

JEAN TRICART\*

Strasbourg

## QUELQUES DIFFICULTES METHODOLOGIQUES PRESENTEES PAR LES RECONSTITUTIONS PALEOCLIMATIQUES DU QUATERNAIRE

Ch. LYELL, il y a 150 ans, jetait les bases méthodologiques de la géologie en s'appuyant sur les seuls processus actuels pour reconstruire le passé de la Terre. Il s'opposait ainsi vigoureusement aux théories catastrophistes d'un Curvier et à ceux qui voulaient retrouver à la surface de la Terre les événements faisant l'objet, comme le Déluge, de fables religieuses. Les naturalistes polonais depuis ŁOZIŃSKI jusqu'à l'Ecole de Łódź, fondée par J. DYLIK et A. DYLIKOWA, ont apporté une contribution d'une exceptionnelle valeur à la connaissance des manifestations quaternaires du froid. Leurs études minutieuses des dépôts glaciaires et périglaciaires, en particulier celles portant sur la disposition des particules et sur les modifications qui l'ont affectée après le dépôt, leur ont permis de reconstituer avec une remarquable précision toute une série de processus relatifs à l'écoulement de la glace, à sa fusion, à la géliturbation, à la gélifluxion, aux actions éoliennes.

Dans ce cas, la méthode suivie est parfaitement correcte, car il s'agit de processus purement physiques. La congélation de l'eau pure, au Quaternaire comme de nos jours, avait lieu à 0°C. Elle s'accompagnait, au Quaternaire comme de nos jours, d'un accroissement de volume susceptible d'exercer une contrainte sur les parois des pores et des fissures. Le phénomène de la paroi froide, provoquant des migrations capillaires de l'eau lors de l'engel intervenait au Quaternaire comme maintenant.

Mais lorsque nous abordons des phénomènes naturels plus complexes, notamment ceux dans lesquels intervient la Vie, une telle méthode devient inacceptable et aboutit à des reconstitutions inexactes car certaines combinaisons qui se sont réalisées au Quaternaire, pendant les périodes froides, sont sans équivalent actuel. Je poserai le problème à trois niveaux différents de complexité: celui du climat, celui des processus morphogéniques dépendant directement du climat et, enfin, celui des biocénoses.

---

\* Centre de Géographie Appliquée (Laboratoire Associé 95 au CNRS), Université Louis-Pasteur, Strasbourg, France.

# EXISTENCE DE CLIMATS QUATERNAIRES SANS HOMOLOGUES ACTUELS

Pour la seconde moitié de la dernière grande période froide (Vistule, Würm, Wisconsin), les datations au radiocarbone permettent d'établir une séquence des paléotempératures tirées des dosages de  $^{18}\text{O}$  effectués à partir des restes carbonatés d'êtres microscopiques poïkilothermes vivant aussi exclusivement que possible dans les eaux superficielles. Laissons de côté, pour le moment, l'aspect écologiques de ces fossiles. Il apparaît nettement que, vers 18.000 BP, date choisie pour la reconstitution CLIMAP, l'ensemble du Globe a été soumis à un refroidissement, plus accentué aux moyennes latitudes de l'Hémisphère Nord, principalement de part et d'autre de l'Atlantique, moindre aux basses latitudes et dans l'Hémisphère Sud. C'est pourquoi j'ai adopté l'expression „périodes froides”, applicable à l'ensemble du Globe, ce qui n'est pas le cas de „périodes glaciaires” (Ice Ages). L'étude des manifestations périglaciaires recoupe de manière tout à fait satisfaisante les résultats obtenus à partir de  $^{18}\text{O}$ . Pour l'Atlantique aux abords de l'Irlande, comme pour la Rhénanie et l'Europe centrale, l'accord se fait sur un abaissement d'une dizaine de degrés des températures.

Admettons cette valeur, quitte à en discuter plus tard la signification réelle. Cela aboutit, vers 50° lat. N, à un type de régime thermique sans aucun équivalent actuel à la surface du Globe. En effet, malgré ces températures fort basses, permettant la formation d'un pergélisol, attesté par les figures périglaciaires, la latitude restait la même que de nos jours. Il n'y a, en effet, aucune observation permettant d'admettre des déplacements des pôles géographiques au cours du Quaternaire, à la différence des pôles magnétiques, fort mobiles de nos jours, mais qui ne coïncident absolument pas avec les pôles géographiques. La position en latitude étant la même vers 18.000 BP que de nos jours, les mêmes variations diurnes et saisonnières de l'angle d'incidence des rayons solaires se produisaient, commandant les quantités d'énergie incidente à la surface du sol et dans l'atmosphère. Malgré le sol gelé permanent, malgré les banquises couvrant les parties les plus profondes de la Mer du Nord et de la Mer d'Irlande, il n'y avait ni soleil de minuit ni nuit polaire interminable. Un maximum d'échauffement, par radiation directe et par convection affectait la surface du sol vers midi et immédiatement après 12 heures (heure solaire, bien entendu). Les journées d'été étaient plus longues que les journées d'hiver mais les unes et les autres étaient caractérisées par des variations de l'insolation tout au long des 24 heures. Les températures moyennes à la surface du sol pouvaient être égales à celles des régions polaires actuelles, mais le régime thermique du sol était nécessairement différent, fort différent même, du fait des variations diurnes et saisonnières de l'insolation qui étaient restées celles des latitudes moyennes. L'étude des organisations périglaciaires dans les formations superficielles nous

permet d'identifier l'existence d'alternances de gel et de dégel, de phénomènes de contraction des sols gelés pas très basses températures, mais nous sommes en présence d'un résultat global, intégrant de nombreuses variations individuelles successives dont le rythme, justement dépendant des régimes d'insolation, nous échappe. Il en est de même de l'arrangement et des caractéristiques des matériaux morainiques, qu'ils dépendent du mouvement de la glace ou de l'action des eaux de fonte. Seuls les varves attestent des variations saisonnières de l'importance de la fusion et du développement du plancton, ce qui abonde dans notre sens.

Il faut même aller plus loin et se poser le problème de la *s i g n i f i c a t i o n* des paléotempératures déduites de  $^{18}\text{O}$ . D'un point de vue géographique, il ne faut pas oublier que la température superficielle des océans n'est pas une fonction linéaire de celle de l'air, seule étudiée par la climatologie. Une certaine indépendance des deux températures s'observe: elle résulte en grande partie de la circulation océanique. Or, les refroidissements quaternaires ont été inégaux d'une région des océans à l'autre, ce qui a influé à la fois sur la circulation océanique et sur la circulation atmosphérique. Enfin, les régressions glacio-eustatiques, d'une centaine de mètres pour celle des environs de 18.000 BP, ont altéré, parfois fortement, la configuration des mers et océans, faisant émerger des plateformes continentales plus ou moins étendues et des seuils. La circulation océanique en a été davantage modifiée que la circulation atmosphérique: elle a été la première affectée, sans retard, tandis que la circulation atmosphérique a été influencée indirectement, par l'intermédiaire des effets des changements de température des mers et océans sur la température de l'air se trouvant à leur contact. L'approche systémique s'impose pour l'étude de ces modifications climatiques, du fait du jeu d'interactions indirectes et de rétroactions positives et négatives. Les données dont nous disposons sont trop rares et, surtout, trop dépendantes de mécanismes particuliers, pour que nous puissions tenter une modélisation quantitative.

#### LES PROCESSUS MORPHOGENIQUES COMPLEXES ET LE CLIMAT

Les formes du relief et les formations superficielles qui leur sont associées sont bien conservées quand elles ont été engendrées au Quaternaire récent. La géomorphologie est devenue une discipline scientifique à l'aube de ce siècle quand A. PENCK et J. BRÜCKNER, refusant le trop facile recours à l'„imagination” de W. M. DAVIS, ont établi la succession morphoclimatique des formes glaciaires et proglaciaires du piémont austro-bavarois en corrélant étroitement les relations entre les diverses formes et les types de dépôts et d'altérations correspondants. Depuis lors, les données géomorphologiques, formes et dépôts associés, sont devenus l'un des fondements des reconstructions des séquences climatiques quaternaires. L'Ecole de Łódź s'est acquise une réputation mondiale dans ce

domaine. Elle s'est orientée principalement vers l'identification des processus et vers l'aspect historique, stratigraphique des observations effectuées, établissant des séquences de phénomènes. Elle a été beaucoup plus réservée quant aux interprétations paléoclimatiques, restant près des faits et se limitant à des déductions directes, telles que la présence d'un pergélisol ou d'un froid rigoureux, permettant l'ouverture de fentes de contraction restées béantes avant d'être remplies, par exemple, de sables éoliens. Des études de ce genre permettent d'identifier des processus, d'établir leur succession. Ce ne sont pas, à proprement parler, des reconstitutions paléoclimatiques, car il est difficile de passer de l'identification d'un processus aux conditions climatiques dans lesquelles il a fonctionné.

En effet, pour nous limiter aux fentes de contraction d'un pergélisol, il nous faut bien reconnaître que les conditions thermiques de leur formation actuelle sont assez mal connues. Une assez grande marge d'incertitude existe. Cela résulte de toute une série de facteurs:

- la difficulté d'une discrimination sûre entre fentes de contraction actuelles, actives, et de fentes ayant fonctionné dans un passé récent, non oblitérées, mais ne fonctionnant plus, ou seulement épisodiquement, c'est à dire héritées ou relictuelles;

- la très grande rareté des mesures de température dans le sol, à diverses profondeurs, conduites pendant un nombre d'années suffisant pour être significatives, et, de plus, étroitement mises en rapport avec le fonctionnement des fentes de contraction;

- la mauvaise corrélation entre les mesures de température, effectuées selon les normes climatologiques, sous abri, dans l'air, en éliminant autant que faire se peut la radiation, et les températures dans le sol.

Or, la plupart des auteurs ont tenté de mettre en rapport les diverses manifestations périglaciaires avec des températures *c l i m a t o l o g i q u e s*. Comme ces températures sont inadéquates, il n'est pas étonnant que les corrélations soient mauvaises et que les températures-seuil de fonctionnement de ces manifestations soient fort imprécises. Cela explique le manque d'accord entre les auteurs.

Or, il s'agit de phénomènes relativement peu complexes. Les mécanismes résultant de l'intervention de plusieurs processus interférant les uns avec les autres sont encore plus difficiles à étudier. Un premier problème posé est celui des relations entre les phénomènes efficaces et les phénomènes les fréquents, qui influent généralement le plus sur les valeurs moyennes. Il faut, en effet, poser ce problème car notre climatologie, celle qui tente de décrire le climat actuel, est une climatologie de moyennes, non d'intensités et de fréquences: elle ignore encore les courbes de débits classés telles qu'on les établit en hydrologie. Or, des recherches fort différentes les unes des autres, conduites par des scientifiques de formation diverse et n'ayant pas les mêmes préoccupations, aboutissent à des conclusions

semblables. Par exemple, J. DUBIEF, géophysicien et météorologue, étudiant le climat du Sahara, s'est convaincu, il y a plus de vingt ans, que les vents plus fréquents n'étaient pas ceux qui modélaient les dunes. L'étude de l'orientation des dunes, dans une région désertique sans influence de la végétation, ne permet donc pas d'identifier la direction des *v e n t s d o m i n a n t s*. Elle ne nous révèle que la direction des „*v e n t s e f f i c a c e s*”. Or, les relations entre vents efficaces et vents dominants sont mal connues et, de surcroît, passablement changeantes, notamment en fonction de l'état hydrique du sol. Connaissant mal cette relation pour les phénomènes actuels, comment pouvons-nous l'utiliser pour un passé sur lequel, par la force des choses, nous disposons de moins de données et, surtout, sur lequel toute mesure climatologique est exclue?

Autre exemple: la dynamique fluviale. Le rayon hydraulique étant maximum lors de l'écoulement à pleins bords dans le lit mineur, c'est alors que l'énergie disponible pour le façonnement du lit mineur est la plus grande. Dans la mesure où ces débits persistent assez longtemps, les lits mobiles s'adaptent à eux. Leur façonnement tend vers la réalisation d'une géométrie commandée par l'interdépendance des divers paramètres qui permettent de la définir: pente, largeur, profondeur. Les relations entre ces paramètres sont de type statistique, c'est à dire qu'elles comportent une certaine *d i s p e r s i o n d e s v a l e u r s* individuelles. Il faut donc tenir compte de cette dispersion d'une part et, d'autre part, qu'il s'agit seulement d'une *t e n d a n c e*, plus ou moins bien réalisée effectivement. On ne peut, à l'heure actuelle, déduire avec une marge d'erreur acceptable les débits des paramètres géométriques des lits.

Mais ce n'est pas tout. Lors de l'encrue<sup>1</sup>, la montée des eaux et l'accroissement des débits sont plus ou moins rapides. Sur certains cours d'eau, lors de certaines circonstances météorologiques, la pente de la surface de l'eau augmente fortement et, plus encore, la vitesse du courant. L'énergie disponible peut alors être supérieure à celle correspondant au débit à plein bord. Entre Manaus et l'Atlantique, l'Amazone, qui est le plus grand fleuve du monde, voit sa pente doubler entre les périodes de basses et de hautes eaux. Dans les Pyrénées et les Alpes, l'étude des grandes crues actuelles permet de mettre en évidence l'énorme puissance atteinte lors de l'arrivée des ondes de crue et les modifications brutales et considérables qu'elle provoque dans les lits et dans la granulométrie du matériel transporté. Dans de telles circonstances, la notion de „débit à pleins bords” ne peut plus s'appliquer. A fortiori, les relations statistiques relatives aux paramètres géométriques des lits sont inutilisables: la géométrie des lits change considérablement en quelques minutes en un même point et, au même instant, à quelques dizaines de mètres de distance.

---

<sup>1</sup> Mot construit de manière symétrique à „décrue”, pour désigner la montée des eaux lors de l'arrivée d'une crue.

Enfin, nous ne disposons que de très peu d'observations sur ce qui se passe effectivement lors des crues. Dans les meilleurs cas, quelques témoins ont pu, en un point seulement, voir telle ou telle berge reculer juste avant le débordement ou lors de l'arrivée de l'onde de crue. De telles observations résultent d'un hasard heureux: elles sont toujours ponctuelles et aléatoires, jamais systématiques. De plus, elles ne peuvent être que très partielles et ne peuvent porter que sur les aspects les moins importants de la dynamique: on ne peut rien observer de ce qui se passe sous la surface de l'eau, agitée et trouble, impénétrable à toutes les ondes utilisées actuellement en télédétection, radar compris.

Toutes les recherches reposent sur l'étude des formes du lit et du matériel après la décrue. Or, lors de la décrue, l'énergie disponible décroît considérablement, le plus souvent de manière irrégulière d'ailleurs. Des matériaux de moindre calibre se déposent dans les mouilles, souvent entre des éléments très grossiers qui n'ont pas été transportés et constituent un pavage. Le résultat final, tant le modelé du lit que les alluvions, est une mosaïque élaborée au cours d'une séquence d'événements ayant présenté chacun leurs caractéristiques propres. Il apparaît donc clairement qu'une étude globale des formes (paramètres géométriques du lit) et du matériel (granulométrie des alluvions, nature pétrographique, façonnement, etc.) ne peut donner aucun renseignement valable quant aux débits réalisés pendant la crue. Par contre, comme dans le cas des études de dépôts périglaciaires et glaciaires effectuées par l'Ecole de Łódź, les études fines associant formes et matériel permettent l'établissement d'une séquence dynamique, qui reste nécessairement qualitative.

Les études statistiques conduites aux Etats-Unis ont d'ailleurs montré que:

- la définition du débit à pleins bords est rendue difficile par l'inégale hauteur des berges sur un bief, même court, d'une rivière: l'eau déborde déjà ici alors qu'elle est encore contenue dans le lit mineur à quelques mètres de là;
- les débits à pleins bords ont un temps de retour quelque peu variable, compris entre 1,5 et 2,5 ans en général: ils ne correspondent pas à la crue annuelle, mais à une crue un peu moins fréquente. Il est donc difficile, même pour les phénomènes actuels, de passer du débit à pleins bords à un paramètre hydrologique bien défini, tel que le débit moyen ou celui de la crue annuelle.

Or, les caractères hydrologiques des cours d'eau quaternaires ont été, dans la plupart des régions climatiques du Globe, sensiblement différents de ce qu'ils sont de nos jours. Les caractéristiques du matériel alluvial l'attestent clairement, comme, par exemple, les nombreux gisements alluviaux d'or, de diamants, de pierres précieuses, d'étain, etc. Le plus souvent, les alluvions indiquent qu'il s'est produit, à différentes époques du Quaternaire, des crues plus violentes que les crues actuelles (matériel plus grossier), lors des „pluviaux” des régions sèches et lors des périodes périglaciaires. Le façonnement des versants et les formations de pentes témoignent d'un ruissellement important, auquel il est légitime d'attribuer

un rôle dans la formation de ces crues. L'irrégularité des régimes hydrologiques semble avoir été plus largement répandue que de nos jours, ce qui est à relier avec des différences écologiques. Elle s'est traduite, notamment, par des crues-éclair dont la fréquence ne peut malheureusement pas être précisée actuellement. Ce sont elles qui ont façonné les lits et permis le transport des alluvions qui, comme de nos jours, se sont accumulées en décrue. De plus, les modifications de la végétation ont fait varier un paramètre hydraulique important: la rugosité, qui provoque une dispersion de l'énergie disponible. Dans les régions froides, à fort gel hivernal, les crues de printemps se sont souvent produites, comme de nos jours dans l'Arctique, sur un lit encore recouvert d'une couche de glace automnale, de rugosité très faible, donc permettant la migration de fragments plus grossiers que ceux qui seraient charriés dans le même cours d'eau sous climat tempéré. La formation de congères de neige dans les lits engendrait des barrages cédant ensuite sous la poussée des eaux, provoquant de petites débâcles aptes à balayer le matériel. Tout cela condamne irrémédiablement certaines tentatives imaginées par G. DURY et qui, malheureusement, se poursuivent dans le cadre du Programme de Corrélations Géologiques de l'UNESCO. Elles consistent à calculer des débits à partir des matériaux alluviaux et de la géométrie des lits de cours d'eau de diverses époques quaternaires. Même si l'on pouvait dater avec sûreté à l'année près alluvions et modelé des lits, il n'existe aucune corrélation permettant de tenter de tels calculs. Ce n'est même pas de la science fiction, seulement un raisonnement faux et dénué de bases d'observation.

#### INCERTITUDES ECOLOGIQUES

Sans mésestimer l'intérêt des informations fournies par les analyses polliniques, force est bien de se rappeler qu'elles ne peuvent nous donner que des listes d'espèces correspondant à un territoire d'étendue inconnue. Certes, les palynologistes tiennent compte, dans la mesure du possible, de l'abondance plus ou moins grande des émissions de pollens par les diverses espèces, mais cela ne peut aboutir à des corrections fort précises. De plus, les pollens peuvent être transportés sur de grandes distances: des récoltes actuelles de pollens au Sahara ont porté sur des pollens de plantes soudano-sahéliennes poussant à 2.000 km plus au Sud. De tels pollens, trouvés dans un dépôt quaternaire, aboutiraient à une reconstitution totalement fautive de la végétation: une savane arborée au lieu d'un désert. Or, le transport des pollens par le vent dépend, certes, de la morphologie des pollens eux-mêmes, mais, aussi des conditions météorologiques. Nous sommes à nouveau confrontés au problème, actuellement insoluble, des rapports entre les vents dominants (qui, probablement, sont ceux qui emportent les pollens au loin) et des vents géomorphologiquement efficaces, que nous pouvons

identifier à l'aide des formes et matériaux éoliens. Or, la circulation atmosphérique a changé considérablement au cours du Quaternaire, en liaison avec les oscillations climatiques. Nous pouvons donc dire que l'étendue et la position du territoire ayant contribué à la genèse du spectre pollinique d'une station nous est complètement inconnue. Enfin, une autre incertitude, qui n'est pas des moindres: une liste d'espèces, même avec des abondances relatives, ne nous renseigne guère sur la physionomie de la formation végétale correspondante. Ce spectre pollinique peut provenir de diverses formations végétales juxtaposées dans l'aire d'alimentation, ce que les pollenanalystes décèlent dans certains cas, du fait de l'incompatibilité écologique de certaines espèces. Mais bien souvent, nous sommes dans la plus totale incertitude. En effet, l'existence de combinaisons climatiques différentes de celles qui sont actuellement réalisées à la surface du Globe (pergélisol associé à un régime d'insolation des moyennes latitudes, par exemple) a nécessairement modifié les modalités de la concurrence entre espèces. Certaines ont pu mieux s'adapter que d'autres, dans le cadre d'écotopes définis. Lesquelles? de quelle manière? dans quels types d'écotopes? Nous ne pouvons répondre à aucune de ces questions. Ce n'est pas le mélange de pollens fournis par une région d'étendue inconnue qui nous permet de le faire. Les mêmes réflexions valent aussi pour les organismes planctoniques marins, utilisés pour l'évaluation des températures à l'aide de  $^{18}\text{O}$ . Jusqu'à quelle profondeur vivaient-ils, compte-tenu de différences dans la turbidité des eaux et d'un rapport différent entre la température des eaux superficielles et la radiation solaire? Ces éléments d'incertitude, de nature écologique, n'ont pas été pris en considération par les physiciens effectuant les dosages.

Enfin, même si nous disposions de listes d'espèces végétales correspondant à une biocénose bien définie et bien localisée, une donnée continuerait de nous faire cruellement défaut. C'est le taux de couverture des diverses strates de la végétation. Or, c'est une donnée de toute première importance au plan écodynamique. Elle commande l'interception sous ses deux aspects hydrologique et énergétique. L'importance de l'érosion pluviale et, par son intermédiaire, les parts respectives du ruissellement et de l'infiltration, dépendent des modalités de l'interception des précipitations. L'analyse du système naturel met en évidence les interdépendances entre la photosynthèse et les modalités de la radiation solaire, entre la photosynthèse, la biomasse aérienne, les types de précipitations et l'interception, entre celle-ci et le régime des eaux à la surface du sol et dans le sol, entre l'abondance des débris fournis par la végétation, le climat du sol, son régime hydrique, l'activité des décomposeurs et la pédogénèse, enfin entre tous ces sous-systèmes et la météorisation des roches, leur altération et les processus morphogéniques. Les régimes hydrologiques, le fonctionnement des mécanismes hydrodynamiques, le façonnement des lits fluviaux et les caractères des alluvions qu'on y trouve dépendent de toutes ces interactions, directes et indirectes

L'approche systémique, adoptée depuis un demi-siècle en écologie, nous permet d'identifier les divers sous-systèmes entrant dans le milieu naturel. Elle nous permet, aussi, de définir la structure du système qu'il constitue, c'est à dire les modalités des interactions entre ses divers composants, se traduisant par les flux d'énergie/matière. Mais il n'y a encore que très peu de mesures de flux portant sur l'ensemble de la biocénose d'un écosystème, car de telles mesures sont fort difficiles et fort longues. Nous n'en connaissons aucune qui ait dépassé le cadre de la biocénose pour aborder l'ensemble de l'écosystème, c'est à dire, aussi, le cadre écologique, l'écotope interdépendant de cette biocénose. Si cela n'a pas pu encore être fait sur un écosystème actuel, directement observable, directement mesurable, comment pourrions-nous avoir la moindre chance de succès en tentant de le faire sur des périodes passées du Quaternaire? Utiliser des paramètres actuels, plus ou moins connus de surcroît, pour les transporter dans des conditions du passé mal définies chronologiquement et dont une bonne partie était profondément différente des milieux naturels que nous observons actuellement, est une manifestation d'irresponsabilité intellectuelle qui ne peut que reposer sur une profonde ignorance.

A de telles tentatives, qui ne peuvent qu'induire en erreur et retarder le progrès de nos connaissances, il faut opposer les travaux patients de l'Ecole de Łódź, qui ont abouti à mettre au point de nouvelles méthodes d'observation, de relevé et de description des formations quaternaires de climat froid. Leur minutie et leur précision permettent d'identifier les processus et les mécanismes qui sont à l'origine de leurs caractéristiques. C'est une étape importante du développement des sciences de la Terre, dans laquelle A. DYLIKOWA a joué un rôle capital. En poursuivant les recherches avec les mêmes méthodes sur les autres composants des écosystèmes, nous pouvons espérer aboutir, mais dans un avenir encore assez lointain, à des reconstitutions valables des écosystèmes quaternaires.