi donc entre le dépôt des loess et la formation des doublets, événements tous deux de climat froid, il faut intercaler une ou plusieurs périodes chaudes ou tempérées durant lesquelles le sol s'est mis dans les

conditions physiques susceptibles de permettre les migrations thermophérétiques. Ceci est très important et doit être pris en considération dans l'interprétation d'une coupe géologique où apparaissent des doublets.

Les mêmes causes formatrices semblent pouvoir être appliquées à certaines ferruginisations et schistosités que l'on rencontre souvent dans les gisements français de sables.

Bibliographie

- BARBIER, G., 1938 — *Ann. Agronomiques*; p. 34.
- BASTISSE, E. M., 1949 — Essai sur le rôle des complexes colloïdaux en pédologie et en physiologie végétale. Thèse, Paris.
- BAZIN, 1897 — *Ann. des Ponts et Chaussées*, T. IV.
- BETREMIEUX, R., 1951 — Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agronomiques*, n° 3.
- CAILLÈRE, S. & HÉNIN, S., 1963 — Minéralogie des Argiles. Masson, Paris.
- CAILLEUX, A., 1963 — Géologie de l'Antartique. — SEDES, Paris.
- CAILLEUX, A., 1972 — Les formes de dépôts nivéo-éoliens actuels en Antarctique et au Nouveau Québec. *Cahiers de Géogr. du Québec*, n° 39.
- CAILLEUX, A. & ROCHETTE, J. C., 1971 — Dépôts nivéo-éoliens annuels à Poste-de-la-Baleine, Nouveau-Québec. *Rev. Géogr. Montréal*, vol. 25, n° 1.
- DUCHAUFOUR, Ph., 1965 — Précis de Pédologie. Masson, Paris.
- EK, C., PISSART, A., 1965 — Dépôt de CaCO₃ par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. *C. R. Acad. des Sci.*, T. 260, n° 3.
- FEDOROFF, N., 1966 — Les Cryosols. *Sci. du Sol*, 1966, n° 2.
- GARRELS & CHRIST, 1967 — Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, Paris.
- GRAINDOR, M. J., 1948 — Les limons quaternaires aux environs de Rouen. *Ann. Agron.*, n° 6.
- HENIN, S., 1960 — Le profil cultural. Ste d'Edition des Ingénieurs Agricoles, Paris.
- LAUTRIDOU, J. P., 1968a — Les formations superficielles de St Romain (Pays de Caux). *Fac. des Lettres*, Caen.
- LAUTRIDOU, J. P., 1968b — Les loess de St Romain et de Mesnil-Esnard. *Centre Géomorphologie, Caen, Bull.*, n° 2.
- LLIBOUTRY, L., 1964 — Traité de Glaciologie. Masson, Paris.
- MERING, J., 1946 — Hydratation of montmorillonite. *Trans. Faraday Society*, Vol. 42 B.
- MILLOT, 1964 — Géologie des Argiles. Masson, Paris.
- PETERSON, J. B., 1964 — The role of clay mineral in the formation of soil structure. *Soil. Sci.*, vol. 61.
- STARKEY, Rl., et HALVORSON, U. O., 1927 — *Soil Sci.*, n° 24; p. 381—401.