

PIERRE GANGLOFF et ANDRÉ CAILLEUX*

Montréal

INDICES POSSIBLES DE PERGÉLISOL DISCONTINU

Résumé des auteurs

1° Près de Dourdan, à 50 km au SSW de Paris, la cimentation calcaire d'une colonne cylindrique de sable siliceux s'explique par une infiltration, à partir du calcaire sus-jacent, d'une eau riche en calcaire à travers un trou soit karstique soit interrompant un pergélisol au Quaternaire.

2° A Orveau, 50 km au S de Paris, une large vallée à fond plat aujourd'hui sèche, est remblayée par 1 à 6 m de gravillon calcaire fluviatile périglaciaire quaternaire, avec blocs démesurés glaciels, surmontés de 0,4 à 1,2 m de sable siliceux éolien. Entre les deux, le contact est marqué par une coloration brune du sable, avec argile à la base. De place en place, ce contact dessine des poches très accusées en V émussé, U ou doigt de gant atteignant 2 m de profondeur, où le calcaire a été dissous. Ces poches, n'étant presque jamais ramifiées, ne sont pas imputables à des racines d'arbres. Elles pourraient s'expliquer dans l'hypothèse d'un *pergélisol en écimoire*, l'eau de pluie et de fonte estivale s'infiltrant vers le bas à travers les trous et, grâce à sa température au dessus de 0°C, maintenant ceux-ci béants.

Près de Genève, dans un sable quaternaire proglaciaire, une ferruginisation brune dessine des poches de forme très semblable peut-être formées, elles aussi, à travers les trous d'un pergélisol en écimoire.

3° Près de Montréal, dans des sables tardiglaciaires deltaïques et marins, des structures cylindriques verticales présentant, dans les coupes, l'allure de colonnes de 2 à 35 cm de diamètre sur 1 à 4 m de hauteur visible, se sont formées sous une faible tranche d'eau. Elles constituent le moule interne de cheminées cylindriques creusées par des jets d'eau ascendants, dans les accumulations sableuses. Ces phénomènes se sont produits sur un littoral périglaciaire de la mer de Champlain et résultent de l'interaction entre des oscillations du niveau de la mer et la dynamique d'un pergélisol. Celui-ci, apparu dès l'exondation des dépôts, a déterminé la formation de noyaux de glace souterraine. Par la suite, il a été détruit par l'échauffement dû à une incursion marine, d'où la fonte des noyaux de glace, l'apparition de cuvettes thermokarstiques, des affaissements, des surcharges, la mise sous pression des masses d'eau souterraine et enfin crevant les derniers restes du pergélisol aminci, de brusques et violents jets ascendants responsables de l'ouverture des cheminées cylindriques. Ces événements, liés à la dégradation du pergélisol, semblent impliquer, ici encore, une étape de pergélisol en écimoire.

Le très regretté JAN DYLIK, par ses études sur le périglaciaire, nous a laissé un grand exemple; grâce à des descriptions de plus en plus fines, il a réussi à proposer des interprétations de plus en plus fouillées du mécanisme des phénomènes. Il a aidé à poser de nouveaux problèmes, en particulier celui du thermokarst, dont il a souligné l'importance. Bien que nos observations soient encore très fragmentaires, comparées aux siennes, c'est en nous inspirant de son exemple que nous voudrions ici attirer simplement l'attention sur un nouveau problème, jusqu'ici rarement envisagé: celui d'indices possibles de pergélisol discontinu. Nous en signalerons trois, en commençant par le moins assuré.

* Université de Montréal, Département de Géographie. Montréal 101, Canada.

1. LA CIMENTATION CALCAIRE EN COLONNE

A 50 km au SSW de Paris, à Dourdan (Essonne), reposant sur l'argile plastique imperméable aucunement calcaire, le sable de Fontainebleau stampien (oligocène moyen), marron, purement siliceux, épais d'environ 50 m, est surmonté de 3 à 6 m de calcaire de Beauce aquitanien (miocène inférieur) d'eau douce (Fig. 1). Dans un petit vallon d'érosion quaternaire, tributaire de la vallée de l'Orge, mais aujourd'hui sec, émerge du sable stampien meuble une colonne dure verticale très irrégulière, haute d'environ 2,5 m, mesurant près d'un mètre de diamètre au sommet, un peu

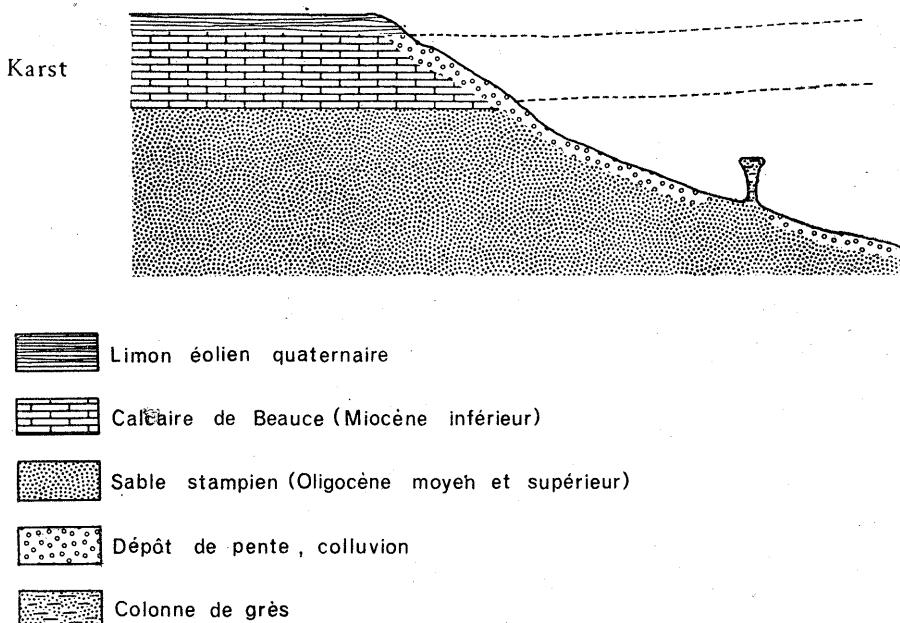


Fig. 1. Cimentation calcaire en colonne. Coupe verticale, schématique. Dourdan (Essonne, France), les Jalots

moins à la base. Elle est faite de sable stampien bien en place, dont la stratification est encore visible, mais dont les grains ont été soudés par un ciment calcaire; la surface de la colonne est mamelonnée, par endroits faite d'une juxtaposition de boursouflures hémisphériques, signes d'une cimentation postérieure au dépôt. Le calcaire a été apporté en solution, à partir du haut quand, à cet endroit, le calcaire de Beauce sus-jacent n'était pas encore érodé. La forme et la verticalité de la colonne indiquent que l'infiltration s'est faite verticalement, à partir d'un trou ayant affecté un niveau imperméable: calcaire compact ou encore pergélisol, qui dans ce cas aurait présenté une discontinuité. Mais une origine simplement karstique ne saurait être exclue ici, un trou souffleur étant connu à 600 m de là dans le calcaire en place. La question reste ouverte (CAILLEUX, 1969).

2. LES POCHE A FOND BRUN EN V, U OU DOIGT DE GANT

A. RÉGION PARISIENNE

A moins de 25 km à l'ESE de la localité précédente, à 50 km environ au Sud de Paris, à Orveau (Essonne) la coupe géologique est la même, sauf que près de son sommet, le sable stampien est, de place en place, cimenté par de la silice, donnant un grès pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Peut-être dès le Pliocène, mais sûrement au Quaternaire, l'érosion a entaillé dans le plateau de Beauce des vallées. Celle d'Orveau, bien que large de 1100 m, profonde d'une cinquantaine de mètre, et située à plus de 20 km de son extrémité amont, est aujourd'hui sèche. Son fond est plat, en pente transversale de 0 à 1°. Au-dessus du sable stampien inférieur, elle comporte une nappe de gravillon fluviatile subhorizontale, bien stratifiée avec intercalations sableuses, quaternaire, en majeure partie probablement wurmienne, épaisse de 1 à 6 m, surmontée d'un sable couleur chamois épais de 0,4 à 1,2 m dont il a été démontré, près de Fontainebleau, qu'il a été apporté par le vent. Les gravillons fluviatiles ont de 4 à 60 mm de long et comprennent environ 95% de fragments de calcaire de Beauce peu émoussés, dérivés de la roche en place toute proche, et 5% de meulière de Beauce (chert, accident siliceux en milieu calcaire), encore moins émoussés. Les sables interstratifiés dans les gravillons et le sable présumé éolien qui surmonte ceux-ci ont sensiblement la même composition, dimension maximale et forme des grains que le stampien en place. Ils en dérivent visiblement.

Un sol brun lessivé, probablement postglaciaire, au moins en partie, affecte le sable supérieur. À l'approche du gravillon sous-jacent, sur environ 10 cm d'épaisseur, ce sable est d'abord brun, un peu argileux, puis on passe à une argile impure, brun foncé, à fragments de meulière, sans aucun calcaire. Le contact de cette argile avec le gravillon calcaire sous-jacent est presque partout très brusque et net.

Le fait intéressant est que dans les très nombreux fronts de gravière, ce contact, dans l'ensemble subhorizontal, est affecté de place en place par des poches verticales en V émoussé, en U ou en doigt de gant (Fig. 2; phot. 1 et 2). Il s'agit bien de poches, à section plus ou moins circulaire, et non de fentes, comme on peut s'en assurer en les attaquant à la pioche, ou encore en observant les surfaces horizontales du sable supérieur dégagées en vue de l'extraction du gravillon. Chaque poche a de 20 à 90 cm de large au sommet, 20 à 200 de profondeur. L'argile brun foncé tapisse sa paroi et son fond, le cœur de la poche est rempli du sable supérieur gris. L'intervalle entre 2 poches, mesuré entre leurs points les plus bas, va de 0,3 à 4,3 mètres, avec une médiane de 3 m et des quartiles respectivement de 6 m et 1,5 m environ.

Des poches de ce genre sont fréquentes dans la région parisienne. Nous en avons observé en compagnie de M. JACQUES DUPUIS dans une gravière au N de Fontainebleau. On les trouve aussi en Bugey et dans le bassin de Genève.

B. RÉGION DE GENÈVE

Le delta proglaciaire de l'Eau-Morte qui s'étale dans la partie centrale du bassin de Genève et domine le Rhône d'environ 70 mètres présente, à sa partie supérieure,

des paléosols de couleur rouille datant du Tardiglaciaire. Près du village de Cartigny, l'un de ces sols de couleur brun-rouge (E 66 du code colorimétrique de CAILLEUX et TAYLOR) altère des sables moyens à grossiers, à stratification subhorizontale bien marquée. Epais, en moyenne, d'une cinquantaine de centimètres, il se prolonge, vers le bas, par des poches en doigts de gant de 60 cm à 1,5 m de long. Dans toute

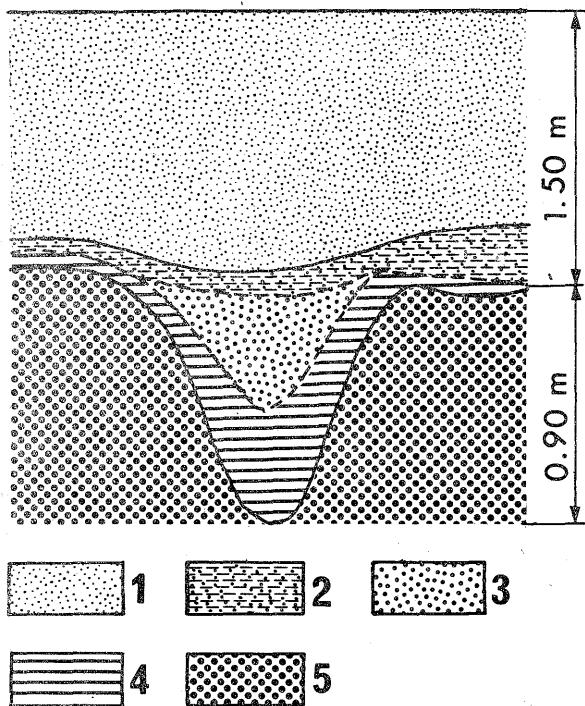


Fig. 2. Poche de dissolution en V émussé. Orveau (Essonne, France)

1. sable supérieur présumé éolien, lessivé, gris sauf à la base où il passe à 2; 2. sable brun un peu argileux; 3. sable gris; 4. argile sableuse brun foncé à rares fragments de meulière et sans aucun calcaire; 5. gravillon surtout calcaire fluviaile périglaciaire quaternaire

la zone ferruginisée, la structure de la roche-mère, le sable deltaïque, a été effacée par la pédogenèse et sa granulométrie modifiée (enrichissement en limon et argile). Il n'y a aucune transition, même à l'échelle du centimètre, entre la zone altérée et le sable frais; tout se passe comme si ces deux formations étaient étrangères l'une à l'autre. La base du sol, rectiligne et grossièrement horizontale, forme avec les parois des poches des angles nets et non des courbes arrondies; ce fait indique que nous ne sommes pas en présence d'injections ou d'autres phénomènes de cryoturbation, tels ces *Taschenboden* que signale, par exemple, WOLDSTEDT (1961, t. 1, p. 141); d'ailleurs, les lits horizontaux de la roche-mère, entre deux poches, n'ont subi aucune déformation. Il est également exclu qu'il puisse s'agir de trous de racines d'arbres.

Il est frappant de constater que chaque poche contient, en son centre où à sa partie supérieure, une tache de sable clair, non ferruginisé. Son origine n'a pas encore pu être éclaircie.

En plus de la ferruginisation, deux autres processus pédogénétiques peuvent être identifiés:

1° Le lessivage des calcaires: le sol rouille de Cartigny est entièrement décalcifié; à sa base, dans les sables sous-jacents, s'observent de fines croûtes de calcaire tendre, légèrement arquées en berceau, associées à des taches blanches rappelant les "bieloglaska" des loess. Ces concentrations de calcaire semblent d'origine pédologique ou cryopédologique.

2° La migration de la silice: examiné sous binoculaire, le sable des sols rouille montre souvent des agrégats de trois ou quatre grains cimentés par de la silice; ces agrégats s'observent le mieux dans le tamis 400 microns. Par ailleurs, là où, autour de Cartigny, le sol rouille s'est développé dans des cailloutis, tous les galets sont altérés; les galets de quartz sont corrodés et présentent des caries tapissées d'oxydes de fer pouvant atteindre le quart de leur volume.

Ces sols se sont formés au Tardiglaciaire, dans un milieu périglaciaire (GAN-GLOFF, 1970, p. 183—208).

La ressemblance du paléosol de Cartigny avec les poches en doigt de gant d'Orveau suggère, pour les deux phénomènes une origine semblable.

C. COMPARAISONS ET INTERPRÉTATIONS

Entre les coupes d'Orveau et celle de Genève, il y a certes quelques différences. Ainsi à Orveau on a au moins deux dépôts superposés bien distincts (gravillon fluviatile et sable supérieur présumé éolien), tandis qu'à Genève il s'agit d'un seul et même dépôt (sable deltaïque). Mais dans les deux cas, les ressemblances sont significatives: perméabilité du matériel (du moins à l'état non gelé), forme, dimension et espacement des poches, ferruginisation de la partie de leur remplissage qui est au contact de la paroi. Une infiltration d'eau, de haut en bas, ayant dissous le calcaire, est évidemment en cause. Mais comment expliquer son accentuation si frappante marquée par les poches?

1° Invoquer des inégalités accidentnelles de l'infiltration, comme on l'a fait parfois, ne convient pas là où, à un même niveau, le matériel est homogène latéralement, comme c'est le cas à Orveau aussi bien qu'à Genève.

2° Une hypothétique action de racines d'arbres est exclue, même à Orveau, par l'absence presque générale de ramifications.

3° A défaut d'autre hypothèse, on pourrait envisager l'existence, à l'un des moments d'une phase froide quaternaire, d'un pergélisol percé de trous de place en place, donc de ce fait discontinu.

Alors, là où ce pergélisol est présent, l'eau des pluies et de fonte des neiges ne peut pas s'écouler vers le bas verticalement, mais latéralement, jusqu'à ce qu'elle atteigne un trou. Là elle s'infiltra verticalement, d'où la forme en V, U ou doigt de gant. Et étant au-dessus de 0°C, elle contribue, d'année en année, soit à élargir

le trou, soit au moins à le maintenir béant: le phénomène, une fois amorcé en un point, doit y perdurer.

A l'appui de cette hypothèse, on note, dans les gravières d'Orveau, toute une série de traits témoignant au Quaternaire d'un climat périglaciaire certain:

1° Sous les gravillons fluviatiles, le sable stampien lui-même bien visible dans plusieurs coupes, est affecté, sur au moins 1 à 2 mètres de haut, de micro-failles, comme on en observe très souvent ailleurs dans la région, et qui se sont produites au Quaternaire quand ce sable était à l'état dur, gelé.

2° En deux endroits au moins, ce sable blanc est zébré de bandes ferruginisées, rouille, épaisses de 1 à 3 cm, en gros subhorizontales, mais un peu ondulées et d'épaisseur variable latéralement: dépôt chimique secondaire, fréquent dans la région parisienne, où son âge est Quaternaire (J. P. MICHEL, 1969) et son origine périglaciaire, probablement lors de la progression d'un front de gel vers le bas (H. BERTOUILLE et CAILLEUX, 1966).

3° Ce même sable stampien, aujourd'hui parfaitement propre et meuble, forme par endroits, dans les gravillons fluviatiles sus-jacents, des involutions et des injections dont une au moins est un pli déversé si oblique que son sable repose sur du gravillon: dispositions classiques en milieu périglaciaire.

4° Dans le gravillon quaternaire sus-jacent, les cailloux calcaires ont un indice d'aplatissement (longueur plus largeur divisées par deux fois l'épaisseur) fort, évalué à vue à 3, et qui dans un dépôt fluviatile et pour des calcaires compacts, ce qui est le cas ici, n'est connu qu'en milieu périglaciaire.

5° Le même gravillon présente par endroits des cailloux systématiquement dressés.

6° A son sommet, dans une des gravières, il est affecté de festons en U typiques, ouverts vers le haut ayant 70 cm de profondeur et un peu moins de largeur, et qui sont la coupe verticale de sols polygonaux, à triage de pierres (ROMANOVSKY et CAILLEUX, 1943). Ici, à l'intérieur du feston le gravillon est blanc, tandis qu'en-dessous et dans les parois il est de couleur crème; dans les parois les cailloux sont dressés.

7° La végétation naturelle actuelle est la forêt dense de feuilles. Au-dessus du gravillon fluviatile périglaciaire, le sable supérieur éolien n'a pu être mobilisé, à l'état de nature, qu'en l'absence de forêt, donc sous un climat très différent de l'actuel; au Quaternaire, cela n'a pu se produire que sous climat périglaciaire.

8° Dans le remplissage de l'une des poches, ce sable est affecté à son tour de zébrures ferruginisées (phot. 3), elles aussi indicatrices d'un épisode périglaciaire (*cf.* 2° ci-dessus).

9° En plusieurs endroits s'observent, dans le gravillon, d'énormes blocs démeubrés de grès-quartzite dur, atteignant 2 m de long et plus, 0,5 à 1 m d'épaisseur (phot. 4). Leur niveau stratigraphique originel était, nous l'avons vu, presque le sommet du Stampien, à 40 m au-dessus du fond de la vallée actuelle. Les uns paraissent reposer aujourd'hui à la base même des graviers et pourraient s'expliquer par une descente quasi sur place, au fur et à mesure que l'érosion enlevait le sable

stampien sur lequel ils reposaient. Mais d'autres, dont un dépassant 2 m de long et donc pesant plusieurs tonnes, reposent sans aucun conteste sur le gravillon lui-même, visible sur 50 à 100 cm. Ceux-là n'ont pu être transportés que par des glaces flottantes, il sont glaciels.

10° Le fond plat de la vallée et sa largeur atteignant 1100 m sont des caractères de vallon périglaciaire. Bien que le bassin versant, en amont d'Orveau, ait une surface de plus de 150 km², la vallée est aujourd'hui totalement sèche: dans le calcaire de Beauce, les sables et le gravillon, tous matériels perméables, toute l'eau des précipitations s'infiltra et s'écoule en profondeur, rien ne ruisselle. Pour qu'aient pu avoir lieu, dans le passé quaternaire, les écoulements superficiels imposants dont témoignent l'ampleur des creusements, les blocs glaciels, et le gravillon fluviatile lui-même, il a fallu une hydrologie toute différente, une imperméabilisation du sous-sol que seul a pu réaliser un sol gelé permanent, un pergélisol continu ou presque.

Entre l'état ancien d'un pergélisol continu ou quasicontinu, et l'état actuel ou interglaciaire, sans pergélisol, il a bien fallu passer par une phase intermédiaire de pergélisol discontinu. La question est de savoir si en fait, celui-ci, a présenté des trous, et si ceux-ci ont donné naissance aux poches, comme nous le suggérons.

La présence à Orveau de si nombreux témoignages concordants d'un climat périglaciaire rend à tout le moins soutenable notre hypothèse: celle d'un pergélisol discontinu à trous circulaires plus ou moins localisés ou, plus brièvement d'un *pergélisol en écumeoir*.

Quant au mécanisme de détail et à sa place exacte dans la succession chronologique des dépôts et des migrations du fer, ils font l'objet d'études en cours.

3. LES STRUCTURES CYLINDRIQUES

A. CARACTÈRES GÉNÉRAUX ET RÉPARTITION

Les dépôts meubles de la vallée du Saint-Laurent renferment de spectaculaires colonnes de sable, de 1 à 4 mètres de longueur apparente et de 2 à 35 cm de diamètre. Généralement verticales, mais parfois basculées à la suite de l'effondrement des terrains encaissants, elles évoquent d'antiques piliers engagés dans les parois des coupes sédimentaires (phot. 5).

Le corps des colonnes se compose de fines enveloppes, soit uniquement sableuses soit sableuses et limoneuses, disposées en cônes emboités à pointes tournées vers le bas. En coupe transversale, les colonnes montrent une série de cercles concentriques de 1 mm à quelques centimètres de large, rappelant les anneaux de croissance d'un tronc d'arbre.

Trois types de micro-failles accompagnent généralement ces structures:

- 1) des failles internes, millimétriques, affectent les enveloppes sédimentaires au sein des colonnes;
- 2) des failles longitudinales, périphériques, de quelques décimètres de long et

de faible rejet, déterminent, dans les sables encaissants, des grabens annulaires ceinturant la partie inférieure visible de plusieurs piliers;

3) enfin des failles obliques, s'amortissant rapidement dans les dépôts voisins, décrochent fréquemment les axes des colonnes.

La répartition géographique des structures cylindriques est encore mal connue. Elles n'ont été signalées, jusqu'ici, dans le sud du Québec, que dans le Quaternaire de trois localités (fig. 3): Saint-Jérôme, Arthabaska et Sept-Iles.

Elles ne sont là jamais isolées mais s'observent par groupes d'au moins 6. Au nord de Montréal par exemple, la sablière de Saint-Jérôme contient deux sites di-

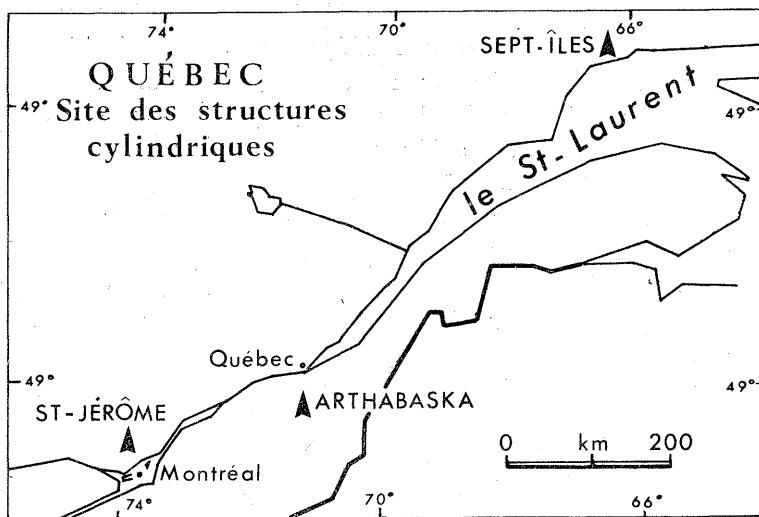


Fig. 3. Localisation des sites à structures cylindriques dans des dépôts meubles du Québec méridional

stants d'une centaine de mètres, renfermant respectivement, dans un rayon de quelques mètres, 9 et 8 colonnes de sable. Le tiers d'entre elles sont d'ailleurs accolées ou faiblement emboitées l'une dans l'autre. De même à Arthabaska, les six exemplaires décrits par DIONNE (1973), se concentrent sur une distance de 30 mètres seulement. A Sept-Iles enfin Germain TREMBLAY (communication orale) a observé 5 de ces structures étroitement groupées dans un espace d'une quinzaine de mètres.

Les collonnes ne sont formées que dans des faciès sableux (marins à Saint-Jérôme, deltaïques à Arthabaska et à Sept-Iles) dont elles recoupent perpendiculairement les strates. Dans les deux premiers cas au moins, elles sont associées à des fentes de contraction par le froid fossiles et à des cryoturbations reliques d'âge tardiglaciaire impliquant un pergélisol.

B. GENÈSE DES STRUCTURES CYLINDRIQUES DE ST-JÉRÔME

Nous résumerons d'abord les résultats d'une étude antérieure (GANGLOFF, 1974).

1. Les causes immédiates

L'origine des colonnes de sable a pu être reconstituée en détail dans la coupe de Saint-Jérôme: des masses d'eau souterraines sous pression ont jailli verticalement vers le haut à travers les accumulations de sable. Les jets d'eau ont ainsi creusé, dans le sable meuble, des cheminées cylindriques (phot. 6). Le détail de leur remblaiement prouve que ces venues à courant ascendant ont jailli en milieu sous-aquatique: la terrasse marine de Saint-Jérôme, au moment où ces phénomènes se sont produits était recouverte par une faible couche d'eau de la mer de Champlain. Des sables, chassés sur le fond de la mer, se sont engouffrés dans les cavités cylindriques de haut en bas, les colmatant progressivement. De loin en loin, des limons sont eux aussi décantés; l'ensemble a produit ce colmatage par feuillets coniques emboîtés qui caractérise la structure interne des colonnes. A la fin de la phase de remblaiement, le matériel fossilisant certaines cheminées a subi des tassements, sa partie inférieure a coulissé, à la manière d'un piston dans un cylindre, d'où la série de micro-failles internes et, par frottement des colonnes contre les parois cylindriques, les failles périphériques.

Expliquer les colonnes de sable par des moulages de cheminées fossiles de venues d'eau sous-aquatiques n'est rendre compte que des causes immédiates de leur genèse. Encore faut-il préciser l'origine de ces venues.

2. Deux hypothèses inadéquates

Dans de puissantes accumulations sableuses plus ou moins gorgées d'eau, on pourrait à bon droit invoquer, avec certains auteurs, des affaissements liés à des différences locales de densités. Des structures cylindriques dans le Jurassique de New Mexico ont été expliquées de la sorte (SCHLEE, 1963). Toutefois ce processus ne peut être retenu pour rendre compte des structures de Saint-Jérôme où les accumulations sableuses de la terrasse marine atteignent, au plus, une dizaine de mètres d'épaisseur.

Une hypothétique circulation d'eau artésienne dans les roches situées sous la terrasse marine, eau qui aurait ensuite traversé le sable meuble, doit également être exclue: le substratum se compose, en effet, de roches cristallines saines du bouclier précamalien, où les circulations d'eau sont négligeables.

3. Le contexte géomorphologique

En fait, aucune cause simple ne permet d'expliquer les jets d'eau sous-aquatiques. L'étude des coupes de terrains (GANGLOFF, 1974), a montré que ceux-ci résultent d'interférences complexes, sur un littoral périglaciale de la mer de Champlain, de faibles oscillations du niveau marin et de la dynamique d'un pergélisol.

Les colonnes sableuses de Saint-Jérôme, en effet, sont non seulement associées à des gélistructures, elles sont encore liées directement à des cuvettes thermokarstiques fossiles. L'une des colonnes pénètre dans la base du remplissage d'une de ces cuvettes: elle est donc contemporaine de l'effondrement des terrains. Celui-ci a été

déclenché par une incursion marine sur un pergélisol: les cuvettes, en effet, sont colmatées par des dépôts littoraux contenant, dans un cas, des spongiaires fossiles.

Il a été possible de reconstituer l'évolution suivante: après avoir construit la terrasse de Saint-Jérôme, la mer de Champlain se retire vers 10 300 B. P. (8 300 av. J.-C.). Un pergélisol s'installe dans les sédiments fraîchement exondés et y détermine la formation de gélisstructures et de noyaux de glace souterraine. Survient une faible transgression marine submergeant la terrasse sous quelques mètres d'eau. Celle-ci se trouvant, à la belle saison, au-dessus de la température de congélation, le pergélisol se dégrade; les blocs de glace souterraine fondent et se transforment en poches d'eau. A leur emplacement, les terrains s'effondrent, faisant jaillir l'eau souterraine sous forme de sources ou jets ascendants. En même temps apparaît, en surface, une cuvette thermokarstique immédiatement remblayée par des sédiments marins.

Ces mécanismes se sont reproduits à au moins deux reprises. Une brève régression de la mer a permis au pergélisol de se réinstaller dans la terrasse. De nouveaux blocs de glace souterraine se sont constitués au voisinage des précédents. Une seconde incursion de la mer les a fait fondre, d'où de nouveaux affaissements déforment le remplissage des cuvettes thermokarstiques précédentes, basculant d'anciennes structures cylindriques, faisant jaillir de nouvelles sources ou jets sous-aquatiques responsables de nouvelles colonnes.

Celles-ci se sont mises en place, de préférence, le long de surfaces de faiblesse à l'intérieur des sables: des failles verticales ou des zones de contact entre d'anciennes colonnes et leurs sables encaissants. Ce fait explique la fréquence des colonnes jumelées dans la terrasse de Saint-Jérôme.

4. Le pergélisol en écimoire

Si l'on considère maintenant l'état du pergélisol au moment où va se former une structure cylindrique, cet état ne peut être que complexe. On peut admettre que:

1) pour creuser, à travers plusieurs mètres de sables, un trou cylindrique, il faut un jet brusque de quelques secondes, au maximum de quelques minutes. Ce qui suppose de très fortes pressions dans la poche d'eau souterraine;

2) pour que la poche d'eau ait été soumise à forte pression, il faut qu'elle ait été scellée. Au-dessus d'elle, le pergélisol a dû subsister jusqu'au dernier moment;

3) cependant, si le toit de la poche était gelé sur une grande épaisseur, comment la pression de l'eau aurait-elle pu percer un tel solide?

Il fallait donc un pergélisol peu épais, encore continu, en voie de dégel, sûrement par le haut, probablement aussi par le bas, donc s'amincissant. Arrive un moment où, de ci de là, ce pergélisol s'amincit tellement (fig. 4) que le toit des poches d'eau cède sous la pression. D'où les jets ascendants, brutaux, responsables des cheminées.

Ces considérations cadrent bien avec les observations effectuées dans la coupe de Saint-Jérôme. La nappe d'eau, en submergeant la terrasse, a isolé celle-ci des influences du climat périglaciaire. Le pergélisol devait se dégrader: (1) par la base,



Photo J. P. Perrault

Photo 1. Dans le gravillon calcaire fluviatile périglaciaire quaternaire (clair, à hauteur du personnage), 4 ou 5 poches de dissolution en V à remplissage d'argile sableuse brune (sous la main gauche du personnage) surmontée de sable brun (15 cm plus haut) puis blanc (tout juste visible en haut de la poche, caché par la végétation au-dessus). Orveau (Essonne, France)



Photo 2. Poche de dissolution en doigt de gant. De part et d'autre, gravillon calcaire. Contre le flanc droit de la poche, traînée verticale très blanche de calcaire secondaire friable. Fond de la poche rempli d'argile brune (foncée) à fragments de meulière (plus clairs); au-dessus, en gris pâle, sable supérieur éolien. Orveau



Photo 3. Gravillon calcaire (clair, en bas à gauche et à droite) entaillé par une poche dont le remplissage sableux, gris clair, présente, en plus foncé, outre la ferruginisation habituelle au contact du gravillon, 5 ou 6 bandes transversales subhorizontales ferruginosées (dont certaines sont ondulées et les deux du haut, un peu bombées) formées sous climat froid.
Orveau



Photo J. P. Perrault

Photo 4. Bloc de grès-quartzite stampien reposant sur au moins 60 cm de gravillon calcaire quaternaire. N'a pu être apporté là que par un radeau de glace flottante, donc bloc glacial. Orveau

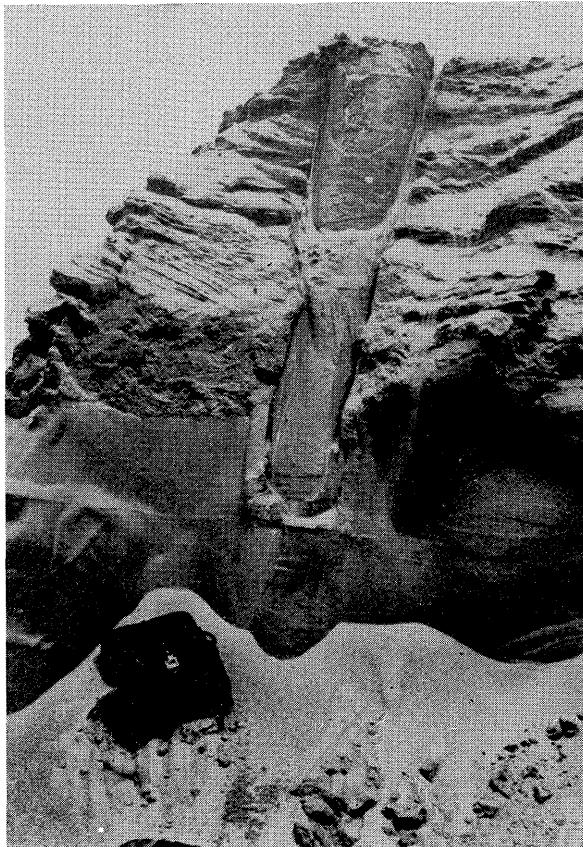


Photo 5. Structure cylindrique dans les sables marins tardiglaciaires, au nord de Montréal



Photo 6. Structure cylindrique présentant une racine d'injection à sa partie inférieure, Nord de Montréal

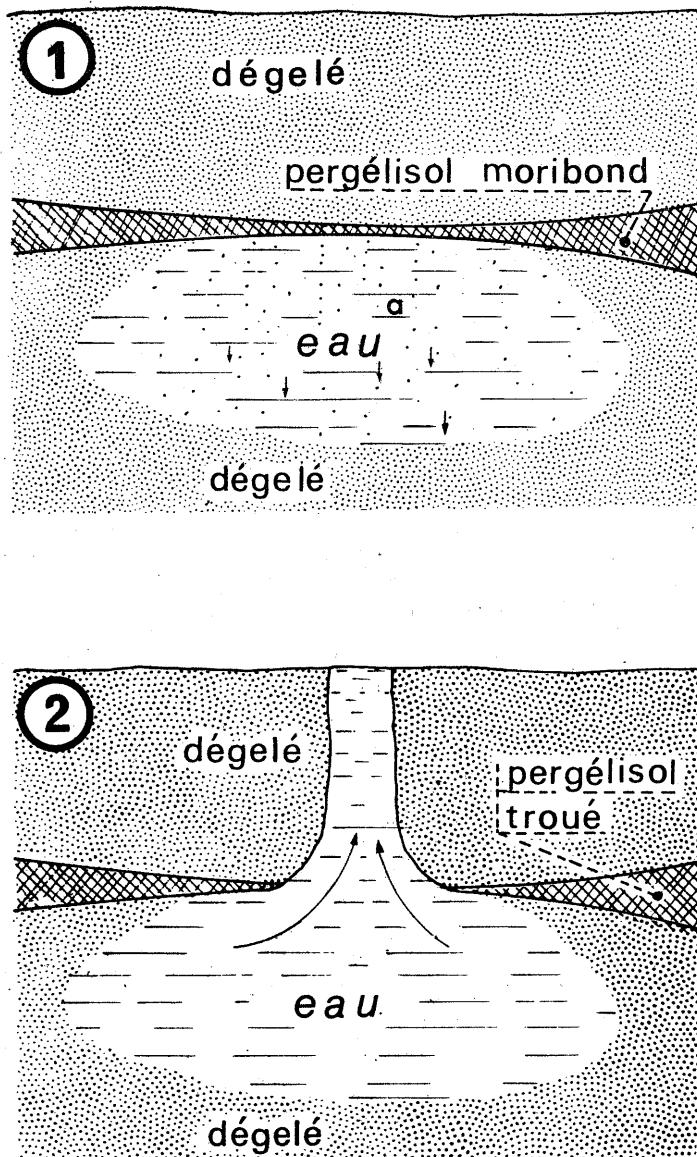


Fig. 4. Formation probable d'une stricteure cylindrique dans un pergélisol en voie de dégradation

a. grains de sable libérés du toit par le dégel et tombant à travers l'eau

sous l'influence du flux géothermique, (2) par le sommet en raison de l'apport de calories par l'eau de mer.

De la sorte, des noyaux de glace ont fondu alors qu'une couche de sable gelé, s'amincissant progressivement, les surmontait encore. L'eau souterraine, bloquée à la base par les roches cristallines imperméables du socle précamalien, enserrée

par des masses de sable encore imperméabilisé par le gel, surmontée par un poids énorme de sédiments, ne pouvait être que sous forte pression. Il devait nécessairement arriver un moment où le pergélisol s'aminçissait tellement que le toit de la poche d'eau allait pouvoir céder sous la pression. A cet instant, de petites failles devaient fracturer la voûte encore gelée. L'eau a dû jaillir de préférence le long de ces cassures en même temps que, de part et d'autre, les terrains s'affaissaient et se faillaient eux aussi.

Si les choses se sont effectivement passées comme nous venons de le décrire, l'allure des structures cylindriques devrait être différente à la base, où le jet d'eau a dû traverser une zone de sable encore gelé, et plus haut, où il a traversé le sable meuble. C'est effectivement ce que l'on constate dans deux cas particulièrement nets: des "racines d'injection" (phot. 6) d'une dizaine de centimètres de large seulement apparaissent à la base de colonnes de 20 à 30 cm de diamètre. Cette différence de largeur correspond probablement à une différence dans la résistance des matériaux encaissants: dans la base encore gelée, le jet d'eau n'a creusé qu'un étroit conduit alors que dans le sable supérieur déjà dégelé et meuble, il a pu excaver une cheminée trois fois plus large, donc de section neuf fois plus grande.

COMPARAISON ET CONCLUSION

Le tableau I montre les différences principales entre les trois principaux indices possibles que nous venons d'étudier.

L'un deux — les colonnes cylindriques du Québec — est suffisamment bien établi pour qu'on puisse conclure: dans les reconstitutions paléogéographiques, le moment semble venu de mieux distinguer entre pergélisol continu et discontinu. Et il est souhaitable que les indices possibles de pergélisol discontinu — ceux que nous venons de signaler et bien d'autres, notamment tirés des ferruginisations et autres dépôts chimiques secondaires soient l'objet d'études approfondies.

Tableau I

	Cimentation calcaire en colonne	Poches de dissolution	Structures cylindriques
Mouvement vertical de l'eau	Descendant	Descendant	Ascendant
Couche du dessus surtout	Calcaire	Siliceuse	
Couche du dessous	Siliceuse	Surtout calcaire	
Fréquence	Rarissime	Très fréquent	Très rare
Explication par pergélisol discontinu	Non démontré	Possible	Extrêmement probable

Bibliographie

- BERTOUILLE, H. et CAILLEUX, A., 1966 — Dépôts calcaires, fentes et ferruginisations près de Paris. *Konink Nederl. Aardr. Kundig Grenodschap*, v. 83, no. 3.
- CAILLEUX, A., 1969 — Environs de Dourdan. In *8ème Congrès INQUA, Livret-guide de l'excursion A2*; p. 40—44; Paris.

Nota bene: Les épreuves n'ayant pas été soumises à l'auteur, de nombreuses erreurs typographiques se sont glissées: P 42, ligne 3 du bas et p. 43, ligne 7 du bas, au lieu de *Valots* lire *Jalots*. — P. 43, *Trou souffleur* est un sous-titre et devrait être en italiques. Ligne 3 du bas, au lieu de *Pierre d'offrandes*, lire *Pierre des moissonneurs*. Le chiffre 7 de la Fig. 12 désigne cette pierre, et non le septième arrêt. — P. 44, ligne 5, au lieu de *perméable* lire *imperméable*. — Septième arrêt, ligne 1, au lieu *d'Oranges-le-Roi*, lire *Granges-le-Roi*.

- CAILLEUX, A., et TAYLOR, G. — Notice sur le code expolaire; Edition Boubée et Cie, Paris.
- DIONNE, J. C., 1973 — Structures cylindriques verticales dans du Quaternaire à Arthabaska, Québec. *Sedimentary Geology*, 9; p. 53—63.
- GANGLOFF, P., 1970 — Le bassin de Genève: Geomorphologie et Quaternaire. Centre de Géographie Appliquée, Univ. de Strasbourg; 239 p. (inédit).
- GANGLOFF, P., 1974 — Les structures cylindriques et l'évolution géomorphologique d'une plage tardiglaciaire à Saint-Jérôme, Québec, *Rev. Géogr. Montr.*, vol. 28, no. 4; p. 357—373, 17 fig., 1 tab.
- MICHEL, J. P., 1969 — Hurepoix. In 8ème Congrès INQUA, *Livret-guide de l'excursion A2*, p. 29—31, 1 fig., Paris.
- ROMANOVSKY, V., et CAILLEUX, A., 1943 — Festons au sommet de la craie de Normandie. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5, 13; p. 125—138, 7 fig. Paris.
- SCHLEE, J. S., 1973 — Sandstone pipes of the Laguna area, New Mexico, *Journ. Sedimt. Petrol.*, 33; p. 112—123.
- WOLDSTEDT, P., 1961 — Das Eiszeitalter, Grundlinien einer Geologie des Quartärs. Vol. I, Ferdinand Enler Verlag, Stuttgart; 376 p.