

## Utilisation du $^{10}\text{Be}$ produit pour dater la dernière séquence glaciaire dans les monts du centre de l'Europe

JEAN-LUC MERCIER<sup>1</sup>, JAN KALVODA<sup>2</sup>, DIDIER L. BOURLÈS<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Université Louis Pasteur, CEREG UMR 7007, Strasbourg

<sup>2</sup> Université Charles, Faculté des Sciences, Prague

<sup>3</sup> CEREGE, Université Aix Marseille III

**Abstract:** Radiometric dating by the  $^{10}\text{Be}$  method is an essential instrument evolving research of chronodynamics of palaeogeographical changes and geomorphological processes in the Quaternary. The paper describes a geomorphological project using this cosmogenic method for dating of deglaciation of the mountain massifs in the Central Europe.

**Key words:** glacial geomorphology, cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  dating

### 1. Introduction

Un nombre croissant de travaux utilisant les nucléides cosmogéniques produits *in-situ* montrent que la présence du  $^{10}\text{Be}$  dans des échantillons de quartz est particulièrement bien adaptée à l'étude de la datation des surfaces continentales. En particulier des travaux menés en Antarctiques sur les moraines (Brown E. T. et al., 1991, Brook E. J. et al., 1995) ont montré la faisabilité de l'outil, des travaux récents (Gosse J. C. et al., 1995) ont montré que l'on pouvait appliquer la méthode à des roches moutonnées, à des blocs striés et ainsi reconstituer la dynamique d'un glacier. La reconstitution de l'évolution glaciologique peut aussi être réalisée (Brook E. J. et al., 1995) en associant  $^{10}\text{Be}$  à  $^3\text{He}$ ,  $^{26}\text{Al}$ .

L'évolution géomorphologique quaternaire des "massifs anciens" du centre de l'Europe (par exemple Vosges, Forêt Noir; Monts des Géants; Šumava, Tatras) est liée à leur situation géographique, ils ont été soumis à l'influence climatique des deux calottes glaciaires régionales, celle couvrant la Scandinavie et le Nord de l'Europe et celle couvrant le massif alpin. Pour reconstituer l'évolution géomorphologique de cette zone, il est nécessaire de dater les formes glaciaires du relief. Le projet aura des retombées multiples: 1) dater le retrait des langues glaciaires, 2) donner – par vallée – la durée de la dernière englaciation, 3) dater l'extension maximale de certaines langues glaciaires, 4) mesurer la vitesse de la déglaciation, 5) harmoniser et uniformiser les stratigraphies continentales (et régionales), 6) donner une référence temporelle à la tectonique des monts du centre de l'Europe, 7) faciliter une synthèse stratigraphique entre les moraines des glaciers de vallée, les moraines de l'inlandsis Nord-Européen et les terrasses alluviales, 8) permettre une modélisation numérique de l'évolution des paysages prenant en compte tectonique et érosion.

## 2. La méthode

### 2.1 Principes théoriques

L'expression générale de l'évolution en fonction du temps ( $t$ ) de la concentration d'un cosmonucléide produit dans une roche exposée à la profondeur  $x$  ( $\text{g cm}^{-2}$ ), sous une surface subissant une érosion au taux de  $\varepsilon$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{an}^{-1}$ ), est

$$N(x,t) = (Pxe^{-x/L-x} [1 - e^{-t(\varepsilon/L + \lambda)}]) / (\varepsilon/L + \lambda) \quad (1)$$

où  $P$  ( $\text{at g}^{-1} \text{an}^{-1}$ ) représente le taux de production à l'altitude et à la latitude auxquelles la surface a été exposée,  $L$  la longueur d'atténuation du rayonnement cosmique égale à  $\sim 150 \text{ g cm}^{-2}$  et  $\sim 170 \text{ g cm}^{-2}$  dans les solides à, respectivement, hautes et basses latitudes et  $\lambda$  ( $\text{an}^{-1}$ ) la constante de décroissance radioactive (Raisbeck et al. 1984, 1994, Yiou et al., 1986, 1988, Bourlès et al., 1989). Les profondeurs sont exprimées en unités de masse surjacentes par unité de surface, afin de s'affranchir de toute dépendance vis-à-vis de la densité du sol ou de la roche. Si les pertes dues à l'érosion peuvent être négligées, et si l'échantillon étudié n'a subi qu'un seul épisode d'exposition, l'équation (1) permet de calculer une durée d'exposition.

Le taux d'érosion affectant des surfaces datées indépendamment peut être déterminé en mesurant leur concentration en nucléides cosmogéniques produits *in-situ*. D'autre part, après une période d'exposition au rayonnement cosmique relativement longue (environ  $10^5$  ans pour des environnements où l'érosion est rapide ( $\sim 50 \text{ m Ma}^{-1}$ ), les gains dus au rayonnement cosmique équilibrent les pertes induites par l'érosion et la décroissance radioactive, la concentration en cosmonucléides de la surface en cours d'érosion tend alors vers une valeur correspondant à un état stationnaire, dépendant uniquement du taux d'érosion. Ces conditions correspondant à  $t \rightarrow \infty$  et  $x = 0$  et l'équation (1) devient:

$$\varepsilon = Lx(P/N(\infty) - \lambda) \quad (2)$$

Cette relation entre taux d'érosion et concentration de cosmonucléides, associée à l'état stationnaire induit, permet de déterminer des taux d'érosion compris entre  $\sim 1 \text{ m Ma}^{-1}$  et plusieurs  $100 \text{ m Ma}^{-1}$  qui sont ceux généralement rencontrés dans la nature.

L'exploitation à l'échelle globale des possibilités offertes par l'utilisation des nucléides cosmogénique  $^{10}\text{Be}$  et  $^{26}\text{Al}$  produits *in-situ* est favorisé par le fait que le quartz s'avère être le substrat idéal pour de telles études. Particulièrement abondant grâce à sa relative inaltérabilité chimique, il a plus l'avantage de réunir les deux cibles nécessaire à la production *in-situ* de  $^{10}\text{Be}$  et  $^{26}\text{Al}$  (O et Si) et d'être facilement séparable. Enfin, sa structure cristalline, relativement imperméable aux ions et à l'eau, permet de minimiser les effets de diffusion et de contamination.

## 2.2 Application à la détermination d'âges d'exposition

Un ensemble d'études sur la datation de surfaces exposés au rayonnement cosmique a démontré que la détermination d'âges d'exposition avait permis de préciser l'historique des glaciations Quaternaire et Pléistocène dans la région de Dry Valley, en Arctactique, de mesurer des vitesses de mouvements tectoniques et de reconstituer la dynamique d'un glacier en milieu continental.

Outre l'étude de problèmes géologiques fondamentaux qui lui sont associés, la région de Dry Valley en Arctactique a été sélectionnée parce que c'est un désert glacé, ce qui minimise les complications induites par de fréquents cycles gel – dégel, par la formation de sols, et par l'érosion chimique, et en faisant donc un site relativement simple pour valider les techniques de datation des surfaces exposées au rayonnement cosmique (Brown et al., 1989, 1991). De plus, la plupart des échantillons étudiés provenaient de moraines déposées dans Arena Valley, dont la chronologie relative avait été établie lors d'études antérieures. La conjonction de toutes ces propriétés faisant de l'ensemble des échantillons que nous avons analysés au bon test de la méthode de datation par âge d'exposition et les résultats démontrent clairement l'aptitude de cette technique à dater des surfaces géomorphologiques.

De même la datation de surfaces exposés ou transportés par les mouvements tectoniques a permis de quantifier la vitesse de tels mouvements. Dans un climat froid et à des latitudes sensibles aux cycles glaciaire – interglaciaire, on peut considérer l'essentiel de l'érosion, intégrée sur quelques milliers d'années, comme résultant de phénomènes épisodiques. Ces différents événements érosifs, et notamment les épandages quaternaires, apparaissent bien différenciés et surtout relativement préservés d'une érosion postérieure au voisinage des failles actives, le jeu de la faille finissant par isoler le dépôt de la partie amont du drainage. Ainsi, la disposition actuelle des différents épandages en milieu tectoniquement actif résulte finalement de l'interférence de phénomènes climatiques discontinus à l'échelle de 10–100 ka et de phénomènes tectoniques, également discontinus, mais à des échelles de temps inférieures d'un facteur environ 10 (5–10ka). Le rapport de récurrence entre phénomènes climatiques et phénomènes tectoniques met en évidence les différentes crises climatiques. La datation de ces dernières, jointe à la mesure des déplacements subis, donne finalement accès aux vitesses des mouvements tectonique (Ritz et al., 1995).

Lors de leur retrait, les glaciers continentaux laissent apparaître des roches moutonnées striées. Ces dernières correspondent à des roches précédemment profondément enfouies qui ont résisté à l'effet abrasif de l'avancée glaciaire, du fait de leur grande résistance à l'érosion, et qui se retrouvent soudainement, et pour la première fois depuis leur formation, exposées à la surface, et donc au rayonnement cosmique, lors du retrait glaciaire. La mesure de la concentration en  $^{10}\text{Be}$  et  $^{26}\text{Al}$  produits *in-situ* dans de telles roches offrent la possibilité non seulement de dater le retrait glaciaire mais aussi d'en déterminer la vitesse (Gosse et al., 1995). Nous proposons ici d'appliquer cette méthode récemment développée à une nouvelle thématique visant à l'étude de la dernière séquence glaciaire ayant affectée les monts du centre de l'Europe, grâce à la datation des roches moutonnées striées qui représentent une matrice quasi-idéale pour ce type d'étude

puisque leur existence est liée à leur grande résistance à l'érosion et que le processus de leur mise en surface implique un épisode d'exposition au rayonnement cosmique unique.

### 3. L'objet d'étude

Parmi les "massifs anciens" européens, deux d'entre eux (Vosges et Monts des Géants) ont été choisis d'une part en fonction des problématiques géomorphologiques et d'autre part en fonction des commodités d'accès. Pétrographiquement et tectoniquement, les Monts des Géants ressemblent aux Vosges, ils ont été eux aussi soulevés au début du Quaternaire. Des cirques et des moraines semblables y sont observés. L'altitude des cirques est de 1000 à 1200 m et celle des moraines terminales entre 800 et 850 m. Sur le versant nord, la base des cirques est à 700 m. Dans les deux cas, l'âge de la déglaciation n'est pas connue avec précision. Jusqu'à récemment, la datation géomorphologique des formations glaciaires était une datation relative fonction de l'altitude, de la composition pétrographique du matériel, du degré d'altération des moraines et du degré de dégradation des cirques. Vers l'aval, ces formations glaciaires passent fréquemment à des terrasses alluviales. Dater les unes permet de réduire l'incertitude sur l'âge des autres.

La situation géographique des Monts des Géants, situés à la limite de l'inlandsis Nord-Européen, des glaciers de vallée et de la vallée de l'Elbe en fait un site exceptionnel pour harmoniser la stratigraphie continentale. On escompte le même résultat pour les formations glaciaires des Vosges (Mercier et al., 1996) qui sont situées à la mi-distance des moraines terminales alpines du lac de Constance (Graaf, de Jong 1994) et de la Grande Pile (Seret et al., 1990). Nous voulons préciser les modalités de la déglaciation würmienne, ainsi que l'âge des cirques et des moraines que l'on rencontre dans les hautes vallées. La datation des roches moutonnées des vallées glaciaires va enfin lever l'incertitude sur la durée de l'englaciation, la date et la vitesse de disparition de nombreux glaciers de vallée.

L'extension maximale des glaciers est sous la dépendance du bilan glaciaire (donc de l'alimentation neigeuse) et de la dynamique de la glace; ceci est indépendant du maximum du froid à 20 ka comme l'a montré Seret et al. (1990) sur le versant occidental des Vosges. Au contraire, pour le glacier du Rhin, Graaf et de Jong (1994) font correspondre l'extension maximum avec le froid maximum. Les sites que nous souhaitons étudier sont à moins de 50 km de ces deux séries d'observations. La aussi, nos datations peuvent nous permettre d'homogénéiser les nomenclatures et d'harmoniser la stratigraphie continentale de deux sites de référence.

Les Monts des Géants, situés au nord du massif de Bohême sont composés de roches cristallines hercyniennes. Au Paléogène, le massif de Bohême était une surface largement aplanie perturbée par des soulèvements et effondrements liés à la tectonique Saxonienne de la phase alpine. Le soulèvement général du massif a permis l'entaille de vallées profondes à partir du Néogène. Au cours du Pleistocène, les Monts des Géants ainsi que les Tatras ont été plusieurs fois atteints par les marges de la calotte glaciaire Nord-Européenne. Les données fondamentales sur les formes glaciaires des Monts des Géants ont été faites par Králík, Sekyra (1989 a, b). On trouve le plus grand cirque glaciaire au pied du Mont Sněžka (Obří důl), ainsi que dans les vallées situées au nord du Mont

Vysoké kolo. Les Monts des Géants possèdent, en particulier, la source de l'Elbe qui est localisée dans le grand cirque de Labský důl.

Depuis la fin de la dernière période froide, la morphogénèse des monts du centre de l'Europe a été considérablement réduite, l'évolution géomorphologique de la chaîne est très différente de celle que l'on rencontre dans les hautes montagnes au-dessus des neiges permanentes (Kalvoda 1974, 1994). L'absence de chronologie absolue pour les événements glaciaires en Europe Centrale a deux conséquences négatives: l'une sur la stratigraphie du Quaternaire et les études paléo-environnementales qui y sont réalisées, l'autre sur la faiblesse des corrélations entre les stades glaciaires de l'inlandsis Nord-Européen et les stades alpins.

Les variations morphogénétiques dues aux oscillations du climat entre les glaciaires semi-arides froids et les interglaciaires doux et humides associées à un soulèvement tectonique, ont entraîné l'approfondissement du réseau hydrographique de l'Elbe (Balatka, Kalvoda 1995, Kalvoda, Balatka 1995). La confirmation des observations du terrain par des datations absolues permettrait d'associer les monts de Bohême à la stratigraphie de la glaciation continentale Nord-Européenne et d'améliorer nos connaissances sur l'évolution paléogéographique des monts d'Europe Centrale.

#### 4. Conclusion

La datation absolue par la méthode du  $^{10}\text{Be}$  est un outil essentiel pour résoudre des problèmes géologiques et géomorphologiques du Quaternaire. L'inventaire des roches moutonnées, blocs erratiques et moraines terminales des Monts des Géants, Šumava, Kralický Sněžník et Tatras sera réalisé. Dans le massif de Bohême et dans le système Carpathien comme dans les Vosges et les Alpes, se pose alors la question non résolue, des relations entre les glaciers et moraines des vallées, les formations alluviales des vallées secondaires, et le réseau hydrographique continental (Rhin, Elbe). La datation absolue de roches moutonnées, de blocs erratiques et de moraines va là aussi nous apporter des arguments incontournables qui ont manqué à des générations de géomorphologues.

#### Références

- BALATKA, B., KALVODA, J. (1995): Vývoj údolí Labe v Děčínské vrchovině. *Geografie – SČGS*, 100, 3, 173-192.
- BOURLÈS, E. J., RAISBECK, G. M., YIOU, F. (1989):  $^{10}\text{Be}$  and  $^9\text{Be}$  in Marine Sediments and their Potential for Dating. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 443-452.
- BROOK, E. J., KURZ, M. D., ACKERT, R. P., RAISEBECK, G., YIOU, F. (1995): Cosmogenic exposure ages and glacial history for late Quaternary Ross Sea drift in Mc Murdo Sound, Antarctica. – *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 131, 41-56.
- BROWN, E. T., EDMOND, J. M., KURZ, M. D., RAISBECK, G. M., YIOU, F., BOURLÈS, D. (1989): Examination of Surface Exposure Ages of Terminal Moraines with In Situ Produced Berillium-10 – EOS. *Transact. Amer. Geogr. Union*, 70(43), 1081.

- BROWN, E. T., RAISBECK, G. M., BOURLÈS, E. J., KURZ, M. D., EDMOND, J. M. (1991): Examination of Surface Exposure Ages of Antarctic Moraines Using In Situ Produced Beryllium-10 and Aluminium-26. – *Terra*, abstracts, 3(1), 503.
- GOSSE, J. C., KLEIN, J., EVENSON, E. B., LAWN, B., MIDDLETON, R. (1995): Beryllium-10 Dating of the Duration and Retreat of the Last Pinedale Glacial Sequence. *Science* 268, 1329–1333.
- GRAAF, L. W. S. DE, JONG, M. G. G. DE (1994): Notes on the Alpine Rhine Glacier and the chronostratigraphy of the upper Würm. *Med. Rijks Geol. Dienst N.*, 52, 317–330.
- KALVODA, J. (1974): Geomorfologický vývoj hřebenové části Vysokých Tater. *Rozpr. Čs. Akad. Věd, Ř. mat. přír. Věd*, 84, 6, 65 p.
- KALVODA, J. (1994): Rock slopes of the High Tatra Mountains. *Acta Univ. Carol., Geogr.*, XXIX, 2, 13–33.
- KALVODA, J., BALATKA, B. (1995): Chronodynamics of the Labe River Antecedence in the Děčínská vrchovina Highland, Czech Republic. *Acta Montana, ser. A, Geodynamics*, 8(97), 43–60.
- KRÁLÍK, F., SEKYRA, J. (1989a): Kvartérní sedimenty. In J. Chaloupský et al.: *Geologie Krkonoš a Jizerských hor*, 161–171, Praha.
- KRÁLÍK, F., SEKYRA, J. (1989b): Paleogeografický vývoj v terciéru a kvartéru. In J. Chaloupský et al.: *Geologie Krkonoš a Jizerských hor. ÚÚG*, Praha, 171–175.
- MERCIER, J. L., SUGDEN, M., DEBAINE, F. (1996): Conséquences géomorphologiques et tectoniques de la reconstitution de la ligne d'équilibre des glaciers würmiens du versant oriental des Vosges. *Acta Univ. Carol., Geogr.*, XXXI, 2, 33–50.
- RITZ, J. F., BROWN, E. T., BOURLÈS, E. J., PHILIP, H., SCHLUPP, A., RAISBECK, G. M., YIOU, F., ENHTUSHIN, E. (1995): Slip Rates along Active Faults Estimated with Cosmic Ray Exposure Dates: Application to the Bogd Fault, Gobi-Altai, Mongolia. *Geology*, 23, 1019–1023.
- RAISBECK, G. M., YIOU, F., BOURLÈS, E. J., LESTRINGUEZ, J., DEBOFFLE, D. (1984): Measurement of  $^{10}\text{Be}$  with Tanderton Accelerator Operating at 2MV. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, B5, 175–178.
- RAISBECK, G. M., YIOU, F., BOURLÈS, E. J., BROWN, E. T., DEBOFFLE, D., JOUHANNEAU, P., LESTRINGUEZ, J., ZHOU, Z. Q. (1994): The AMS Facility at Gif-sur-Yvette: Progress, Perturbations and Projects. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, B92, 43–46.
- SERET, G., DRICOT, E., WANSARD, G. (1990): Long pollen sequences and the last glaciations from the Southern Alps to the Vosges Mountains. *Nature*, 346, 6283, 453–456.
- YIOU, F., RAISBECK, G. M., BOURLÈS, E. J., LESTRINGUEZ, J., DEBOFFLE, D. (1986): Measurement of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  with a Tanderton Accelerator Mass Spectrometer Facility. *Radiocarbon*, 28(2A), 198–203.
- YIOU, F., RAISBECK, G. M., BOURLÈS, E. J., DEBOFFLE, D., LESTRINGUEZ, J., DEBOFFLE, D., ZHOU, Z. Q. (1988): Measurement of Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ ,  $^7\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  with a Tanderton Accelerator Mass Spectrometer Facility. *Chem. Geol.*, 70, 178.

## VYUŽITÍ METODY $^{10}\text{Be}$ K DATOVÁNÍ NEJMLADŠÍCH GLACIGENNÍCH TVARŮ V POHOŘÍCH STŘEDNÍ EVROPY

### Résumé

Podstatným pokrokem při výzkumech chronodynamiky paleogeografických událostí a geomorfologických procesů v kvartéru je radiometrické datování metodou  $^{10}\text{Be}$ . V práci je popsán geomorfologický projekt využití této metody pro datování konce zalednění v pohořích střední Evropy. Jsou vysvětleny teoretické a experimentální základy metody  $^{10}\text{Be}$  s ohledem na testování možností jejího uplatnění ve vědách o Zemi. Radiometrické datování konce horského zalednění ve střední Evropě metodou  $^{10}\text{Be}$  je prováděno na vzorcích hornin z povrchu „roches moutonnées“, eratických bloků, a morén ve Vogézách, Krkonoších, na Šumavě, Kralickém Sněžníku a v Tatrách.