

Influence de la géomorphologie sur les sols dans la Pampa Deprimida (Argentine)

J. TRICART

Professeur à l'Université de Strasbourg
Directeur du Centre de Géographie Appliquée (1)

RÉSUMÉ

Malgré un climat humide (pluviosité 800-900 mm) et sans saison sèche, la Pampa Deprimida pose de graves problèmes de développement agricole par suite de l'alcalinisation générale des sols. Une étude géomorphologique a été demandée pour fournir des bases en vue de l'aménagement agronomique et de la cartographie des sols. Elle a permis de montrer que l'alcalinisation venait d'un lessivage insuffisant, résultant lui-même d'un modelé trop peu accidenté. Actuellement, des solods se forment à partir de solonetz dont la genèse remonte à la dernière période sèche (régression préflandrienne).

L'étude géomorphologique a mis en évidence des oscillations climatiques importantes (alternance de périodes humides, comme l'actuelle, et de périodes semi-arides) et leurs effets à la fois sur le modelé, la géochimie superficielle et les sols. Des périodes successives de pédogénèse ont été mises en évidence et replacées dans leur contexte géomorphologique. Les traces qu'elles ont laissées sont précisées ainsi que les rapports entre les sols et le modelé, ce qui fournit les bases d'une utilisation efficace de la photo-interprétation pour la cartographie pédologique.

(1) Cet article repose sur le travail effectué en 1968 comme conseiller de l'INTA (Plan Mapa de Suelos), au titre de la FAO. Nous tenons à remercier les Drs D. CAPPANNINI et O. DOMINGUEZ ainsi que de nombreux membres du service pour les échanges de vues enrichissants que nous avons eus avec eux et pour tout ce qu'ils ont fait pour faciliter notre travail et rendre notre séjour plus agréable.

L'article utilise cet exemple particulier pour dégager des notions plus générales portant sur les rapports de la géomorphologie et de la pédologie.

ABSTRACT

In spite of an exclusively wet climate (rainfall 800-900 mm) in the Pampa Deprimida (there is no dry season), there exists serious problems of agricultural development on account of the general alkalisation of the soils. A geomorphologic study was asked to provide bases for the purpose of agronomic management and soil cartography. It showed that the alkalisation was due to an insufficient leaching, the latter being the consequence of a surface, relief which was not hilly enough. Today, solods are formed from solonetz whose genesis dates back to the last dry period (pre-flandrian regression).

The geomorphologic study showed important climatic oscillations (alternation of wet periods, like the present one, and of semi-arid periods), and their effects, at the same time, on the surface relief, the superficial geochemistry and the soils. Successive periods of pedogenesis were shown and replaced in their geomorphological content. The traces which they have left are mentioned as well as the relationship between the soils and the surface relief which provides the bases of an efficient utilization of photo-interpretation for pedology cartography.

The article uses this particular example in order to point out more general notions on the relationship between geomorphology and pedology.

La Pampa Deprimida est formée par la partie la plus basse de la vaste plaine qu'est la Pampa argentine. S'étendant sur environ 75 000 km², la région étudiée borde le cours inférieur du Rio Salado. C'est une plaine extraordinairement unie, où les pentes de 1 % sont tout à fait exceptionnelles. L'élevage dans des pâtures encloses de barbelés y règne de manière à peu près exclusive. Un prêt de la BID a pour objet de l'améliorer. Cela implique un rendement plus élevé des herbages, reposant sur l'introduction de nouvelles plantes fourragères. Or, la région est occupée dans sa

majeure partie par des sols alcalins, généralement des solods. En beaucoup d'endroits, le régime hydrique est, lui aussi, déficient. C'est pourquoi il a été décidé de commencer par le levé semi-détaillé des sols et par leur étude. L'échelle du 1/50 000 a été choisie. Une couverture de photographies aériennes à 1/20 000 a été réalisée et a servi à établir des mosaïques à 1/50 000, qui sont le document de base pour les levés. Il existe aussi une carte topographique, de bonne qualité, à la même échelle, mais elle ne couvre qu'une partie de la Pampa Deprimida.

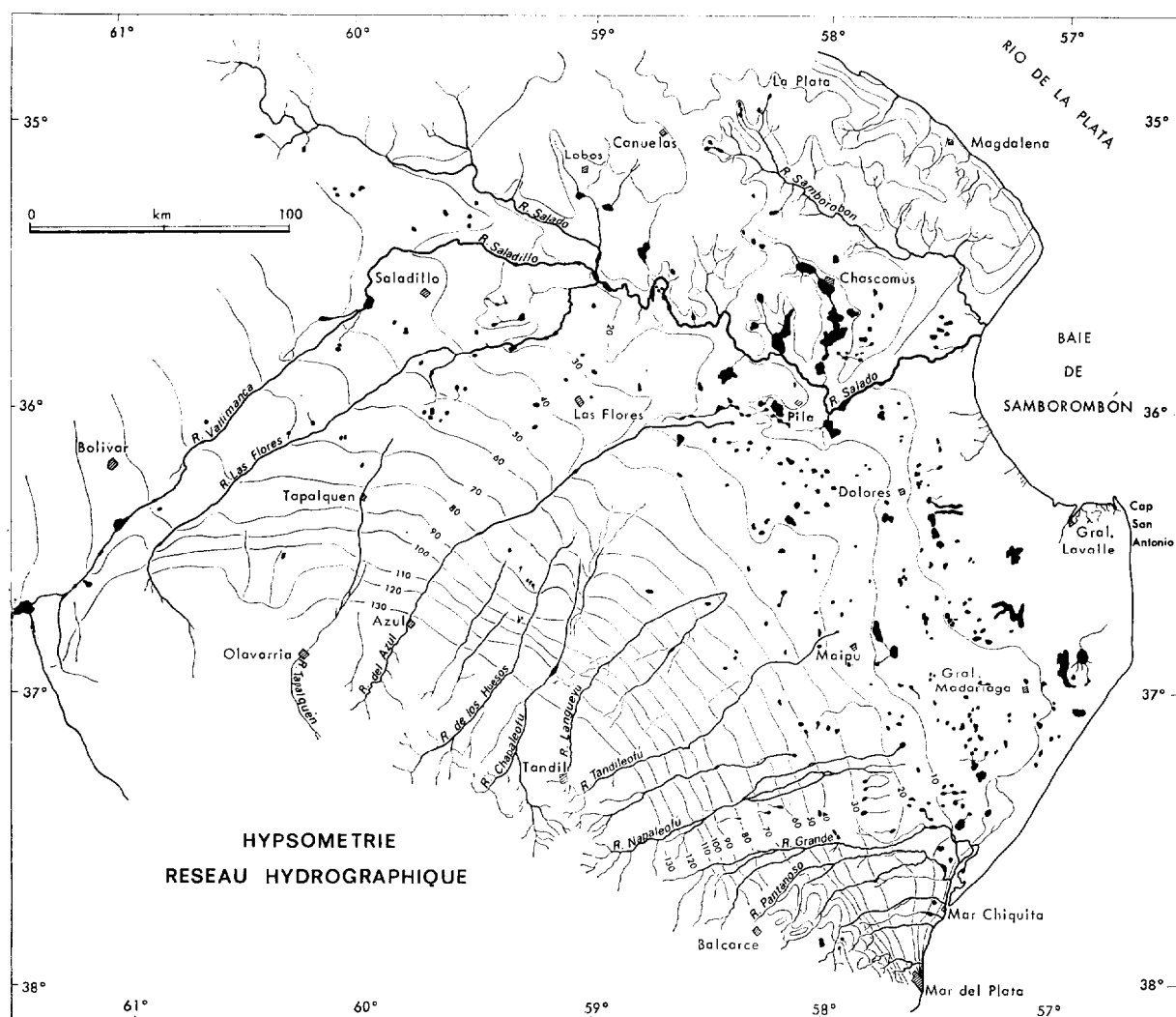


FIG. 1. — Carte générale (hypsométrie et réseau hydrographique).

Le Plan Mapa de Suelos de la Region Pampeana dispose d'une trentaine à peine de spécialistes pour effectuer les levés en deux ans. Sous l'impulsion de son Directeur, le Dr O. DOMINGUEZ, il recourt le plus possible à la photo-interprétation. Convaincu de l'intérêt de la géomorphologie pour un tel travail, il a demandé notre collaboration à la FAO (Division des Terres et Eaux), Notre rôle a consisté, avant la mise en train des levés, en trois tâches :

— Faire une étude géomorphologique de la Pampa Deprimida afin de mieux comprendre les conditions dans lesquelles ses sols se sont formés et ont évolué et de dégager des lignes directrices pour faciliter la cartographie pédologique et pour servir à son aménagement agricole.

— Donner, aux chefs d'équipe responsables du levé, diverses notions leur permettant de mieux utiliser la géomorphologie dans leur travail (aspects généraux des rapports géomorphologie-pédologie, aspects particuliers du problème dans la Pampa Deprimida), sous la forme d'un cours-séminaire intensif et d'une tournée de terrain dans la région.

— Former une petite équipe de géomorphologie, constituée par quatre collaborateurs du Service, licenciés de géologie ou de géographie. Bénéficiant du statut de « section », elle a été rattachée directement au coordinateur général des levés pédologiques. Son travail consiste à préparer des cartes géomorphologiques à 1/50 000 qui sont remises à chaque équipe de levé pour son travail de terrain. Cette section combine la photo-interprétation, prédominante, et les contrôles de terrain. Ses membres visitent de temps à autre les équipes pédologiques pour des échanges de vue sur le terrain.

L'organisation adoptée vise, dans son principe, à permettre une utilisation aussi rationnelle que possible de la géomorphologie pour le levé et l'étude des sols et pour l'aménagement agricole. Elle repose sur un

important travail d'approche scientifique que résume le présent article.

1. LE PARADOXE DES SOLS ALCALINS

Le problème essentiel qui s'est posé à nous a été d'apporter des éléments aidant à comprendre la nature alcaline des sols.

2.1. Les conditions climatiques

La Pampa Deprimida appartient au domaine subtropical. Le climat y est subhumide.

Les températures moyennes annuelles varient de 15°6 sur sa frange septentrionale à 13°6 sur son bord méridional. Les maxima moyens sont compris entre 18°7 à Mar del Plata et 22°4 à Las Flores. Les maxima absolus sont de 38°8 et 42°4 dans les mêmes stations. Les minima moyens sont compris entre 7°9 et 10°2. Des gelées se produisent cependant certaines années, ce qui donne des minima absolus variant de -5°6 à -10°3 selon les stations.

Les précipitations sont assez élevées. Toutes les stations de la Pampa Deprimida enregistrent des moyennes annuelles supérieures à 800 mm, quelques unes dépassent même 900 mm. Le nombre de jours de pluie est généralement supérieur à 90 par an. Il tombe toutefois à 63 à S. Clemente del Tuyu et à 82 à Las Flores. Mais la nébulosité moyenne est assez élevée, supérieure à 4/8 sauf dans ces deux stations où elle est respectivement de 3,6 et de 3,7. L'examen des valeurs mensuelles de précipitations montre l'absence de saison sèche, différence très nette avec les climats méditerranéens du Vieux Monde malgré une certaine parenté des valeurs moyennes. La pluviosité est assez bien répartie, comme le montrent les stations suivantes :

TABLEAU 1

Exemples de régimes pluviométriques

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Déviaton à la normale (mm)
Balcarce	46,5	87,5	112,7	79,6	55,2	56,6	61,8	49,8	73,6	60,9	71,1	80	835,2	37
Dolorès	44,9	69,6	116,3	94,3	83,2	75,7	69	82	85,4	59,3	65,7	74,5	919,5	26
Las Flores	51,7	81	90,4	103,2	77,4	67,4	59,6	76,2	87,9	70,5	80,3	78,1	923,7	15
Mar del Plata ..	64,3	78,8	115,4	74,6	66	62	66,6	53,4	78,3	61,6	74,3	63	858,3	69
Punta Indio (Magdalena) ..	52,9	68,1	93,4	80	83,5	63,6	43,6	64,5	98,1	71,7	74,2	63,9	857,5	100

Il n'y a donc pas de saison sèche. Les mois les plus chauds, ici décembre et janvier (nous sommes dans l'Hémisphère Sud), reçoivent un nombre de millimètres supérieur au double de leur température moyenne en degrés centigrades. De temps à autre, certains agriculteurs avertis notent une diminution de rendement des pâturages qu'ils attribuent à une insuffisance d'eau. Mais elle résulte en très grande partie de l'enracinement très superficiel des Plantes fourragères, qui est lui-même une conséquence du sol.

L'insolation modérée ne renforce pas l'évaporation. Toutefois, le vent est fréquent dans cette plaine où les arbres sont rares. Ses vitesses moyennes annuelles varient entre 7 km/h à Las Flores et 16 à Pinamar, sur le littoral. Dans l'intérieur, on note une légère prédominance des vents du Nord (en décembre et en janvier surtout) et du Sud. Les vents du Nord, plus chauds, peuvent accroître l'évaporation. Notons cependant que les vents desséchants sont ici ceux de l'Ouest et du Nord-Ouest, qui viennent de l'intérieur subaride. Or, ils ne sont pas les plus fréquents.

Bien que certaines périodes plus venteuses et moins arrosées se traduisent par une certaine sécheresse écologique, elles ne sont ni assez accentuées ni assez fréquentes pour expliquer l'alcalinité des sols. Du point de vue climatique, celle-ci est un paradoxe. Il faut chercher ailleurs son explication.

2.2. Les conditions de drainage

Le drainage de la Pampa Deprimida reflète l'influence du relief plus que celle du climat. En effet, le cours d'eau principal, le Rio Salado, est saumâtre, comme son nom l'indique. Des efflorescences salines apparaissent sur les plaines inondables le long de certains de ses affluents. Enfin, de nombreux cours d'eau se perdent vers l'aval en dehors des périodes de crue.

De tels aspects caractérisent habituellement les régions subarides. Ils ne peuvent s'expliquer ici par le climat. Seul le Rio Salado lui doit, en partie, son caractère saumâtre. Il est issu, en effet, des régions sèches de l'Ouest, qui reçoivent 300-400 mm de pluies seulement. Le coefficient d'écoulement y est très faible, de sorte que le Rio Salado entre dans la Pampa Deprimida avec des eaux déjà chargées en sels. Coulant alors dans des régions de plus en plus humides, la teneur en produits dissous devrait décroître. S'il n'en n'est pas ainsi, c'est que l'écoulement est extrêmement lent et qu'il lui arrive très peu d'affluents. La pente du Rio Salado, en effet, est extrêmement faible : la

cote 20 se trouve à plus de 200 km de l'océan... Le cours traverse un certain nombre de cuvettes inondables, anciennes dépressions excavées par la déflation éolienne. La lenteur de l'écoulement permet une évaporation suffisante pour maintenir la salinité.

La Pampa Deprimida est une dépression asymétrique. Au Nord, elle est dominée par une région plus élevée, aux abords immédiats de Buenos Aires et de La Plata, la Pampa Ondulada. Des vallées aux formes extrêmement douces, dont les versants ont généralement des pentes inférieures à 1 %, la dissèquent et descendent vers le Rio Salado. En période de basses eaux, l'écoulement se perd généralement dans des cuvettes de déflation éoliennes et dans des fonds marécageux. Simultanément, les sels se concentrent sous l'effet de l'évaporation. Du côté du Sud, la Pampa Deprimida s'élève plus lentement encore, revêtant l'allure d'un immense plan incliné, dont la pente moyenne croît lentement vers le SW, de 0,5 pour mille vers Las Flores à 1 pour mille vers Azul. Ce plan incliné se termine au pied d'un alignement de collines formé par des pointements du socle, les Sierras Peripampeanas ou Tandilia. Certains sommets atteignent 500 m d'altitude. Les pentes sont fréquemment d'une dizaine de degrés. On trouve là un modelé de dissection plus familier. Un réseau hydrographique draine la Tandilia, qui forme ligne de partage des eaux entre la Pampa Deprimida d'une part et la région littorale entre Mar del Plata et Bahia Blanca de l'autre.

Les cours d'eau issus de la Tandilia n'ont que des bassins d'étendue réduite : ils sont très peu ramifiés et se mettent à couler parallèlement les uns aux autres dès qu'ils sortent des collines. La plupart d'entre eux se perdent sur l'immense glacis de la Pampa Deprimida, qu'ils parcourent sans l'entailler. Seuls les arroyos Vallimanca et Las Flores arrivent tant bien que mal à rejoindre le Rio Salado, non sans perdre beaucoup d'eau et avec des débits infimes. Tous les autres se perdent avant, certains dans des cuvettes de déflation (A° del Azul), d'autres par épuisement progressif et disparition graduelle de leur lit. Ils sont donc incapables d'assurer l'évacuation hors de la région des produits de lessivage.

Cet écoulement languissant aboutissant à un endoréisme prédominant sur le plan incliné et à un aréisme généralisé dans la région côtière entre le bas Rio Salado et les environs de Mar del Plata, n'est pas la conséquence d'un climat trop sec. Il résulte avant tout d'une pente insuffisante, génératrice de pertes excessives par évaporation, malgré l'absence de saison sèche. Il résulte des caractéristiques géomorphologiques de la région.

Autre conséquence de ces caractéristiques : la disparition des lits vers l'aval, l'absence de dissection du plan incliné lui-même, rendent l'évacuation des eaux très difficile. Or, périodiquement, de fortes averses s'abattent sur la Pampa Deprimida. Cinq ou six fois par siècle, en moyenne, des précipitations de 100-200 mm en quelques jours se produisent. Le modelé ne permet pas leur évacuation sous la forme d'un écoulement fluvial. Des nappes d'eau se forment à la surface du sol et s'écoulent très lentement le long de la pente générale, se concentrent dans les dépressions, s'accumulant derrière les obstacles, principalement les remblais de chemin de fer. Il se produit ainsi des inondations en nappes, qui durent plusieurs semaines et causent de gros dégâts. Depuis la fin du siècle dernier, on a essayé de lutter contre elles, notamment par la construction de canaux coûteux. Ne tenant pas compte des particularités de la région, leur objet était de détourner et d'évacuer vers la mer les eaux que l'on considérait comme issues des collines de la Tandilia. Ils sont inefficaces et accroissent souvent les dommages, car la plupart des crues ne viennent pas des Sierras Peripampeanas, peu étendues, mais se forment sur la Pampa Deprimida elle-même où la pente est insuffisante pour permettre l'écoulement de fortes pluies locales.

Les conditions hydrologiques particulières de la Pampa Deprimida rendent difficiles :

— Le drainage des sols, faute de pentes permettant un drainage oblique (sauf dans les collines de la Tandilia), et faute d'infiltration profonde. Du fait du modelé, la nappe phréatique est très près de la surface. La prédominance des matériaux fins fait que la circulation de l'eau y est très lente.

— Le drainage superficiel et l'écoulement fluvial. Le réseau hydrographique est mal hiérarchisé. En période normale, il est endoréique et un quart de la Pampa Deprimida est même aréique. Lors de fortes pluies, il est incapable d'évacuer les eaux qui engendrent des inondations en nappe, avec une migration très lente. Une bonne partie de ces eaux finit par s'évaporer sur place.

De la sorte, une faible partie des sels est mise en mouvement et la plus grande partie de ceux qui migrent n'est pas évacuée hors de la région.

Il faut toutefois remarquer que la solodisation actuellement observable indique une tendance au lessivage. Si l'influence du climat n'était pas contrecarrée par les conditions de drainage, ce lessivage serait plus poussé et ne s'arrêterait pas à la solodisation. Enfin, la solodisation elle-même implique l'existence, à l'origine, de sols salins.

On est ainsi amené à se poser le problème de l'évolution des sols dans le cadre géomorphologique : origine des sels, modalités de leur incorporation dans le profil pédologique, facteurs de la solodisation actuelle.

2. INFLUENCE DU FACTEUR GÉOMORPHOLOGIQUE SUR LES CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES RÉGIONALES

L'étude des conditions de drainage actuelles permet de comprendre pourquoi des éléments très solubles ne sont pas évacués hors de la région, malgré des conditions climatiques favorables. C'est à cause du relief et du modelé, qui jouent dans un sens opposé à ces conditions climatiques et qui l'emportent sur elles. Le problème étant ainsi posé, une intervention de la géomorphologie pour servir de point de départ à la cartographie des sols est justifiée dans le cas particulier que nous avons à traiter. Son objet est de contribuer à la classification des sols et de préciser, à l'échelle retenue, les rapports entre types de sols et modelé. Une base solide est ainsi établie pour la photo-interprétation pédologique. Mais, même pour effectuer ce travail, une connaissance plus poussée de la genèse du modelé et des aspects géomorphologiques des caractéristiques géochimiques régionales est indispensable. Elle doit nous permettre de préciser l'origine des éléments solubles et leurs migrations dans le milieu superficiel au cours du passé géologique récent.

2.1. L'origine des éléments solubles

La Pampa Deprimida est constituée uniquement par des formations quaternaires, ce qui s'explique par son caractère subsidant. Le Mésozoïque n'y est connu que dans les sondages. Il en est de même, au Nord de la Pampa Ondulada, dont l'extrémité est drainée en direction du Rio Salado et d'un petit cours d'eau côtier, le Rio Samborombon. Les affleurements les plus anciens y sont désignés sous le nom de « Pamplano ». Ce n'est que dans les collines de la Tandilia que nous rencontrons des formations préquaternaires. Celles-ci sont complexes et ont fait l'objet de divers travaux des géologues argentins. On y rencontre une couverture paléozoïque, attribuée au Carbonifère, qui s'épaissit de l'Ouest vers l'Est (90-100 m vers

Olavarria, 150 m à Balcarce, 450 m dans le sondage de Punta Mogotes, sur le littoral). Les quartzites sédimentaires et les grès donnent un relief de collines tabulaires, avec des corniches et, parfois, des monoclinaux. Des schistes argileux, des dolomies et des calcaires, beaucoup plus discrets, complètent la série. Cette couverture est basculée et faillée, parfois affectée de plis amples de couverture. Elle repose en discordance sur un socle de Précambien métamorphique (gneiss). Des granites, riches en feldspaths calcosodiques au S de Tandil, sont considérés comme des intrusions lacolitiques par R. PASOTTI.

Certes, ce bâti préquaternaire a pu libérer des ions solubles. Les roches ignées y montrent une altération assez poussée, avec des arènes emballant des boules, surtout dans le granite. Le ruissellement a partiellement déblayé les produits d'altération, concentrant par endroits les boules à la surface du sol. Mais une partie de cette altération est antérieure au dépôt du Pampiano. Les ions Na libérés par elle n'ont pu permettre qu'en partie la salinisation et l'alcalinisation du Pampiano et des formations quaternaires plus récentes. De plus, les affleurements de granite et de gneiss sont d'étendue restreinte. Dès avant la mise en place du Pampiano, ils se limitaient à des collines isolées. Il y a une disproportion évidente entre la masse de sels incorporée aux sols de la Pampa Deprimida et celle qu'a pu libérer le socle cristallin de la Tandilia. Par contre, les calcaires et les dolomites paléozoïques ont fourni la plus grande partie du carbonate qui a permis certains encroûtements dans l'Ouest du piémont collinaire.

La Tandilia n'a joué qu'un rôle d'appoint pour ce qui est de la fourniture des ions solubles responsables de certaines caractéristiques de beaucoup de sols de la Pampa Deprimida. C'est d'ailleurs ce que montre la répartition des sols alcalins : ils sont aussi fréquents et aussi bien développés au pied de la Pampa Ondulada, où il n'y a aucun affleurement préquaternaire, que sur la rive droite du Rio Salado, recevant des eaux de la Tandilia.

La principale source d'ions solubles est dans le Pampiano lui-même. Tous les auteurs s'accordent à placer cet étage local dans le Quaternaire. L'un de ceux qui l'ont le plus étudié, J. FRENGUELLI, le considère comme englobant tout le Quaternaire et se terminant juste avant l'Holocène. Nous avons exposé dans un autre article les multiples raisons qui nous obligent à considérer le Pampiano comme représentant seulement le Quaternaire ancien. Une partie de ces arguments apparaîtra d'ailleurs ici-même plus loin : ce sont les successions complexes et variées d'événements qui se sont produits depuis.

Les travaux de J. FRENGUELLI et de M. TERUGGI ont montré que le Pampiano est formé de limons. Pour J. FRENGUELLI, il s'agirait de loess déposés sous climat sec, reposant sur des limons fluviaux et lacustres accumulés lors d'une phase humide antérieure. Cet auteur a voulu voir, dans toutes les formations quaternaires, une telle séquence. Il a ainsi eu le mérite d'attirer l'attention sur l'existence d'oscillations climatiques dans la Pampa. Mais son point de vue est trop systématique et son désir de corrélérer ces oscillations avec celles des pays tempérés nuit à ses interprétations. En réalité, nulle part, nous n'avons observé dans le Pampiano des faciès de loess typiques. La formation est constituée par des cinérites, en grande partie éoliennes, parfois remaniées par les eaux. Les travaux de M. TERUGGI en ont apporté la preuve minéralogique. Ces cendres proviennent de l'Ouest, des Andes, où nous avons mis en évidence, à la même latitude, un important paroxysme volcanique avec mise en place du même type de matériel pyroclastique, au Quaternaire ancien. En effet, d'une part, la granulométrie moyenne du Pampiano devient plus grossière vers l'Ouest, avec passage des limons aux sables dès les confins de notre région et, d'autre part, les cinérites disparaissent vers l'Est, en Uruguay (1), où, entièrement remaniées, elle deviennent vite impossibles à identifier.

Les importantes pluies de cendres du Quaternaire ancien ont permis l'accumulation du Pampiano sur une grande épaisseur (100 m et plus) dans toute la Pampa Deprimida. La subsidence qui se poursuivait alors a permis à cette région de jouer le rôle de piège à sédiments. Mais, sans les apports éoliens, elle aurait été occupée par un golfe marin, comme au Tertiaire et au Mésozoïque, car les collines de la Tandilia auraient été bien incapables d'alimenter une sédimentation détritique terrestre susceptible de compenser l'affaissement.

Les apports de cinérites fines étaient riches en produits solubles. La faiblesse des remaniements hydriques pendant la période de dépôt n'a pas permis leur évacuation à l'extérieur de la région. C'est pourquoi le Pampiano est la principale source d'ions solubles de la Pampa Deprimida. Là où cette formation, reposant sur des blocs soulevés (Pampa Ondulada et Tandilia) est soumise à la dissection, son lessivage provoque l'apparition d'efflorescences et l'alcalinisation actuelle des dépressions. Les autres sources (couverture paléozoïque et roches ignées de la Tandilia), n'ont joué que le rôle d'appoint. La reprise des éléments solubles postérieurement au dépôt du Pampiano s'est effectuée sous l'influence d'importantes oscillations climatiques. Les mécanismes mis en jeu ont variés suivant les périodes.

2.2. La reprise des ions solubles sous l'influence des oscillations climatiques après le dépôt du Pampiano

L'origine des ions solubles étant précisée, il nous faut maintenant examiner les modalités de leur redistribution dans la région sous l'influence des processus morphogénétiques, commandés par les oscillations climatiques.

Pour J. FRENGUELLI, le Pampiano se terminerait au Tardiglaciaire. Ce point de vue se heurte à l'existence d'une évolution complexe postérieure au Pampiano, pendant laquelle se sont produites des fluctuations climatiques importantes et des oscillations successives du niveau marin. Le rôle de ces péripéties a été capital pour la genèse des sols et l'évolution géochimique de la région.

Dès la fin même de la période d'accumulation du Pampiano, des remaniements importants se produisent. Les eaux remanient les cinérites. Le modelé d'accumulation initial était probablement très doux. Par ailleurs, la végétation, tuée par les pluies de cendres, couvrait probablement mal le sol, peut-être même pas du tout. En dehors des collines de la Tandilia, le ruissellement était instable, prenant la forme d'épandages. Des glacis se sont façonnés, tronquant les légères ondulations des cinérites. Il est possible que de faibles mouvements tectoniques aient continué de se produire alors (léger soulèvement de la Pampa Ondulada, persistance de la subsidence le long du Rio Salado). Quoiqu'il en soit, sur le bord de la Pampa Ondulada, notamment dans le bassin du Rio Samborombon, une légère dissection du Pampiano se produit. Elle donne des vallées très évasées, à peine marquées, retouchées en glacis dont la pente est de l'ordre de 0,2 %. Il en est de même au pied de la Tandilia et entre les collines de celle-ci. C'est alors que le piémont de la Tandilia prend son allure en plan incliné à très faible pente, sur une centaine de kilomètres de large. L'examen des courbes de niveau permet d'y déceler plusieurs éventails coalescents au contact desquels se sont installés la plupart des cours d'eau importants. Vers l'aval, les glacis passent à des épandages caractérisés par l'accumulation de sables fins à l'Ouest (abords de Saladillo et de l'A° Vallimanca), de matériaux argileux et limono-argileux vers Las Flores et Pila.

Il est difficile de préciser les conditions climatiques dans lesquelles s'est fait ce remaniement. La faiblesse de la couverture végétale qu'il implique peut s'expliquer aussi bien par un climat sec que par la destruction de la végétation due aux pluies de cinérites. Il ne semble pas, toutefois, que le climat ait été alors très humide.

En effet, en général, des précipitations de carbonate se sont produites à cette période. A l'Ouest, vers Azul, elles revêtent la forme d'encroûtements en lamelles et en feuillets qui jalonnent les glacis. Il en est de même sur les glacis tronquant le Pampiano de la Pampa Ondulada, où quelques coupes permettent de voir qu'ils atteignent deux mètres d'épaisseur, pénétrant en filonnets dans le Pampiano et cimentant un matériel colluvial. Sur de grandes étendues, notamment vers Dolores, vers General Madariaga, ce sont des poutres colonnaires, atteignant 5-10 cm de diamètre, qui pénètrent sur 1 à 2 m dans la partie supérieure du Pampiano. Seul persiste l'horizon d'accumulation, et encore, partiellement. Vers Dolores, les horizons supérieurs ont été balayés par abrasion lors d'une transgression marine, le Querandinien (« Querandinense » de J. FRENGUELLI). Celle-ci permet de dater cette première phase d'accumulation calcimorphe. Elle semble succéder immédiatement aux remaniements hydriques de cinérites et marquer la fin de la genèse des glacis, ce qui montre une certaine analogie avec l'Afrique du Nord. Le tronquage des horizons calcimorphes par la transgression querandinienne tend à indiquer que le Fini-Pampiano correspond avec la fin d'une régression marine.

Après le Fini-Pampiano, oscillations du niveau marin et fluctuations climatiques peuvent être corrélées par une étude géomorphologique. Voici les grands traits de l'évolution que nous avons pu reconstruire.

Les oscillations climatiques sont caractérisées par l'alternance de périodes sèches durant lesquelles ont régné des conditions semi-arides, et de périodes humides, ressemblant à l'actuelle, peut-être même un peu plus humides. Cela a été mis en évidence par l'étude géomorphologique :

— Lors des périodes sèches, les actions éoliennes ont été importantes. Elles ont permis l'excavation de cuvettes de déflation, d'une profondeur de plusieurs mètres. Certaines sont vastes et mesurent jusqu'à une dizaine de kilomètres de grand axe, mais les dimensions de l'ordre du kilomètre sont les plus fréquentes. Actuellement, ces cuvettes sont occupées par des étangs ou par des marais. Ce sont des formes héritées, en déséquilibre avec les conditions climatiques régnantes, qui tendent à se colmater. Elles sont excavées dans les limons sableux, largement répandus dans la région. En matériel argileux, elles manquent ou sont embryonnaires, à peine discernables. Sur les épandages sableux du Fini-Pampiano, dans la région de l'A° Vallimanca, on rencontre des champs de dunes. Le passage des sables aux limons se traduit par une diminution graduelle d'altitude des dunes, qui passent à de simples

ondulations, et par l'apparition de cuvettes de déflation mieux définies et de plus en plus vastes. Plus fin, le matériel a été emporté à plus grande distance : le remaniement presque sur place engendrant les champs de dunes passe à une déflation prédominante donnant des champs de cuvettes. A ces derniers sont associés des manteaux de loess, recouvrant le Pampiano et confondus avec lui par J. FRENGUELLI. On les trouve principalement sur le bord de la Pampa Ondulada, au-dessus de la « vallée » du Rio Salado, où la déflation a été intense et où les cuvettes sont vastes et nombreuses. Les vents efficaces, lors de ces périodes d'actions éoliennes, venaient de l'W-SW dans la partie occidentale de la Pampa Deprimida. Cela indique un climat sensiblement différent de l'actuel (pas de prédominance des vents d'W-SW de nos jours) et explique la plus grande sécheresse.

Ces cuvettes de déflation sont généralement bordées, sur leur côté sous le vent, par un bourrelet, formé de matériel fortement salé. L'étude de coupes et, surtout les sondages à la tarière, montrent que le sel est réparti sur toute l'épaisseur et s'est déposé en même temps que les matériaux. La similitude des formes et de la dynamique avec les sebkhas est frappante. De plus, ces cuvettes se localisent en grande partie dans des régions d'épandage. On retrouve, sur les photographies aériennes, des chenaux qui venaient s'y perdre. Un climat plus sec et, probablement, beaucoup plus contrasté, provoquait des crues qui n'arrivaient pas à donner un écoulement hiérarchisé, les eaux s'arrêtant à bout de souffle dans des dépressions plus ou moins marquées et s'évaporant sur place, précipitant leurs sels dissous. Des mares salées temporaires se formaient ainsi, milieu défavorable à la végétation qui y était très clairsemée. La déflation s'y exerçait, favorisée par le labourage du sol dû à la croissance des cristaux de sel. Ces cuvettes sont bien des sebkhas. On les trouve au pied des collines de la Tandilia et même dans certaines vallées évasées entre les collines elles-mêmes, au débouché des vallées très douces qui descendent de la Pampa Ondulada et, en chapelet, tout le long du Rio Salado. Des cours d'eau qui, actuellement, rejoignent le Rio Salado, se perdaient alors avant de l'atteindre, comme l'A° Vallimanca, le long duquel on observe d'importantes cuvettes au pied même des collines, vers Bolivar, puis dans le champ de dunes lui-même, vers Saladillo. Les cuvettes sont particulièrement étendues et nombreuses dans la région située entre Saladillo, Lobos, Chascomus et Dolores. La petite vallée très évasée où se trouve Chascomus est entièrement transformée en un chapelet de lacs assez grands, occupant d'anciennes cuvettes de déflation. La répartition de celles-ci et la direction des

vents efficaces explique la couverture loessique de l'extrémité orientale de la Pampa Ondulada, à l'Est de Cañuelas.

D'autres cuvettes, enfin, jalonnent les abords des anciens littoraux, du Rio Salado à Mar Chiquita. Elles se localisent sur les mêmes types granulométriques de matériaux que celles de l'intérieur. Généralement, on ne trouve pas trace de cours d'eau y aboutissant. Le sel qui a favorisé la déflation ne provenait pas de l'intérieur : il était d'origine locale, fourni par un ruissellement sporadique sur les dépôts lagunaires. Ces cuvettes se sont formées dans les dépressions barrées par des cordons littoraux, dans d'anciens chenaux de marée, dans les parties basses d'anciennes lagunes. On observe de nos jours quelques dépressions salées le long du littoral : elles reçoivent de l'eau de mer lorsque de forts vents poussent l'océan à la côte et provoquent une élévation de 1 m environ de son niveau. Cela est beaucoup sur un littoral très plat où l'amplitude des marées est faible (moins de 1 m). Mais les formes actuelles sont mal développées, le climat étant trop humide et favorisant l'évacuation du sel vers les chenaux de marée tout proches.

Les phénomènes éoliens s'avèrent d'une grande importance pour la redistribution et la concentration des sels dans la Pampa Deprimida. L'endoréisme existant actuellement et s'expliquant par la topographie a été renforcé par le climat lors des périodes sèches. La Pampa Deprimida a reçu alors des quantités appréciables de produits dissous provenant des régions voisines plus élevées, Pampa Ondulada et Tandilia. Il y a là un fait, mis en évidence par la géomorphologie, qui revêt une grande importance tant pour la compréhension des sols que pour l'aménagement agronomique.

Si les phénomènes éoliens ont eu de graves conséquences, ils ne sont cependant pas les seuls à s'être produits pendant les périodes sèches. Comme nous l'avons indiqué incidemment, la sécheresse du climat n'était pas suffisante pour éliminer les écoulements hydriques. La région n'était pas hyperaride, loin de là. Le ruissellement était important, beaucoup plus que de nos jours, à cause justement, du caractère semi-aride du climat. Il a façonné à nouveau des glaciaires, retouché ceux du Fini-Pampiano dans certains secteurs. Des accumulations ont été édifiées dans certaines zones d'épandage, notamment vers Las Flores et Pila. Les sels y sont abondants et ont favorisé la déflation. Mais on y trouve aussi des encroûtements calcaires, bien développés à l'Ouest, là où calcaires et dolomies sont assez étendus dans les collines de la Tandilia. Ces encroûtements se sont développés principalement vers la fin de la période de façonnement des glaciaires,

lorsque les crues ne remuaient plus guère le matériel détritique.

— Lors des périodes humides, le tableau de la morphogénèse est tout différent et ressemble à celui des phénomènes actuels. La couverture végétale devait être assez dense pour réduire à très peu de chose les actions mécaniques. Remarquons que, de nos jours, la végétation naturelle est une prairie très dense, protégeant efficacement le sol. Il est permis de parler de conditions biostatiques. Nulle trace d'actions éoliennes. Pratiquement pas de ruissellement. Les eaux s'infiltrant et alimentent des nappes généralement très superficielles. C'est pourquoi une période sans pluies, provoquant l'abaissement du toit de ces nappes, est ressentie par la végétation. Mais le climat ne permet guère une évaporation suffisante pour provoquer la précipitation des produits dissous.

La tendance est à la pédogénèse et au lessivage des ions solubles contenus dans les sols et les formations superficielles. On note, en effet, que les cours d'eau, là où leur débit n'est pas encore trop diminué par l'évaporation, s'incisent dans les nappes alluviales. L'entaille atteint plusieurs mètres au pied des collines de la Tandilia. Si les conditions actuelles persistent 20 ou 30 000 ans encore, un certain lessivage pourra avoir lieu. Or, ce sont des durées de cet ordre, pour le moins, qu'on admet pour les phases majeures des oscillations climatiques du Quaternaire récent.

Cette remarque aide à comprendre les traces importantes de lessivage qu'a laissées une des périodes du Quaternaire supérieur, le Platéen (Platense des auteurs argentins). On lui rapporte des formations lacustres ou palustres dans des cuvettes de déflation, caractérisées par des faunules de diatomées et diverses coquilles, des nappes alluviales, transformées habituellement en terrasses, constituées par des limons de débordement riches en matière organique et présentant des traces de brassage biotique. Dans les régions disséquées du haut-piémont de la Tandilia, vers Mar del Plata, par exemple, nous avons pu dater du Platéen des phénomènes de remise en marche du carbonate des croûtes calcaires, aboutissant à la formation de micro-dolines, fossilisées par des dépôts plus récents. Les conditions ont donc été favorables à la prise en charge d'ions solubles et à leur redistribution dans le paysage. Cela a d'importantes conséquences au plan pédologique.

Comment ces oscillations climatiques se répartissent-elles dans le temps ? Tel est le point qu'il nous reste à examiner.

L'étude géomorphologique permet l'établissement de corrélations entre les actions terrestres, éoliennes et hydriques, et les phénomènes littoraux. De plus, les coquilles, bien qu'abondantes, ne fournissent guère de données stratigraphiques faute de renouvellement des faunes. Voici les résultats les plus importants que nous avons obtenus :

— Les périodes de déflation éolienne intense sont des périodes de régression marine. En effet, dans la région littorale, ces cuvettes excavent souvent des dépôts marins. Certaines descendent en dessous de la cote 0. Dans quelques cas, nous avons trouvé des formations littorales postérieures dans des cuvettes de déflation, ce qui implique une transgression. Corrélativement, les périodes humides correspondent à des niveaux marins élevés, comme c'est le cas actuellement. Les accumulations de plaine inondable du Rio Salado, appartenant au Platéen, passent à des cordons littoraux coquilliers qui représentent la cote maximum d'une transgression. Les dernières manifestations de climat semi-aride se placent au cours de la régression préflandrienne. Elles correspondent donc au Wurm (Wisconsin, Vistule). L'existence, à cette période, d'une calotte glaciaire étendue sur les Andes méridionales modifiait probablement la circulation atmosphérique. Elle favorisait vraisemblablement la formation de situations anticycloniques, ce qui expliquerait les vents de l'W et du SW responsables du modelé éolien. Lors de la période froide précédente (Riss, Illinois, Saale), l'extension plus grande de la glaciation renforçait le système. On comprend dès lors pourquoi l'avant-dernière période sèche a été plus rigoureuse que la dernière.

— La succession des générations de formes est la suivante. Après le Fini-Pampiano, le Quérandinien (Querandinense) des auteurs argentins est caractérisé par une transgression marine qui a atteint la cote +10 m. Il est possible que ce niveau soit légèrement déformé par des mouvements tectoniques, mais nous n'avons pu l'établir avec certitude car les cartes topographiques détaillées ne sont pas encore levées dans la plus grande partie de la zone littorale. De toutes manières, une cote aussi élevée, de surcroît dans une région subsidente jusqu'alors, interdit de considérer, comme le faisait J. FRENGUELLI, le Quérandinien comme une subdivision de l'Holocène. Au Quérandinien se sont mises en place des nappes alluviales (faciès dit « Lujanense ») indiquant une couverture végétale importante (nombreuses coquilles d'espèces palustres, matière organique, traces de racines) tandis que les régions plus élevées étaient soumises à la dissection. Les cordons littoraux présentent quelques

différences dans la faune malacologique avec ceux des périodes postérieures. Leur faciès, aussi, est différent, souvent consolidé en lumachelle, mêlé de sable dans certains secteurs. Une régression marine (post-quérandinién), accompagnée d'un climat semi-aride, vient ensuite. Une nouvelle transgression se produit : celle du Platéen, qui ne dépasse pas la cote de +5-6 m. Elle correspond aussi à un climat humide, avec mise en place de matériaux de plaine inondable, inondation des cuvettes de déflation du Post-Quérandinién, lessivage sur les interfluvés, notamment aux dépens des encroûtements calcaires. Les cordons littoraux platéens sont formés presque uniquement de coquilles, avec peu de sable. Ils ne sont pas consolidés, sauf de petits amas locaux de quelques m³. La régression post-platéenne est, à nouveau, une période sèche pendant laquelle s'excave une seconde génération de cuvettes de déflation. Nous avons trouvé des cuvettes creusées dans le Platéen et certaines cuvettes post-quérandiniennes partiellement fossilisées par du Platéen et excavées de nouveau. Le climat redevient humide vers la fin de la transgression flandrienne, qui a atteint une cote de +1 m environ (cordons littoraux, petites falaises mortes, vastes dépôts de vasières), correspondant au Dunkerquien. Une telle évolution, scandée par trois transgressions et autant de régressions ne peut s'être produite pendant le seul Holocène, comme le pensait J. FRENGUELLI en s'appuyant sur la faible évolution des faunes, argument peu valable dans une région où l'endémisme est très prononcé.

— Les différentes périodes semi-arides et humides que nous avons mises en évidence, bien que présentant entre elles des points communs importants, diffèrent cependant les unes des autres par l'intensité de leurs effets. Cela peut résulter, pour une part, de leur inégale durée, mais nous ne pensons pas que ce facteur suffise à tout expliquer. Nous admettons, entre les différentes périodes sèches, des nuances climatiques. Le Post-Quérandinién a eu des effets beaucoup plus accusés que le Post-Platéen. Les actions éoliennes y furent bien plus intenses. La déflation a creusé davantage de cuvettes et, en général, des cuvettes plus étendues. Le volume de poussières mis en suspension a été bien plus grand, ce qui a permis le dépôt de véritables couches de loess, entre les collines de la Tandilia, et, surtout, sur la Pampa Ondulada. Nous n'avons guère rencontré de loess post-platéen dans la région étudiée. Enfin, les actions éoliennes ont façonné les sables de la région de Saladillo en véritables champs de dunes, avec des formes vigoureuses, capables d'étonner celui dont le regard s'est accoutumé à la platitude de la Pampa. Les effets de la période humide Platéenne sont nettement plus accusés que ceux de l'Holocène. Peut-

être le climat était-il alors plus arrosé ? Mais il est difficile de répondre car, de toutes façons, la durée a été beaucoup plus longue (40 à 50 000 ans, peut-être même un peu plus, contre 10 000 pour l'Holocène). Le problème se pose dans les mêmes termes pour le Lujanense (Quérandinién). Mais les conséquences pédologiques en sont moindres car l'intensité des actions subarides au Post-Quérandinién n'a guère laissé persister de sols remontant à cette époque.

L'évolution géomorphologique ainsi reconstruite a servi de base pour la cartographie géomorphologique et permis de définir le cadre de la pédogénèse et morphogénèse, ou, mieux, des pédogénèses successives. La nature des rapports entre pédogénèse et morphogénèse ayant été définie, il a été possible d'utiliser aussi rationnellement que possible la géomorphologie pour l'étude pédologique, notamment en recourant à la photo-interprétation.

3. CONSÉQUENCES SUR LES SOLS

La platitude de la région, conséquence de ses caractères structuraux, limite les activités morphogénétiques mues par la pesanteur. Elle entrave l'accroissement et l'approfondissement du lessivage pédologique, permettant la persistance d'héritages géochimiques. Elle diminue aussi le décapage mécanique, l'ablation la plus importante ayant été l'œuvre, au Quaternaire supérieur, des actions éoliennes. Cela aussi favorise les héritages. Une partie importante des sols a été élaborée au cours du passé et a été influencée par des conditions climatiques différentes de celles qui règnent actuellement, différentes aussi de celles qui étaient réalisées lors de leur propre genèse. Pédologie et géomorphologie offrent des possibilités de recoupement et s'éclairent mutuellement.

Les conséquences de la morphogénèse sur la pédogénèse sont de type varié dans la Pampa Deprimida. Le Platéen, par exemple, a laissé une empreinte vigoureuse à beaucoup de sols, notamment sous la forme d'horizons B texturaux bien développés. Les périodes sèches ont permis une redistribution éolienne des sels et, dans bien des cas, la salinisation de restes de sols hérités de périodes antérieures (Platéen notamment). Elles ont aussi permis un décapage des horizons supérieurs de ces sols, principalement de l'horizon A plus meuble, tandis que la déflation butait sur les horizons B calcimorphes ou texturaux. La variété des cas est considérable. Nous allons en dégager les plus intéressants au point de vue méthodologique.

3.1. Les types de précipitation de calcaire :

Les horizons d'accumulation carbonatés sont assez fréquents dans la Pampa Deprimida et appartiennent à divers types. L'étude géomorphologique permet de préciser l'origine du calcaire qui les forme, leur âge et les conditions d'accumulation. Ces facteurs rendent compte de leurs aspects.

a Origine du calcaire

Le carbonate de calcium provient de deux sources principales :

— Les roches anciennes de la Tandilia, calcaires et dolomies paléozoïques d'une part, feldspaths calcosodiques des granites et des gneiss de l'autre.

— Les cinérites du Pampiano.

A côté du carbonate libéré par ces formations, que nous désignerons par l'expression de « carbonate primaire », il y a beaucoup de carbonate remanié, redistribué par les processus morphogénétiques. Les deux principales formes en sont :

— Le carbonate incorporé dans les formations littorales, principalement dans les cordons coquilliers du Platéen, restés meubles, et qui a été remanié en général par le vent.

— Le carbonate transporté par les eaux courantes et précipité à la surface des épandages et dans les cuvettes inondables. Une partie du carbonate apporté dans les cuvettes a été assimilé par des organismes et transformé en coquilles. La déflation qui s'est exercée dans les cuvettes pendant les périodes sèches, principalement celle du Post-Platéen, a permis la redistribution éolienne du calcaire pulvérulent. Celui-ci est abondant dans certains bourrelets marginaux (jusqu'à 30 % du matériel).

Les conditions morphogénétiques qui ont entravé l'exportation des ions plus solubles (tendance à l'endoréisme, existence de périodes sèches) ont également influé sur le cycle géochimique du calcaire. Une grande partie de ses migrations n'ont pas été au-delà des limites de la région. L'effet de piégeage dans la zone de subsidence a joué pour lui aussi.

b Age et conditions d'accumulation

Les mécanismes de migration du calcaire ont changé suivant les périodes, en fonction des systèmes morphogénétiques, commandés par le climat, qu'elles ont connu.

— Sous climat humide, dans les régions suffisamment disséquées, un lessivage appréciable du calcaire a eu lieu. Il a été susceptible, dans certains cas, de remettre en marche du carbonate déjà précipité. Tel est le cas, dans la région de Mar del Plata, au Platéen. Diverses coupes nous ont montré des croûtes calcaires en dalles, atteignant 1 m d'épaisseur environ, partiellement démantelées par des micro-phénomènes karstiques : entonnoirs, petites dolines de tassement. Les dimensions de ces formes sont de l'ordre de quelques décimètres. Les micro-dolines atteignent 20 à 30 cm de profondeur et un mètre de diamètre. Leur datation a été possible, car certaines d'entre elles affectent un encroûtement formé à la base d'un loess reposant sur du Quérandinien et sont fossilisées par des limons éoliens datant de la dernière période sèche et venant reposer sur le Platéen. C'est pourquoi nous les avons attribuées au Platéen qui a été assez humide pour permettre, par ailleurs, la formation d'horizons B texturaux épais de 50 cm dans des brunizems.

Le Platéen a permis, en conditions de drainage suffisant, la formation d'un horizon B calcimorphe au-dessous de l'horizon B textural des brunizems. Dans le matériau originel, apparaissent alors des concrétions carbonatées pouvant s'échelonner sur 50-80 cm d'épaisseur. Elles se disposent généralement en veines et en colonnes, épousant d'anciennes racines ou fentes de dessiccation. Elles résistent bien à la main mais se rompent facilement au marteau. On remarque souvent, dans leur partie centrale, des traces d'hydromorphisme, antérieures à la précipitation du calcaire. On observe aussi des fentes de retrait, qui disparaissent vers l'extérieur. Celui-ci est formé par une couche de carbonate plus pur et plus résistant. Parfois, on observe même que ce cortex est formé de deux couches successives, indiquant deux périodes de précipitation.

On peut donc retrouver dans ces horizons calcimorphes les grandes étapes récentes de la morphogénèse, le lien étant fourni par le dénominateur climatique commun. Il semble que la corrélation puisse se faire de la manière suivante :

— Au Platéen le drainage des sols a d'abord été assez mauvais, d'où les traces d'hydromorphisme conservées dans les concrétions. Cela ne résulte pas nécessairement d'un climat plus humide. En effet, le Platéen est une période d'incision des cours d'eau. Au début, ceux-ci étaient donc moins entaillés et le drainage moins bien assuré.

— Le drainage étant amélioré, le reste du Platéen a été caractérisé par une tendance nette au lessivage. Elle a engendré la corrosion des encroûtements signalée ci-dessus et la formation d'horizons B calci-

morphes. L'apparition de périodes de sécheresse saisonnières a pu intervenir. La disposition des concrétions calcaires le long de fentes de dessiccation affectant l'horizon B textural semble l'indiquer. Il ne serait pas déraisonnable de penser que la genèse de l'horizon B calcimorphe, que les observations de terrain montrent, en partie, au moins postérieur à l'horizon B textural, correspond à une période de transition climatique amorçant le passage à la période sèche post-platéenne.

— La seconde couche du cortex des concrétions indique une reprise de la précipitation (donc du lessivage) du carbonate après une interruption. On peut la placer à l'Holocène. En effet, dans les marnes platéennes du littoral, on observe un horizon B calcimorphe datant de cette période. Il est peu profond (20 cm environ), à cause du mauvais drainage. Les concrétions sont petites (2-4 cm de diamètre), globuleuses, médiocrement consolidées et monogéniques. On peut faire l'hypothèse d'un âge post-platéen pour la formation des fentes de retrait à l'intérieur des concrétions platéennes.

Avec G. SERET, nous avons pu mettre en évidence des phases successives de précipitation de carbonate, caractérisées par des types de cristallisation différents, dans des encroûtements quaternaires du Sud de la France.

— Un autre type d'accumulation du calcaire est offert par les croûtes.

Les croûtes sont particulièrement résistantes à la surface des épandages situés au pied des collines de calcaires paléozoïques, dans la région d'Azul et Olavarria. Elles se sont formées dans les matériaux limono-sableux, aptes à une dessiccation assez rapide. Dans les argiles, on trouve seulement des concrétions qui restent individualisées, même lorsqu'elles sont très nombreuses et concentrées dans un horizon peu épais (une dizaine de centimètres). Deux périodes ont été particulièrement propices à l'encroûtement : le Fini-Pampiano et le Post-Quérandinien.

Sur les épandages post-quérandiniens d'Azul-Olavarria, les croûtes présentent l'aspect de dalles résistantes, parfois difficiles à ébrécher au marteau, d'une épaisseur de 10-20 cm. Elles semblent s'être formées par évaporation de l'eau après les crues inondant la région, probablement au toit d'une nappe phréatique temporaire. Plombant la partie supérieure du matériel mis en place par les épandages, leur formation correspond vraisemblablement à une période de transition climatique, avec des écoulements plus abondants et plus fréquents et une couverture végétale plus dense, entravant les actions mécaniques. Elles

marqueraient le passage des périodes sèches aux périodes humides.

On observe aussi des encroûtements dans les loess, principalement dans les régions disséquées de la Tandilia. Ils affectent une couche de 1-1,5 m d'épaisseur et sont formés de petits lits de 1-2 cm, à la surface ondulée et mamelonnée, bien indurés. La base de chaque lit passe graduellement à du carbonate pulvérulent, crayeux, puis à une précipitation diffuse. De telles croûtes se placent parfois au pied de versants. Le carbonate y semble avoir été apporté par ruissellement et s'être précipité par évaporation dans le sol de l'eau infiltrée. L'induration des feuillets résulte d'une recristallisation apparemment due à des alternances d'humidification et de dessiccation. Elle manque d'ailleurs dans certains sites peu propices à de telles alternances, comme les parties hautes de versants et les sommets de croupes.

— Les accumulations de carbonate pulvérulent sont plus fréquentes dans la région littorale au N de Mar del Plata. On en trouve notamment dans certains bourrelets éoliens bordant des cuvettes de déflation et dans les loess. L'abondance du calcaire vient du matériel affecté par la déflation : il s'agit souvent de formations marines ou lagunaires.

Parfois, des esquisses de croûtes lamellaires apparaissent dans le matériel pulvérulent riche en calcaire. Elles se sont formées en période humide, notamment au Platéen. Les restes d'un brunizem les surmontent généralement. Elles résultent d'une précipitation de calcaire lessivé sous l'effet de la pédogénèse et d'une recristallisation partielle sur place.

Les types de précipitation du calcaire sont donc variés et étroitement liés à l'évolution géomorphologique. Suivant les mécanismes mis en jeu, leur genèse se place à des périodes différentes. Le Platéen humide, moindrement l'Holocène, ont été favorables à des concrétionnements pédogénétiques. Les périodes sèches, à des remaniements éoliens de poussière calcaire. Les croûtes résistantes des glacis, formées de calcaire allogène, se sont formées lors de périodes de changement de climat. De ce fait, elles offrent une certaine ressemblance avec les croûtes nord-africaines.

3.2. Les sols polymorphes dus à des pédogénèses et morphogénèses successives

Les sols polymorphes sont extrêmement fréquents dans la Pampa Deprimida. Ils occupent la plus grande partie de sa surface.

Leur genèse est étroitement fonction des oscillations climatiques. Celles-ci ont commandé directement les types successifs de pédogénèse et, d'autre part, les actions morphogénétiques qui ont, de leur côté, partiellement détruit les sols pré-existants et apporté des matériaux nouveaux.

D'une manière générale, il reste peu de chose des sols antérieurs au Platéen, car ils ont été détruits lors de l'importante période sèche du Post-Quérandinién. Ces reliques se limitent à :

— Quelques lambeaux de sols fossilisés dans des sites favorables, observables seulement dans certaines carrières de la Tandilia.

— Des restes d'horizons calcimorphes dans le Pampiano, sous la forme de concrétions en veines subverticales. Ces horizons, dans certains cas, sont devenus le matériel parental de sols plus récents, ce qui est à l'origine de certaines méprises : on a interprété ces concrétions comme le résultat d'une solodisation avancée...

— Des croûtes calcaires en dalles, résistantes, sur des épandages ou au pied de versants. Elles ont subi, ensuite, une corrosion plus ou moins poussée, notamment au Platéen.

Par contre, les restes de sols du Platéen sont importants. Cela s'explique par une série de raisons convergentes :

— Le Platéen a duré assez longtemps et a été assez humide pour permettre une pédogénèse vigoureuse. Les sols étaient généralement épais. Les horizons B texturaux de brunizems ont encore souvent 0,5 m d'épaisseur, malgré un certain décapage superficiel. Période d'incision des talwegs, le Platéen a connu un drainage relativement bon, qui s'est amélioré graduellement au cours même de la période. Les sols les plus fréquents du Platéen étaient des brunizems, suffisamment lessivés en surface pour être caractérisés par un horizon B textural épais et très argileux. Il s'y ajoute souvent un horizon B calcimorphe, dont la mise en place a été guidée par des fentes de dessiccation. Il est généralement postérieur à l'horizon B textural.

— La pédogénèse platéenne s'est exercée souvent dans un matériel favorable. En effet, lors de la période sèche post-quérandiniénne, les actions éoliennes ont permis le dépôt de nappes importantes de loess, enrichi en carbonate par les eaux s'évaporant sur les aires de déflation. Les loess post-quérandiniens sont plus meubles, plus perméables, souvent plus riches en

carbonate finement divisé que le Pampiano cinéritique remanié par les eaux.

— Le fort développement des horizons B, surtout texturaux, a favorisé la conservation partielle des sols platéens. La période sèche post-platéenne a été moins efficace, au point de vue morphogénétique, que la précédente. Par ailleurs, les horizons B texturaux sont mécaniquement résistants, surtout lorsqu'ils sont durcis par la sécheresse, ce qui devait être fréquent étant donné les conditions climatiques. Le plus souvent, ils ont bloqué l'ablation, que celle-ci résulte du ruissellement diffus ou de la déflation éolienne. Ils ont été dégagés à la manière d'une surface structurale, mais faiblement entamés. Par contre, les horizons sous-jacents, plus meubles, ont généralement disparu.

La période sèche post-platéenne a donc partiellement détruit les sols platéens, mettant le plus souvent à nu l'horizon B mécaniquement résistant. Mais son rôle ne s'est pas borné à cela. La déflation s'exerçant dans les zones d'épandage endoréiques a repris les matériaux solubles qui y étaient précipités sous l'effet de l'évaporation succédant aux inondations. Mélangés à une fraction détritique fine, parfois à de la matière organique mise en place sous conditions palustres au Platéen, ils ont été accumulés sous la forme de bourrelets au bord de certaines cuvettes et, surtout, sous celle d'un saupoudrage diffus et généralisé affectant des surfaces étendues. Souvent, en un même point, il y a eu d'abord déflation et mise à nu de l'horizon B du sol platéen, puis accumulation de matériel nouveau de nature différente, riche en éléments solubles. Au cours même de la période sèche post-platéenne, certains ions particulièrement mobiles ont migré en profondeur, jusque dans le reste d'horizon B textural, difficile à traverser. C'est notamment le cas des sels. Ils ont alors salinisé cet horizon et modifié ses caractères. On peut évoquer le concept géologique de *métamorphisme*.

Au cours de l'Holocène, ces migrations se sont amplifiées, la tendance climatique étant au lessivage. Mais, par suite des caractères mêmes du modelé, ce lessivage est rendu difficile, entravé. Il n'est que partiel. Une nouvelle transformation des sols se produit : les solonetz se solodisent. Les sols alcalins se développent au détriment des sols salins. Bien entendu, cette nouvelle transformation est plus ou moins rapide suivant les sites géomorphologiques. Des solonetz persistent dans les cuvettes mal drainées, où, de surcroît, se produisent parfois encore des apports obliques de sels. Les bourrelets marginaux des cuvettes de déflation, quoique le matériel originel soit très riche en sels, se solodisent

mieux car étant en relief, offrant des pentes relativement fortes (quelques degrés), ils sont beaucoup mieux drainés. La pédogénèse actuelle s'exerce depuis trop peu de temps, dans des conditions de drainage trop

insuffisantes, pour avoir beaucoup modifié les sols antérieurs. Les héritages sont nombreux. Le facteur géomorphologique est prépondérant dans leur explication.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 23 juin 1972.

RÉFÉRENCES

- CAPPANNINI (D.), 1952. — *Geodafologia del curso inferior del Rio Salado de la Provincia de Buenos Aires*. IDIA n° 50/51, 56 p.
- FRENGUELLI (J.), 1955. — *Loess y limos pampeanos*. Fac. Ciencias y Museo de la Plata, Ser. Téc. y Di. dact., n° 8, 88 p., (réimpression d'une publication de 1925).
- PASOTTI (P.), 1957. — *Los domos lacolíticos de Tandil*, Provincia de Buenos Aires. Inst. Fisiogr. y Geol., Univ. del Litoral. Publ., XLVII, 71 p.
- TERUGGI (M.), 1957. — The nature and origin of Argentine loess. *J. sediment. Petrol.*, XXVII, n° 3 : 322-332.
- TRICART (J.), 1969-1970. — Actions éoliennes dans la Pampa Deprimida. *Rev. Géomorphol. dynam.*, XIX, n° 4 : 178-189.
- TRICART (J.), 1971. — Oscillations du niveau marin et changements climatiques dans la Pampa Deprimida (Pampa argentine). *Bull. A.F.E.Q.* (sous presse).

FIGURES 2 à 7 :



FIG. 2. — Coupe dans un bord de cuvette de déflation et dans son bourrelet, 10 km N de Villa Roch.

Cette cuvette a été excavée lors de la dernière période sèche dans un ancien chenal de marée du Platéen, bordé par le Pampiano.

- a) Ancienne cuvette, actuellement colmatée en partie et occupée par un marais. Sol hydromorphes holocènes.
- b) Cordon éolien construit lors de la dernière période sèche (régression préflandrienne). Limon argileux mêlé de sel, évoluant aussitôt après dépôt en solonetz. Pas de différenciation d'horizons. Actuellement en cours de solodisation sur environ 0,4 m.
- c) Formations lagunaires platéennes, marneuses. Sol à horizon B calcimorphe (petites concrétions à 0,2 m de profondeur environ). Ce platéen repose en discordance sur le Pampiano et se prolonge par une surface d'abrasion sous cordon (b).
- d) Pampiano, cinéritique, assez compact. Restes d'horizon d'accumulation calcimorphe, à veines calcaires et poupées columnaires. Le trait noir épais indique un reste d'horizon B textural platéen recoupant l'accumulation calcimorphe.

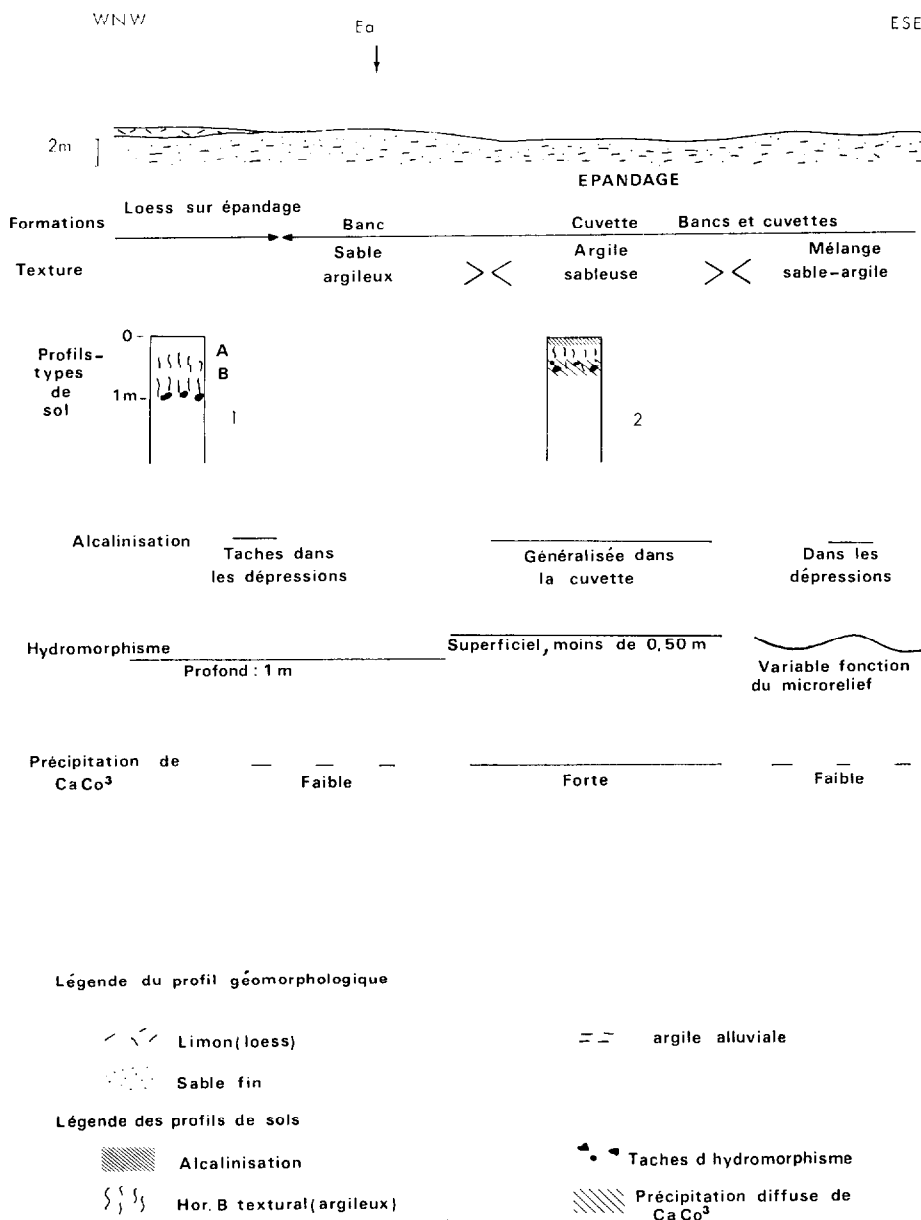


FIG. 3. — Présentation géomorphologique d'une mosaïque de sols sur un ancien épandage (Lujanense = Quérandinién), Estancia la Angélica, NE d'Azul.

Cet épandage remanie du Pampiano, à faible distance des collines de la Tandilia (10 km environ). On y trouve, malgré une topographie très unie, des bancs plus sableux alternant avec des cuvettes plus argileuses. Sa surface a été remaniée par le vent lors de la période sèche post-quérandiniénne. De petits îlots de loess se sont alors déposés par endroits. L'absence de dissection entretient une nappe phréatique très superficielle.

Trois tendances pédogénétiques s'exercent : hydromorphe, calcimorphe et alcaline. Elles ont varié en importance suivant les oscillations climatiques et ont été influencées par le matériel parental et le microrelief. Le schéma a pour objet d'exposer de quelle manière.

En haut, un profil montre la disposition du matériel. Immédiatement en-dessous, sont indiquées les unités géomorphiques.

En-dessous, schéma de deux profils pédologiques (fosses). Les trois tendances pédogénétiques sont ensuite examinées, les traits indiquant pour chacune d'elles son extension le long du profil du haut du schéma.

La période humide du Platéen a été caractérisée par la tendance à la formation d'un brunizem. Elle a pu s'exprimer particulièrement bien sur l'îlot de loess de l'extrémité WNW du profil. L'altitude un peu supérieure a facilité le drainage et permis la formation d'un horizon B textural. Néanmoins, vers 1 m de profondeur apparaissent des traces d'hydromorphisme. Sur l'épandage, le sol platéen était beaucoup moins épais (profil II), l'hydromorphisme est proche de la surface et coïncide avec une précipitation diffuse de carbonate au toit de la nappe phréatique.

Pendant la période sèche post-platéenne, a régné une tendance à la précipitation de sels, qui affecte différemment les micro-unités géomorphiques en fonction des conditions de drainage. Sur l'îlot loessique, apparaissent seulement des plages d'alcalinisation dans les dépressions. Sur l'épandage, par contre, l'alcalinisation est généralisée et plus forte dans les cuvettes. Elle affecte davantage les grandes cuvettes. Elle est faible sur les bancs intermédiaires.

Ce schéma a été établi grâce à la collaboration de MM. Romat, propriétaire de l'Estancia, Ingénieur Agronome, que nous remercions pour sa charmante hospitalité, et J.-C. Salazar Lea Plaza, licencié de géologie, du pl¹ Mapa de Suelos.

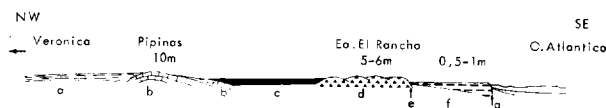


FIG. 4. — Formations marines quaternaires sur le bord NW de la Baie de Samborombon. L'échelle horizontale n'a pu être respectée.

- a) Formations lagunaires quérandiniennes : marnes à concrétions calcaires
- b) Cordon littoral quérandinienn, calcaire coquiller
- b') Placage de loess sur le cordon quérandinienn
- c) Formations lagunaires platéennes : argile grise
- d) Cordons littoraux platéens : coquilles presque pures, un peu de sable
- e) Petite falaise morte dunkerquienne entaillée dans les cordons platéens
- f) Vasière pré-littoral (wadden) dunkerquienne devenue maintenant un schorre
- g) Littoral actuel : microfalaie de tempête et petite plage sableuse.

Ce profil schématique met en évidence les trois transgressions post-pampiano et l'accumulation du loess post-quérandinienn au cours d'une régression.

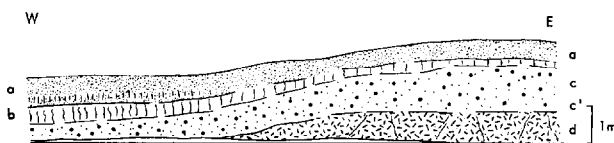


FIG. 5. — Profil à la sortie de Gen. Madariaga, route de Pinamar. Ce profil recoupe un modelé de déflation-accumulation éolien.

- a) Limon éolien de la dernière période sèche. Petit horizon humique fossilisé dans la dépression (hachures verticales)
- b) Paléosol platéen à horizon B textural très marqué, pénétré ensuite par les sels lavés dans la formation a). Ce paléosol est tronqué au niveau de l'horizon B
- c) Loess post-quérandinienn avec précipitation diffuse de carbonate de calcium pulvérulent en c'
- d) Pampiano avec précipitation de carbonate de calcium consolidé en veines.

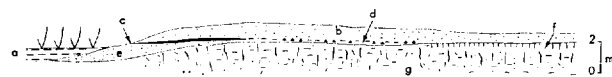


FIG. 6. — Profil au bord d'une cuvette de déflation montrant la chronologie relative des formations et des paléopédogénèses. Cette cuvette se trouve près de l'ancien littoral platéen, à mi-chemin entre Sévigné et le Canal 9.

- a) Cuvette de déflation transformée en marais et colmatée partiellement
- b) Limon éolien de la dernière période sèche, riche en matière organique remaniée
- c) Argile lacustre platéenne passant latéralement à d)
- d) Limon argileux platéen à coquilles
- e) Limon éolien sableux post-quérandinienn.
- f) Paléosol platéen, sur le bord de l'ancien étang platéen, tronqué à l'intérieur de l'horizon B textural
- g) Pampéen avec précipitation de calcaire en veines.

Cette coupe met en évidence l'érosion du sol quérandinienn développé sur le Pampiano, puis une phase de déflation éolienne excavant une cuvette au Post-Quérandinienn (mise en place du limon e). Cette cuvette a été ensuite transformée en étang au Platéen, puis a fonctionné de nouveau par déflation lors de la période sèche post-platéenne avant de redevenir un marais l'Holocène.



FIG. 7. — Coupe dans les berges de l'A° Napoleofú, près du pont de la Route n° 226.

- a) Dépôt de plaine inondable du Platéen, transformé en terrasse. Sable fin, matière organique, argile
- b) Loess post-quérandinienn avec forte précipitation de carbonate amorçant un encroûtement lamellaire généralisé
- c) Lujanense (= Quérandinienn), sable fin gris-vert
- d) Pampiano.

La coupe se trouve au bord des collines de la Tandilia, à l'amorce du piémont. Elle met en évidence les oscillations climatiques.