

Des scories dans les alluvions du bassin de l'Ourthe : origine et utilisation en géomorphologie

Geoffrey Houbrechts

Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale - Département de Géographie - Université de Liège
Quartier Village 4, Clos Mercator, 3 – B11 - Sart-Tilman – 4000 Liège - G.Houbrechts@uliege.be - <http://www.lhgf.uliege.be/>

Des « galets » colorés couverts de vacuoles sont présents dans certains secteurs de l'Ourthe ainsi que dans plusieurs de ses affluents (Somme, Aisne, Lembre, etc.). Ces galets sont des scories, résidus de la transformation du minerai de fer en métal. Elles ont été produites par les nombreuses usines sidérurgiques qui fonctionnaient autrefois dans la région et plus spécialement à proximité de la Calestienne. Les scories constituent un traceur et un marqueur stratigraphique particulièrement intéressant en géomorphologie pour analyser le transport des sédiments, la dynamique des cours d'eau et l'évolution des plaines alluviales.

1. Évolution des techniques sidérurgiques et contraintes de localisation de la sidérurgie ancienne

La métallurgie du fer est apparue dans nos régions vers 500 ans av. J.-C. Depuis l'époque celtique jusqu'au Moyen Âge, le fer était produit dans des bas fourneaux installés à proximité des affleurements de minerai. Dans ces fourneaux, le minerai de fer (qui est généralement un oxyde de fer) était réduit par contact prolongé avec le carbone et transformé en métal forgeable en une seule étape (méthode de réduction directe).

L'aération, qui permettait de maintenir une température élevée au cœur du foyer, était assurée à l'origine par le vent. À l'époque romaine, elle fut améliorée avec l'emploi de soufflets actionnés manuellement. Par la suite, les métallurgistes tentèrent d'accroître la production de fer en augmentant la taille des fourneaux. Toutefois, cette augmentation de volume nécessitait l'utilisation de soufflets de plus en plus puissants. Ainsi, à partir du 14^e siècle, l'utilisation de la roue hydraulique pour actionner les soufflets commença à se généraliser. De plus, le mouvement permanent de la roue permettait d'obtenir des températures suffisamment élevées pour atteindre la phase de fusion, ce qui permit de faire fonctionner le fourneau « en marche continue ». Les fourneaux devinrent alors des hauts fourneaux (fig. 1).

Les hauts fourneaux, qui fonctionnaient toujours au charbon de bois, ne produisaient plus des loupes de fer pâteuses mais de la fonte liquide. La fonte correspond à un alliage de fer et de carbone (plus de 2 %) qui se liquéfie à une température plus basse que le fer, à partir de 1150°C (Corbion, 2003). Les hauts-fourneaux pouvaient produire soit de la fonte grise (avec teneur en carbone élevée) qui était directement utilisée pour produire des objets moulés, soit de la fonte blanche destinée à être ensuite traitée dans une affinerie.



Figure 1 : Le haut fourneau de Hola à Spa en août 1612 peint par Jan Bruegel de Velours. (coll. Galleria Doria Pamphili, Roma)

Pour produire du fer forgeable, il était nécessaire d'éliminer le carbone de la fonte dans des affineries également appelées forges d'affinage. Ces deux étapes expliquent l'appellation «méthode de réduction indirecte». Une des méthodes d'affinage fut mise au point dans nos régions au 15^e siècle. Cette méthode dite «wallonne» s'avéra particulièrement efficace et rentable. La fonte était réchauffée à très haute température dans un foyer d'affinage de manière à oxyder les impuretés et la loupe de fer produite était martelée à l'aide de puissants marteaux (appelés makas en wallon). Ce qui rendait la méthode wallonne spécifique est l'étrépage de la loupe qui était réalisé dans un foyer distinct du foyer d'affinage. A partir du 17^e siècle, la méthode wallonne fut introduite dans de nombreuses régions d'Europe (Suède, Normandie, etc.) et fut utilisée jusqu'au 19^e siècle.

Les principales contraintes de localisation de la métallurgie de fer étaient l'énergie hydraulique et la proximité des sources de matières premières (charbon de bois et minerai).

Les premiers établissements sidérurgiques ont fonctionné sur des ruisseaux dont le débit était facilement maîtrisable (bassins versants inférieurs à 200 km²), puis, à partir du milieu du 16^e siècle, quelques établissements ont été construits sur des cours d'eau importants tels que l'Ourthe ou la Meuse. Le type de roue dépendait principalement de la pente de la rivière mais également du débit disponible. Dans certains cas, les roues étaient installées directement sur le cours d'eau, mais plus généralement, elles étaient alimentées par des biefs.

Pour produire 1000 kg de fonte, 1250 kg de charbon de bois devaient être utilisés et l'affinage de cette quantité de fonte nécessitait encore 1250 kg de charbon de bois (Leboutte, 1979). Ainsi, un haut fourneau du 16^e siècle, qui produisait annuellement de l'ordre de 100 tonnes de fonte (Houbrechts et Weber, 2007), consommait environ 20 ha de taillis par année. La même superficie était nécessaire pour affiner la fonte, ce qui signifie que l'alimentation d'un haut fourneau (ou d'une affinerie) exigeait l'exploitation de 300 à 400 ha (en considérant une période de régénération de 15 à 20 ans). La localisation des anciens sites

sidérurgiques était donc fortement influencée par la répartition des forêts. Le charbon de bois était produit dans des sites appelés charbonnières ou aires de faulde, dont les traces dans le relief sont particulièrement bien mises en évidence sur le Hillshade de la Région wallonne (Hardy et Dufey, 2015).

Les hauts fourneaux consommaient également de grandes quantités de minerai : 2250 kg de minerai pour la production de 1000 kg de fonte (Leboutte, 1979). En Wallonie, les gisements de fer sont extrêmement nombreux dans les terrains primaires et secondaires mais ils sont généralement de faible importance (Denayer et al., 2011). La qualité du fer fabriqué dépendait fortement de celle du minerai. Ainsi, les métallurgistes évitaient d'utiliser du minerai contenant du soufre ou du phosphore car ces éléments rendaient le fer cassant et donc impropre au forgeage.

De nombreux toponymes attestent encore de l'activité minière dans le bassin de l'Ourthe. La carte de Ferraris permet de repérer les «mines de fer» de la fin du 18^e siècle, celle de Vandermaelen, les mines en activité vers 1850 et la carte du «dépôt de la Guerre» (1865-1880), les dernières encore exploitées dans la région. En fonction du type de gisement, les minerais étaient extraits en galeries, par puits ou à ciel ouvert. Les traces de certaines de ces exploitations sont encore visibles dans le relief et facilement repérables sur le LIDAR Hillshade de la Région wallonne (fig. 2). Elles peuvent être parfois confondues avec des dépressions karstiques mais certains critères tels que la présence d'un bourrelet sur le pourtour, leur diamètre et leur espacement permettent de les différencier facilement.

Un des gisements de minerai les plus importants du massif ardennais se situe le long de la Calestienne, au contact des grès de l'Eifelien et des calcaires du Givetien. Il s'agit de limonite dont la formation est post-sédimentaire et qui résulte d'une précipitation de fer au contact du calcaire. De nombreux sites d'extraction ont été identifiés à proximité des villages de Ferrières, d'Izier (fig. 2) mais également dans le Vallon des chantoirs, à Hayen, à la Roche aux Faucons, etc. (Denayer et al., 2011).

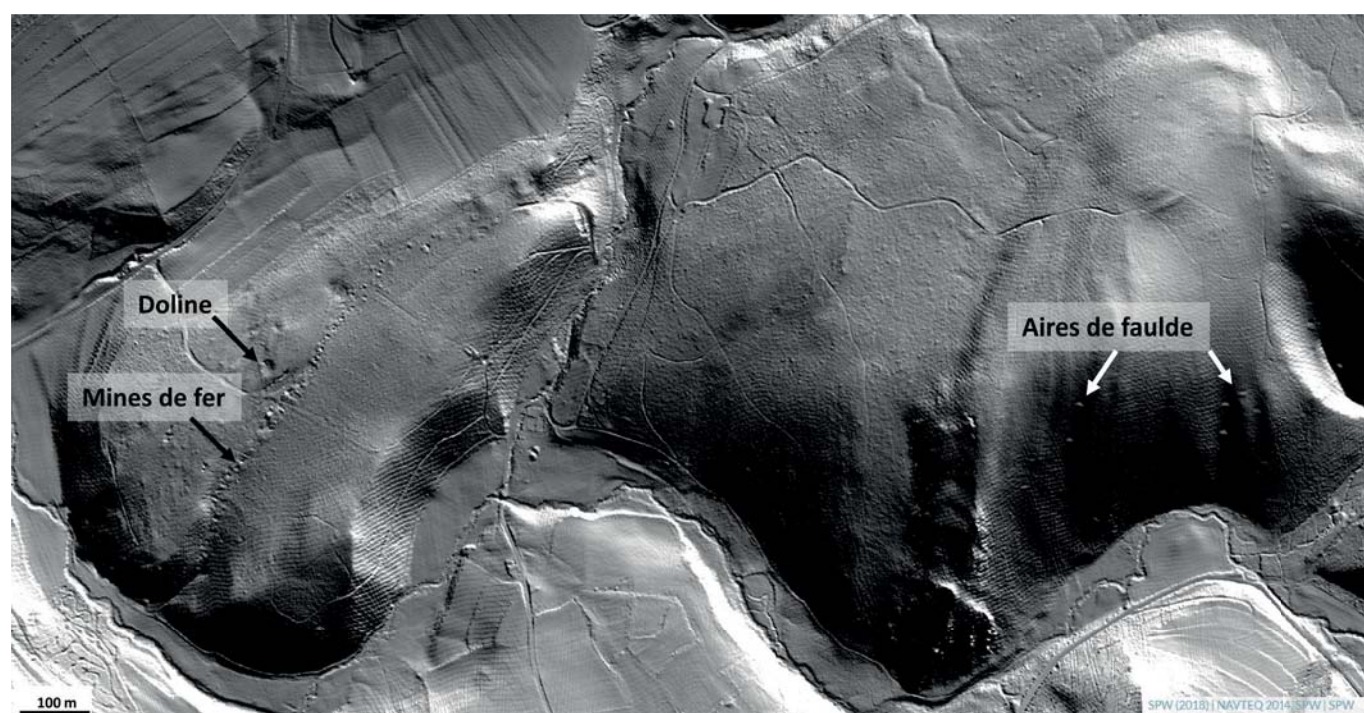


Figure 2 : Traces d'aires de faulde et d'anciennes extractions de minerai de fer le long du gisement situé au contact des calcaires dévoniens dans la vallée du ruisseau du Vieux fourneau (Hillshade, Région wallonne)

2. Origine et caractéristiques des scories

Différents types de scories de la sidérurgie sont présentes dans les alluvions des rivières du massif ardennais. Chacun de ces types correspond à une étape déterminée de la production du fer ainsi qu'à une période spécifique, en fonction des progrès techniques.

2.1. Les scories vitreuses

Les scories les plus fréquentes dans les alluvions sont de couleur verte, noire ou bleue et sont généralement recouvertes de petites vacuoles. Ces scories, également appelées laitiers, étaient produites dans les hauts fourneaux. Elles sont principalement constituées de silice provenant de la gangue du minerai. C'est la présence d'une forte proportion de silice et le refroidissement rapide du laitier qui confèrent aux scories un aspect vitreux.

Une fois durcies, les scories étaient déversées sur des crassiers situés à proximité des hauts fourneaux. Là, des ouvriers les concassaient et les triaient afin de récupérer les nodules de métal. Le concassage des scories était réalisé soit à la masse, soit à l'aide d'un bocard. Cette opération produisait des éclats de scories avec des arêtes vives. Certaines scories présentent des traces d'écoulement qui ont été figées lors de la solidification du laitier. Au même moment, des bulles de gaz étaient piégées à l'intérieur des scories, ce qui explique leur faible densité et la présence de nombreuses vacuoles sur les fragments. Lors du transport par les rivières, ces scories anguleuses, relativement fragiles, acquièrent rapidement un émoussé prononcé (fig. 3).



Figure 3 : scories vitreuses - Lembrée

D'après les données de la littérature, un haut fourneau du 16^e siècle produisait environ 125.000 kg de scories, soit un volume de l'ordre de 85 m³ en considérant une densité de 1,5 (qui tient compte des vides entre les scories dans le crassier) (Houbrechts et Weber, 2007).

2.2. Les scories denses

Des scories noires, plus denses et plus résistantes que les scories vitreuses, peuvent également être repérées dans les alluvions. Hors contexte, l'origine de ces scories, riches en fer, est généralement difficile à déterminer. En effet, elles peuvent avoir été produites à des époques différentes, avec différentes techniques (réduction directe et indirecte), dans différents types d'établissements (bas fourneaux, affineries, etc.).

C'est à proximité des anciennes forges d'affinage que l'on



Figure 4 : scorie dense de forge d'affinage - Ruisseau de Cens (affluent de l'Ourthe occidentale)

trouve le plus grand nombre de scories denses dans les alluvions. Ces scories noires (fig. 4), dont la taille peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, ont une surface lisse ou légèrement rugueuse. Elles présentent également des vacuoles et parfois des traces d'écoulement et/ou des empreintes de charbon de bois. Elles contiennent de 40 à 50 % de fer et sont plus riches que la plupart des minerais (Corbion, 2003). Malgré cette teneur élevée en fer, elles étaient rejetées. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du 19^e siècle que les crassiers ont été exploités intensivement. Plusieurs crassiers de scories denses sont présents dans les vallées du bassin de l'Ourthe (Somme, Aisne, Lembrée, etc.).

2.3. Les sphérules métalliques

Des sphérules métalliques de quelques dizaines de microns de diamètre étaient également produites dans les forges d'affinage, probablement au moment du réchauffage de la fonte ainsi que lors d'opérations de soudure du fer. Ces billes (fig. 5) étaient évacuées par les cheminées et se déposaient autour des sites de production dans un rayon de quelques kilomètres (Richardeau, 1977), notamment sur les plaines alluviales. Ces billes parfaitement sphériques, sont magnétiques et peuvent être facilement extraites des alluvions avec un aimant.

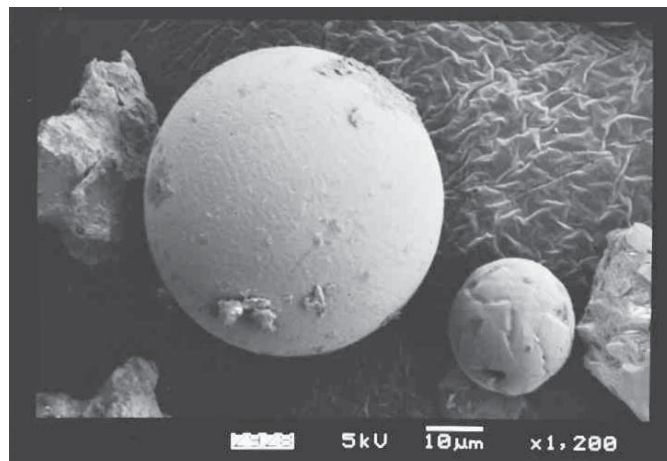


Figure 5 : Sphérules d'origine sidérurgique

3. Utilisation des scories comme traceur pour l'étude du transport de la charge de fond

Peu d'informations existent sur l'avancée généralisée de l'ensemble des sédiments par charriage (transport de matériau sur le fond du lit). En effet, la plupart des études sur le transport de la charge de fond (matériel transporté au contact du fond du lit) portent sur des marquages de galets dont le nombre d'éléments est relativement limité (quelques centaines de galets au

maximum), et sur des périodes relativement courtes (de l'ordre de quelques saisons hydrologiques). Il n'est donc pas possible d'extrapoler les distances parcourues par ces éléments à l'ensemble de la charge de fond, car il existe des sites de piégeage au sein du lit mineur qui peuvent immobiliser les éléments pendant de longues périodes.

Les scories, par contre, représente un traceur approprié pour l'étude du charriage car elles sont présentes en grande quantité dans les alluvions et sont soumises depuis plusieurs siècles aux mêmes conditions hydrosédimentaires que les éléments naturels de la charge de fond. Ainsi, la taille des scories les plus grossières transportées sur de longues distances renseigne sur la compétence des rivières. De plus, lorsque la date de début de fonctionnement d'un site sidérurgique peut être connue grâce aux archives, il est également possible d'utiliser les scories comme traceur pour estimer la vitesse de la progression de la charge de fond des rivières en déterminant la distance maximale d'étalement des scories. Toutefois, les sites de production de scories doivent être suffisamment espacés pour permettre de localiser le front de progression des scories.

Ainsi, dans l'Ourthe, en aval du site sidérurgique de Petit-Han, la distance maximale parcourue par les scories de la charge de fond est comprise entre 9,7 et 12,7 km. Etant donné que le début des rejets de scories se situe vers 1500, il apparaît que la vitesse de progression de la charge de fond est comprise entre 1,9 et 2,5 km/siècle (Houbrechts, 2005). Sur la base de la même démarche, Sluse et Petit (1998) ont montré que la vitesse de progression des scories dans la Rulles et dans la Semois est comprise entre 3,3 et 4,4 km/siècle.

Un autre résultat intéressant a été obtenu sur la Lembrée en aval de Ferrières. Dans le secteur à pertes karstiques (fig. 6), la taille des scories transportées ne présente pas de diminution significative. Ceci démontre que ces pertes, dont les volumes sont certes assez modestes, ne jouent pas de rôle sur la compétence de la rivière en période de crue.



Figure 6 : Lit asséché de la Lembrée en aval de Ferrières dans le secteur à pertes karstiques diffuses. Analyse granulométrique du lit mineur et prélèvement des plus grosses scories transportées depuis le site d'injection.

4. Utilisation des scories comme traceur pour l'étude du transport du sable

Même si les dépôts sableux sont relativement rares à la surface du lit des rivières à substrat caillouteux, la fraction sableuse peut néanmoins représenter plus de 90 % du débit solide de charge de fond. Le sable est notamment présent en grande quantité dans la sous-couche et peut être remanié lors des crues, lorsque la couche protectrice de surface est rompue et mobilisée.

Le problème avec les grains de sable est qu'ils sont difficiles à marquer et encore plus à retrouver. Seules quelques expériences ont été réalisées avec du sable radioactif dans les années 1960 ainsi qu'avec des grains peints à la peinture fluorescente. Toutefois, ces études ne renseignent que sur des périodes relativement courtes (maximum une ou deux saisons hydrologiques) et dans des contextes très particuliers.

Vu que les scories vitreuses sont relativement fragiles, de nombreux éclats de taille millimétrique sont produits lors du charriage en période de crue. Comme les scories grossières, ces éclats peuvent être utilisés pour analyser la vitesse de déplacement du sable.

Les résultats des prélèvements réalisés dans le bassin de l'Ourthe n'ont pas permis de localiser de fronts de progression des scories dans la fraction sableuse à cause de la proximité des sites d'injection de scories, mais une étude réalisée sur la Lesse semble démontrer que la vitesse d'avancée du sable (1 à 2 mm) ne serait que de l'ordre de 10 km/siècle, soit une vitesse à peine 3 à 4 fois supérieure à celle de la charge de fond caillouteuse. Ce résultat étonnant serait lié aux nombreux sites de piégeage potentiels du sable (convexités, levées naturelles, sous-couche, méandres recoupés, etc.) qui tendent à ralentir fortement la vitesse de déplacement de ces éléments sur une échelle de temps plus longue.

5. Utilisation des scories comme traceur pour l'étude des plaines alluviales

L'étude des plaines alluviales et des archives sédimentaires permet de reconstituer les processus morphodynamiques, l'évolution de l'affectation du sol des bassins versants, les phases de fortes productions sédimentaires, liées aux défrichements aux pratiques agricoles, et les paléoclimats. Toutefois, dans ce genre d'études, une des difficultés majeures consiste à dater les sédiments qui ne contiennent pas de matière organique. Les scories, dont l'époque de production peut être déterminée grâce aux sources historiques, peuvent être utilisées comme traceur stratigraphique (Henrottay, 1973). En effet, la présence de scories dans les alluvions indique que ces dépôts sont plus récents que le début de l'activité sidérurgique le long des cours d'eau. Les analyses de concentration en scories permettent de déterminer l'épaisseur de sédiments mis en place par débordement depuis cette époque (fig. 7). Connaissant la date du début de fonctionnement des sites sidérurgiques, il est possible de calculer les taux de sédimentation moyens portant sur une période de plusieurs siècles. Les scories peuvent également être utilisées pour estimer l'importance de la mobilité latérale récente du chenal ainsi que pour dater des variations de niveaux du lit mineur (fig. 7).

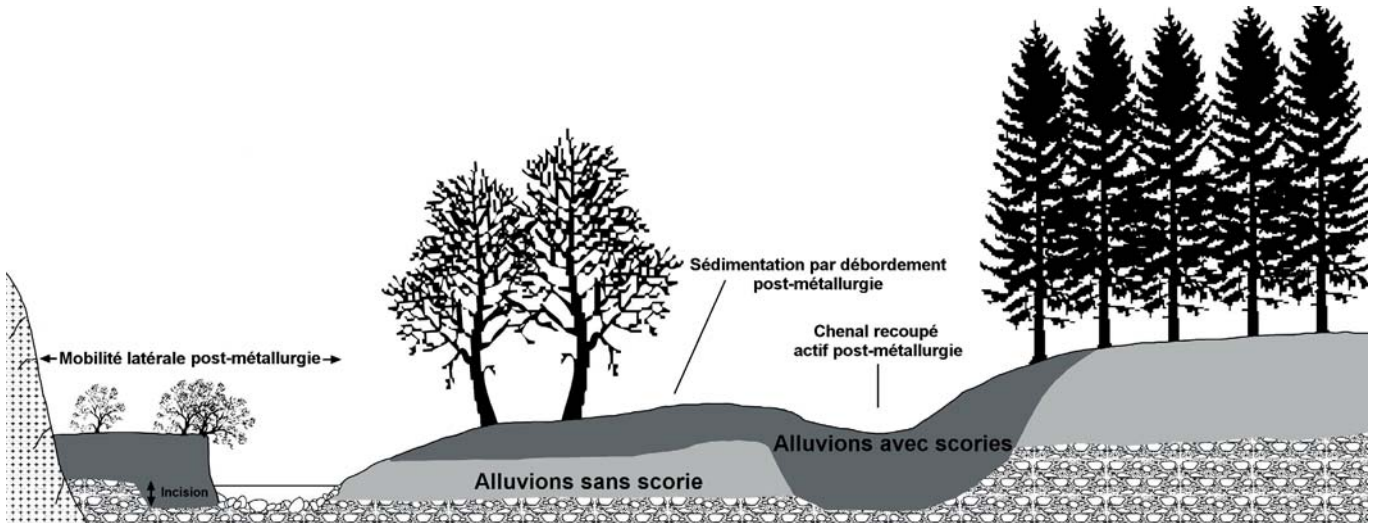


Figure 7 : évolution complexe d'une plaine alluviale depuis l'apparition de l'activité sidérurgique

Les scories ont ainsi été utilisées pour étudier l'évolution des plaines alluviales de l'Ourthe, de l'Aisne, de la Lembre et de nombreux autres cours d'eau de Wallonie. Un exemple intéressant de résultat concerne la vallée de l'Aisne à Juzaine, au niveau de la traversée de la Calestienne.

Le long d'un transect perpendiculaire à la vallée, des échantillons ont été prélevés à la tarière ainsi que par carottage motorisé (fig. 8a et 8b). Le contact entre les dépôts fins (limon-sableux) et le cailloutis a ainsi été identifié et les concentrations en scories et en téphras (minéraux denses d'origine volcanique) ont été analysées (fig. 9).



Figure 8a : carottage motorisé dans la plaine alluviale de l'Aisne

Figure 8b : carotte prélevée à Juzaine (cf. fig. 9) dans la nappe de cailloutis (sondage II, 270-290 cm de profondeur). De nombreuses scories sont présentes dans ce niveau.

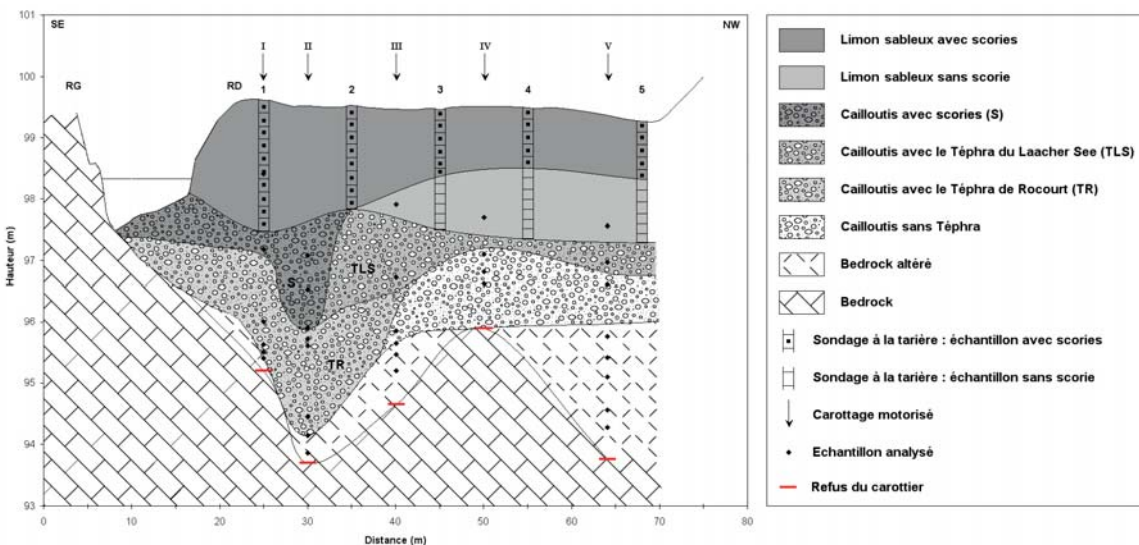


Figure 9 : Coupe transversale de la plaine alluviale de l'Aisne à Juzaine. Synthèse de l'analyse des scories et des téphras.

Les scories (billes métalliques et microscories vitreuses) sont présentes sur toute l'épaisseur des dépôts fins dans les sondages 1 et 2. Cela signifie donc que la rivière s'est déplacée latéralement vers le versant gauche sur un vingtaines de mètres depuis la création d'un haut fourneau juste à l'amont du site vers 1537 AD (Pirotte, 1967). Cette valeur doit être considérée comme minimale étant donné que, la rivière peut avoir effectué des déplacements latéraux dans les deux directions, dans la bande comprise entre le versant et le sondage 2.

Ce profil montre également que le niveau du cailloutis enfoui sous la plaine alluviale est proche de celui du lit mineur actuel. Même si une légère différence de niveau est observée entre les sondages 1 et 2, elle est du même ordre de grandeur que la dénivellée entre les formes actuelles du lit (seuils et mouilles). Le lit niveau altimétrique du lit de l'Aisne à Juzaine n'a donc pas significativement évolué, ce qui signifie qu'il n'y a pas eu d'incision ni exhaussement du lit au cours des derniers siècles.

Dans les sondages 3-4-5, l'épaisseur d'alluvion mise en place par débordement depuis 1537 AD est comprise entre 94 et 109 cm. Il apparaît donc que la vitesse de sédimentation est de l'ordre de 20 cm/siècle. Cette valeur est nettement supérieure à celle observée dans d'autres profils étudiés plus en amont (Houbrechts, 2005). Cette différence est vraisemblablement liée à la position des profils par rapport à la bande calcaire, où l'agriculture s'est développée grâce à la présence de dépôts limoneux relativement épais. Les anciennes pratiques agro-pastorales entraînent probablement des apports de sédiments importants dans les cours d'eau.

Les carottages motorisés ont permis de prélever des échantillons dans le cailloutis enfoui sous les dépôts de plaine alluviale et de localiser le contact entre le bedrock et la base du cailloutis. Les profondeurs atteintes par le carottier varient entre 3,6 et 5,8 m.

Dans les carottes, nous avons analysé l'échantillonnage des graviers, la diversité pétrographique et les concentrations en scories. La recherche de minéraux denses d'origine volcanique (téphras) a également été réalisée sur la fraction granulométrique comprise entre 63-105 µm.

Les résultats des analyses sont très surprenants. Tout d'abord, un manteau d'altération a été identifié au dessus du bedrock « frais ». Les échantillons prélevés dans ces niveaux contiennent de grandes quantités d'argile (probablement des résidus de dissolution) ainsi que des petits cristaux de quartz. Ensuite, il apparaît que l'épaisseur de la nappe de cailloutis varie latéralement. Ainsi, au niveau du sondage II, celle-ci atteint une épaisseur de 3,7 m alors que de part et d'autre, elle est comprise entre 1,6 et 2 m.

La détermination des téphras et des scories s'est révélée particulièrement efficace pour reconstituer la chronologie de mise en place des dépôts. Grâce à ces traceurs, nous pouvons individualiser quatre ensembles.

Ainsi, une partie de la nappe de cailloutis ne contient pas de téphras. Cette absence pourrait signifier que ce cailloutis a été mis en place avant la retombée du téphra de Rocourt (daté du stade isotopique 5, soit vers 80.000 ans).

Les alluvions prélevées à la base des sondages I et II contiennent uniquement des minéraux du téphra de Rocourt et sont donc plus récentes que 80.000 ans. Dans le sondage I, l'échantillon prélevé entre 3,6 et 3,75 m ne contient que 3 minéraux denses du téphra de Rocourt, alors que, dans l'échantillon prélevé entre 4,1 et 4,2 m, nous en avons observé plus de 50. D'après les téphras, il semble donc que ce cailloutis date de la dernière période froide et que certaines parties de ce dépôt, très riches en minéraux du téphra, aient été mises en place à une époque de peu postérieure à la retombée. Comme le suggère l'allure en poche du sommet du bedrock, nous pouvons supposer que ce dépôt a été piégé dans un effondrement karstique, ce qui l'a protégé de l'érosion et du remaniement.

Un troisième ensemble contenant les minéraux denses du téphra du Laacher See (12.900 BP) est identifié au-dessus des deux ensembles précédents. Cette nappe de cailloutis s'est vraisemblablement mise en place lors du Dryas récent, mais peut également avoir été remaniée au cours de l'Holocène.

Le dernier ensemble concerne le cailloutis mis en place après l'apparition de l'activité sidérurgique. Ainsi, dans le sondage I, nous constatons que les scories sont présentes sur environ 50 cm d'épaisseur. Ces scories nous renseignent donc sur l'épaisseur de la couche active lorsque la rivière coulait à l'emplacement de ce sondage. Dans le sondage II, il existe de grandes quantités de scories de taille millimétrique à 1,9 m sous le sommet de la nappe de cailloutis, soit à 3,6 m de profondeur. Deux hypothèses permettent d'expliquer la présence de scories à un niveau aussi bas: (i) Soit le niveau de la rivière s'est exhaussé au cours des derniers siècles, et, dans ce cas, il est étonnant que le sommet du cailloutis soit à la même hauteur de part et d'autre de ce sondage, (ii) Soit un effondrement karstique s'est produit dans le lit de la rivière et a entraîné le piégeage d'éléments caillouteux avec scories sur 1,9 m d'épaisseur. Cette hypothèse semble la plus probable étant donné l'allure du contact avec la roche en place et la préservation d'une poche de cailloutis vraisemblablement mise en place au cours de la dernière période froide. De nombreux phénomènes karstiques ont également été recensés le long de la rivière, dans le massif calcaire de Bretoy.

Conclusion

En conclusion, les scories présentes en grande quantité dans les alluvions des rivières du bassin de l'Ourthe peuvent être utilisées pour de nombreuses applications en géomorphologie fluviale. Ainsi, elles permettent d'analyser le transport de la charge de fond. Les informations de compétence et de distance de charriage fournissent des indications précieuses aux gestionnaires des cours d'eau quand à la gestion des atterrissements et de l'aménagement des rivières. Les scories dans la fraction granulométrique du sable peuvent également être utilisées pour étudier le débit solide des cours d'eau et déterminer la vitesse d'avancée du sable à l'échelle de plusieurs siècles. Enfin, les microscories déposées dans les plaines alluviales permettent de reconstituer les processus morphodynamiques, de déterminer l'impact des modifications d'affectation du sol des bassins versants sur la formation et l'évolution des plaines alluviales. Enfin, étant donné la proximité de la Calestienne par rapport aux nombreux sites sidérurgiques anciens, les scories permettent également de dater les phénomènes karstiques en plaines alluviales (cf. exemple présenté ci-dessus) et d'analyser le transport sédimentaire dans les grottes, notamment sur la Lesse où une étude est actuellement en cours.

Bibliographie

CORBION J., 2003. Le Savoir...Fer, Glossaire du Haut-Fourneau. 4ème édition, 4 vol., 3442 p.

DENAYER J., PACYNA D., BOULVAIN F., 2011. Le minerai de fer en Wallonie, cartographie, histoire et géologie. Service publique de Wallonie, 312 p.

HARDY B., DUFÉY J.E., 2015. Les aires de falde en forêt wallonne: repérage, morphologie et distribution spatiale. *Forêt Nature*, 135 : 19-30.

HENROTTAY J., 1973. La sédimentation de quelques rivières belges au cours des sept derniers siècles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 9: 101-115.

HOUBRECHTS G., 2005. Utilisation des Macroscories et des Microscories en Dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 328 p.

HOUBRECHTS G., WEBER J.-P., 2007. La sidérurgie proto-industrielle dans le bassin de la Lienne. *De la Meuse à l'Ardenne*, 39 : 33-63.

LEBOUTTE R., 1979. La grosse forge wallonne (du XVe au XVIIIe siècle). Editions du Musée de la Vie wallonne, Liège, 53 p.

PIROTTE F., 1967. L'industrie métallurgique de la Terre de Durbuy de 1480 à 1625. Ses rapports avec la métallurgie liégeoise. *Bulletin de l'Institut archéologique liégeois*, 79: 145-210.

RICHARDEAU C., 1977. Distribution de sphérules magnétiques provenant de la sidérurgie liégeoise. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 13 : 155-165.

SLUSE P. ET PETIT F., 1998. Evaluation de la vitesse de déplacement de la charge de fond caillouteuse dans le lit des rivières ardennaises au cours des trois derniers siècles, à partir de l'étude des scories métallurgiques. *Géographie physique et Quaternaire*, 52: 373-380.