

ÉTUDE GÉOMORPHOLOGIQUE DES BARRAGES DE TRAVERTIN DU HOYOUX

Bruno FRANCO, Geoffrey HOUBRECHTS, Jean VAN CAMPEHOUT
Eric HALLOT et François PETIT

Résumé

Dans le Hoyoux, rivière à substratum majoritairement calcaire, la précipitation de carbonates peut se montrer particulièrement active. Localement, à la faveur d'irrégularités du lit de la rivière ou d'embâcles naturelles, les dépôts prennent progressivement de l'importance ; se développent alors des barrages de travertin. Ces édifices calcaires, principalement localisés dans un secteur particulier du cours d'eau, se retrouvent fréquemment regroupés en divers sites adoptant une organisation caractéristique au sein de la rivière. Véritables déversoirs en travers du Hoyoux, les barrages de travertin possèdent une certaine influence sur sa dynamique, notamment par les pertes d'énergie considérables qu'ils peuvent engendrer. Par ailleurs, l'utilisation de scories sidérurgiques rejetées par les établissements de la vallée, d'une part, et la comparaison d'anciennes illustrations des barrages, d'autre part, permettent d'obtenir des informations quant à l'âge et l'évolution de ces constructions calcaires.

Mots-clés

Hoyoux, travertin, barrages, puissance spécifique, scories, encroûtement calcaire

Abstract

In the Hoyoux, which is a river with a predominantly limestone bedrock, carbonate precipitation may be particularly active. As a result of irregularities in the river bed form or in the presence of natural ice jams, limestone deposits gradually grow and form travertine dams. These limestone deposits are mainly located in a particular sector of the Hoyoux and are often grouped into various sites, showing a specific organization in the river. The travertine dams, as a overfall across the Hoyoux, exert some influence on the dynamics of the river, including generating significant losses of energy. In addition the use of slag discharged into the river by former steel on the one hand, and comparison of old pictures of travertine dams on the other hand, can provide information about the age and the development of these limestone deposits.

Keywords

Hoyoux, travertine, dams, specific stream power, steel slag, crusting limestone

INTRODUCTION

De nombreuses définitions du travertin existent dans la littérature (Lohest & Forir, 1903 ; Casanova, 1981 ; Lang, 1981 ; Muxart, 1981 ; Choppy, 1985 ; Ford & Williams, 1989 ; Pentecost, 2004). Elles varient fortement en fonction des domaines de recherche dans lesquels le travertin est considéré. Le travertin peut être défini comme *une roche sédimentaire calcaire continentale, dense, finement cristalline, compacte ou massive, mais fréquemment à l'aspect concrétionné, plus*

ou moins vacuolaire, grise à jaunâtre et grossièrement litée, formée par la précipitation rapide de carbonate de calcium par agitation de l'eau ou par évaporation (Foucault & Raoult, 1980). À cette définition, il convient d'ajouter l'action des algues encroûtantes à l'origine du travertin.

Le terme « tuf » (Weed, 1889) désigne au départ des dépôts de carbonate de calcium formés seulement par évaporation, et est actuellement utilisé pour des dépôts de travertin fortement poreux et spongieux. Néanmoins, il forme un regrettable double emploi avec les

formations pyroclastiques d'origine volcanique. Il faut signaler également des noms locaux attribués au travertin, tels que « pierre de Theux », « cron » (en Gaume) ou encore « tuffeau » (Lohest & Forir, 1903), etc.

Cinq grands dépôts de travertin de fond de vallée sont connus en Belgique (Gullentops & Mullenders, 1972 ; Geurts, 1976) : à Chaumont-Gistoux sur le Train (affluent de rive droite de la Dyle), à Vierset-Barse sur le Hoyoux, à Annevoie-Rouillon le long du ruisseau de Banse-Annevoie (sur la rive gauche de la Meuse), à Treignes sur le ruisseau de Matignolles (affluent de rive gauche du Viroin), et à Villers-devant-Orval sur le ruisseau de Williers (sous-affluent de la Chiers). Ces dépôts sont qualifiés de travertins anciens et se retrouvent en position de terrasse (Gullentops & Mullenders, 1972 ; Geurts, 1976). Dans le dépôt de travertin ancien de la vallée du Hoyoux, divers fossiles ont été signalés par Davreux (1833), Dewalque (1875), Lohest & Forir (1903).

C'est au Boréal que l'édification du travertin était la plus active, grâce surtout à des climats favorables, plus chauds et plus secs. Le travertin s'est formé à partir de la fin du Préboréal, avec l'implantation des forêts denses de pins-bouleaux, nécessaires à une dissolution suffisante des carbonates du sol. L'édification des grands massifs de travertin s'est atténuée, puis arrêtée à la fin de l'Atlantique et au Subboréal, à la suite d'une augmentation de l'humidité et d'une baisse légère de la température (Geurts, 1976).

Aujourd'hui, dans certaines rivières développées sur substratum calcaire (Lorraine, Condroz...), la précipitation de carbonates en solution est relativement importante. Localement, les dépôts croissent fortement et engendrent des barrages de travertin ; c'est le cas de la vallée du Hoyoux dans le Condroz. Dans ce cas, ces précipitations calcaires sont qualifiées de travertin actuel (Geurts, 1976). À l'heure actuelle, ce phénomène

reste néanmoins peu courant à l'échelle de la Belgique. En effet, seuls quelques dépôts de travertin de rivière très localisés et de faibles dimensions existent en Lorraine (Gullentops & Mullenders, 1972 ; Geurts, 1976), mais aucune mention n'est faite dans la littérature de barrages de travertin dans d'autres rivières du Condroz (Samson, Bocq, Molinee...).

Disposés transversalement dans la rivière, ces barrages calcaires engendrent des cascades. Certains d'entre eux particulièrement développés provoquent une véritable cassure du plan d'eau qui se traduit par des chutes qui peuvent atteindre 1 m. Ces dernières entraînent d'importantes déperditions d'énergie, ce qui diminue la compétence de la rivière. Dans certains secteurs, le cours du Hoyoux se scinde en plusieurs bras et délimite localement des îlots alluvionnaires ou résiduels. Au sein de tels sites, les barrages de travertin sont nombreux, diversifiés et peuvent atteindre d'importantes dimensions. Bien que très localisés en Belgique, ces barrages de travertin ne sont toutefois sans commune mesure avec les immenses précipitations de travertin qui existent dans le monde. En Croatie par exemple, dans la vallée de la rivière Korana, d'importants barrages de travertin, dont certains s'élèvent sur une hauteur de plus de 30 m, ont engendré les 14 lacs Plitvice sur un secteur long de 6,5 km (Ford & Williams, 1989).

Par ailleurs, nous pouvons retrouver sur les rives du Hoyoux et de certains de ses affluents des scories sidérurgiques, témoins de l'ancienne activité industrielle de la vallée (Discry, 1971 ; Hansotte, 1984). En effet, au XVI^e et XVII^e siècle, certains de ces sites ont rejeté des scories dans la rivière dont des éclats peuvent se faire emprisonner par les barrages de travertin et être incorporés à leur structure. Ces éléments sidérurgiques vont nous apporter des informations quant à l'âge et à la croissance des barrages de travertin.

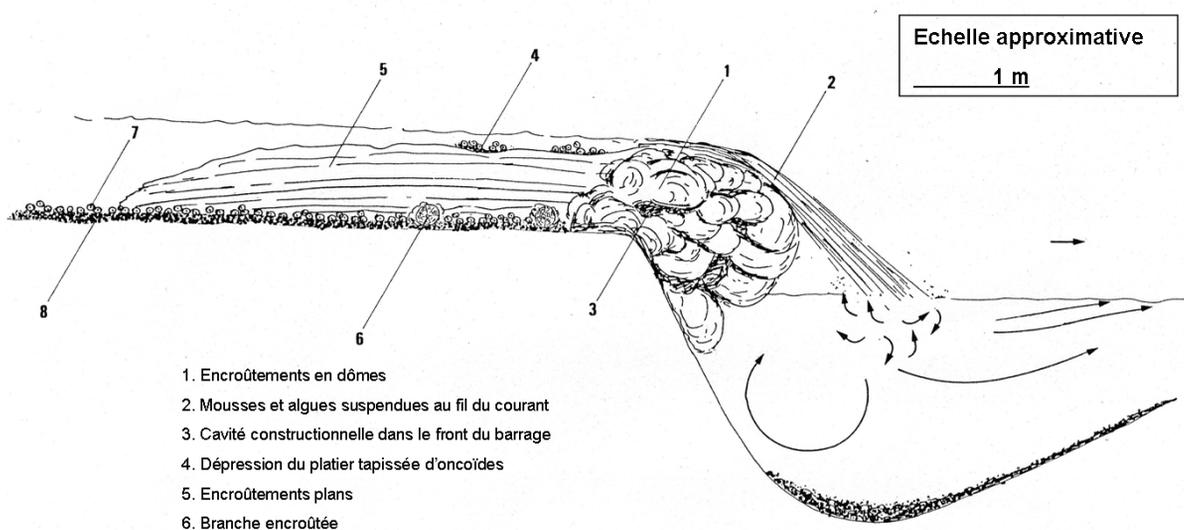


Figure 1. Schéma du profil général d'un barrage de travertin du Hoyoux, d'après LANUIT (1984)

I. LE BARRAGE DE TRAVERTIN

A. Description

Le profil type d'un barrage de travertin simple de la vallée du Hoyoux est présenté à la figure 1. Il se compose de deux parties relativement bien distinctes dont les proportions peuvent varier d'un site à l'autre : le front à l'aval et le platier à l'amont. Le front se forme à partir d'une irrégularité qui est à l'origine de la précipitation calcaire ; il présente un développement vertical et horizontal en couches enroulées dans le sens du courant (structure en « dômes »). Fixés à la surface du front du barrage qui assure la chute d'eau via sa crête, des organismes incrustants profitent des excellentes conditions d'oxygénation qui règnent dans le fil du courant. Le platier quant à lui, entièrement immergé, se développe à partir de la crête du barrage vers l'amont, généralement sur quelques mètres. Ces couches de travertin subhorizontales constituent une contre-pente plus ou moins douce vers la crête du barrage (Lespineux, 1903 ; Casanova, 1981 ; Lanuit, 1984 ; Pentecost, 2004).

B. Processus de formation

En milieu fluvial, dans les régions calcaires, la précipitation de carbonates peut survenir lorsque la concentration en ions Ca^{++} et HCO_3^- augmente suffisamment, que la pression partielle de CO_2 diminue, ou que la température s'élève (Ek, 1973 ; Muxart, 1981 ; Ek, 1994). À la faveur d'obstacles ou de ruptures de pente sur le fond du lit, les conditions de turbulence et d'oxygénation des eaux favorisent le développement de concrétions calcaires (Ek, 1973 ; Muxart, 1981 ; Pentecost, 2004). L'activité d'organismes incrustants comme des algues et des mousses vient s'ajouter à ces conditions physico-chimiques (Adolphe, 1981 ; Pentecost, 2004).

Le dépôt prend progressivement de l'importance et finalement se développent de véritables déversoirs en travers de la rivière ; il s'agit du processus de formation des barrages de travertin. Outre les nombreux paramètres physico-chimiques (température, pH de la rivière, pouvoir germinatif...), les facteurs favorables à l'édification de ces dépôts calcaires dépendent également des caractéristiques locales, comme la présence d'embâcles végétaux ou une rupture de pente créée par un banc plus résistant dans le fond du lit de la rivière (Muxart, 1981 ; Ford & Williams, 1989 ; Pentecost, 2004).

II. LOCALISATION DES BARRAGES DE TRAVERTIN DU HOYOUX

A. Secteur d'étude et localisation des barrages

Le réseau hydrographique en treillis est typique de ceux que l'on retrouve dans le Condroz : le Hoyoux, rivière conséquente, s'écoule approximativement du sud sud-est vers le nord nord-ouest en recoupant par surimposition autant les roches tendres que les roches plus résistantes du Condroz et de l'Ardenne condruzienne, pour se jeter dans la Meuse à Huy (Figure 2 et Figure 3). Par contre, les nombreux petits affluents du Hoyoux ont adopté une orientation subséquente en se développant dans les roches solubles des synclinaux calcaires carbonifères caractéristiques du Condroz. Au niveau des crêtes anticlinales, la vallée du Hoyoux est extrêmement étroite, par contre, à hauteur d'un synclinal calcaire, celle-ci a tendance à s'élargir et à s'évaser légèrement (Seret, 1960).

Les barrages de travertin du Hoyoux se localisent essentiellement dans un secteur déterminé, entre Pont-de-Bonne et le lieu-dit Régissa, ainsi que dans le cours inférieur du ruisseau de Triffois, un affluent du Hoyoux

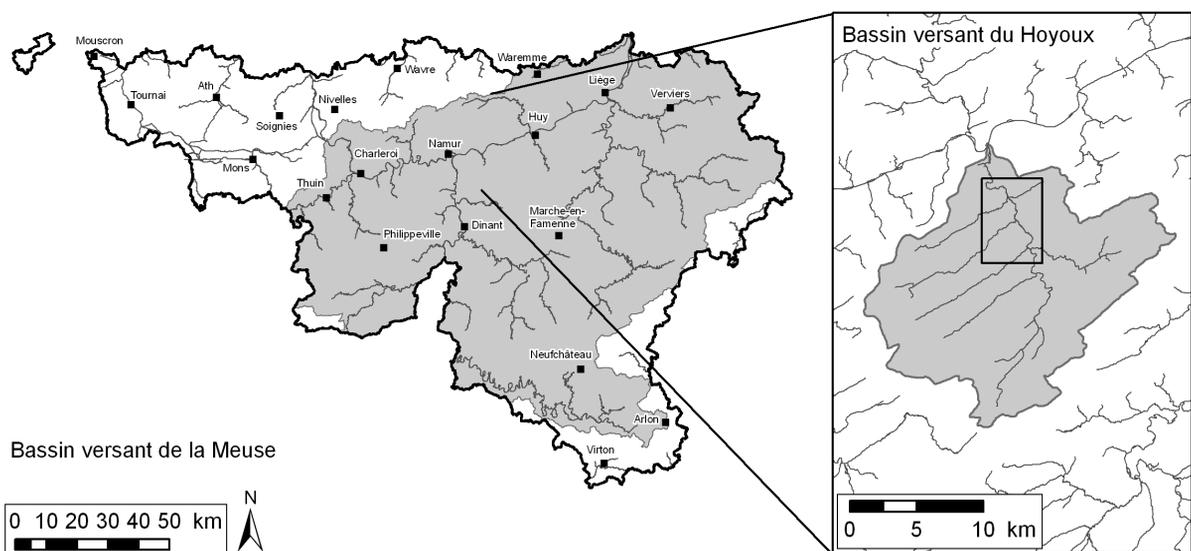
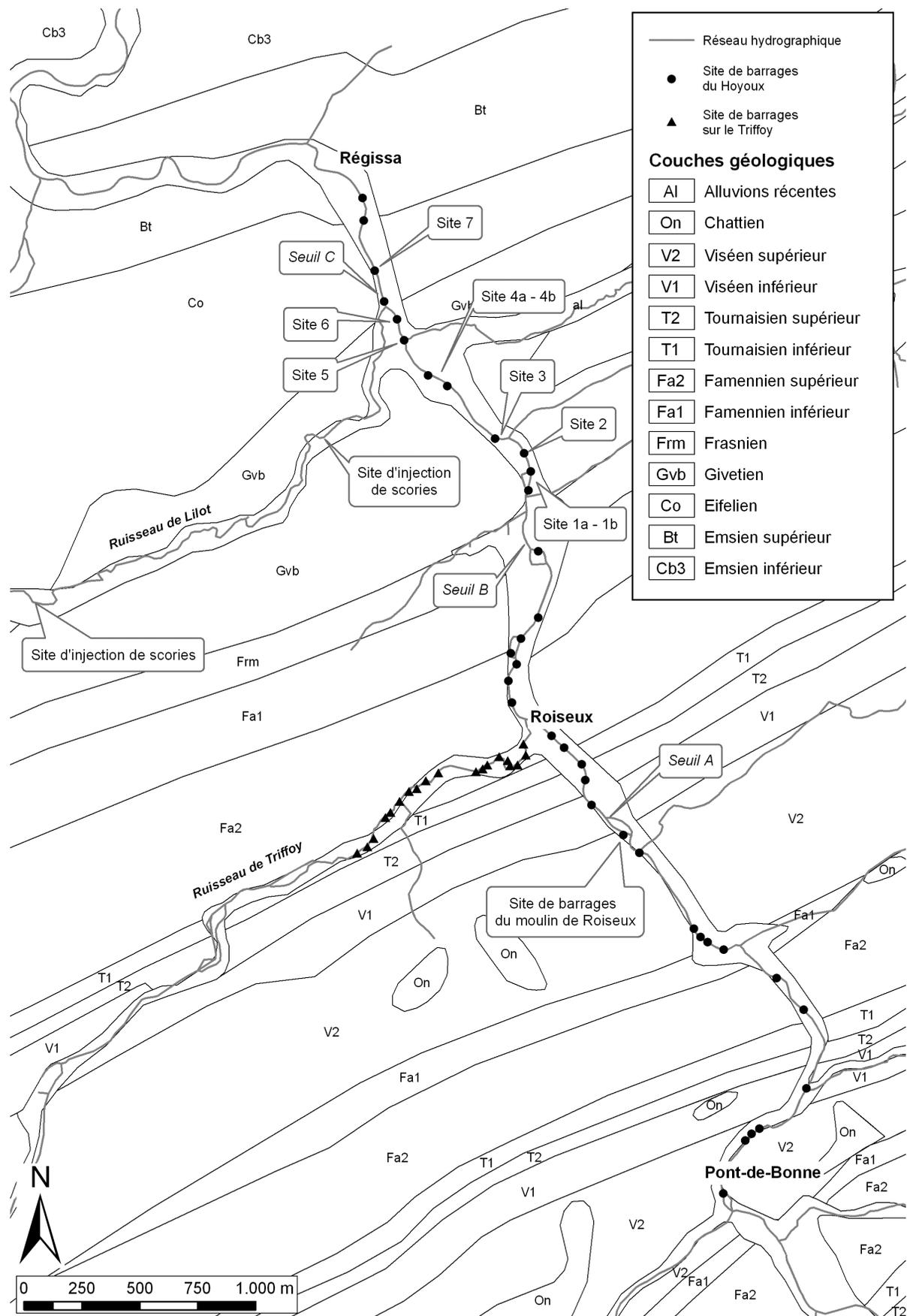


Figure 2. Bassin versant de la Meuse en Wallonie et bassin versant du Hoyoux avec délimitation du secteur à barrages de travertin



rive gauche (Figure 2 et Figure 3). Il existe également quelques barrages plus en amont dans le Hoyoux, à hauteur de Modave (Lohest & Forir, 1903 ; Lanuit, 1984). Le tronçon que nous étudions présente non seulement une concentration importante de barrages, mais il offre également un bel éventail de différents types de barrages de travertin (voir point suivant).

Au vu de la figure 3, il reste difficile d'expliquer la localisation précise de chaque barrage de travertin en fonction de la géologie. Il semble donc que les facteurs favorables à leur édification dépendent avant tout des conditions de turbulence de l'eau (via la présence d'embâcles naturels et de ruptures de pente), mais aussi des nombreux paramètres physico-chimiques qui interviennent dans la précipitation des carbonates (Ek, 1973 ; Adolphe, 1981 ; Muxart, 1981 ; Ek, 1994 ; Pentecost, 2004), même si tous ces facteurs sont eux-mêmes influencés par la géologie de la région.

Toutefois, Roiseux (Figure 3) correspond à la limite nord du dernier synclinal calcaire carbonifère du Condroz, et en aval la vallée s'encaisse davantage et ne s'élargit pratiquement plus, même lors de la traversée des calcaires du Dévonien moyen (Seret, 1960). La limite aval de ces barrages apparaît clairement en relation avec la géologie : dès que le Hoyoux pénètre dans les formations du Dévonien inférieur, nous ne retrouvons plus aucune trace de dépôts de travertin actuel dans le fond de la rivière.

Enfin, Discry (1971) renseigne la décision en 1891 de la Compagnie Intercommunale des Eaux de capter les

eaux de Modave. Par la suite, de nombreux autres captages d'eaux se sont implantés plus en amont dans le Hoyoux, ainsi que dans ses affluents se trouvant dans les synclinaux calcaires. Tous ces captages ont progressivement abaissé le débit de base du Hoyoux, ce qui pourrait constituer un facteur favorable à l'édification des barrages de travertin en aval de Pont-de-Bonne.

B. Typologie des sites de barrages

Une typologie simple a été établie afin de caractériser les barrages de travertin. On constate sur le terrain qu'ils s'organisent généralement en groupes, que nous allons qualifier de « sites », puisque ces barrages exercent une certaine influence les uns sur les autres au sein de ceux-ci. Il paraît important à ce titre de les considérer comme des ensembles s'inscrivant dans la rivière. Les barrages isolés constituent également des « sites » à eux seuls en raison de leur influence sur la rivière, qui se répercute sur plusieurs mètres en amont comme en aval. Sur le Hoyoux, entre Pont-de-Bonne et Régissa, nous dénombrons pas moins de 36 sites, pour un total de près de 80 barrages. Ces groupements sont classés en 4 catégories, *simple*, *double* et *triple*, suivant le nombre de barrages qui s'y individualisent, et enfin *complexe*, en fonction de l'importance des ramifications des barrages et de leur organisation particulière (Figure 4).

Comme leur nom l'indique, les sites doubles et triples sont composés de 2 ou 3 barrages bien distincts qui se

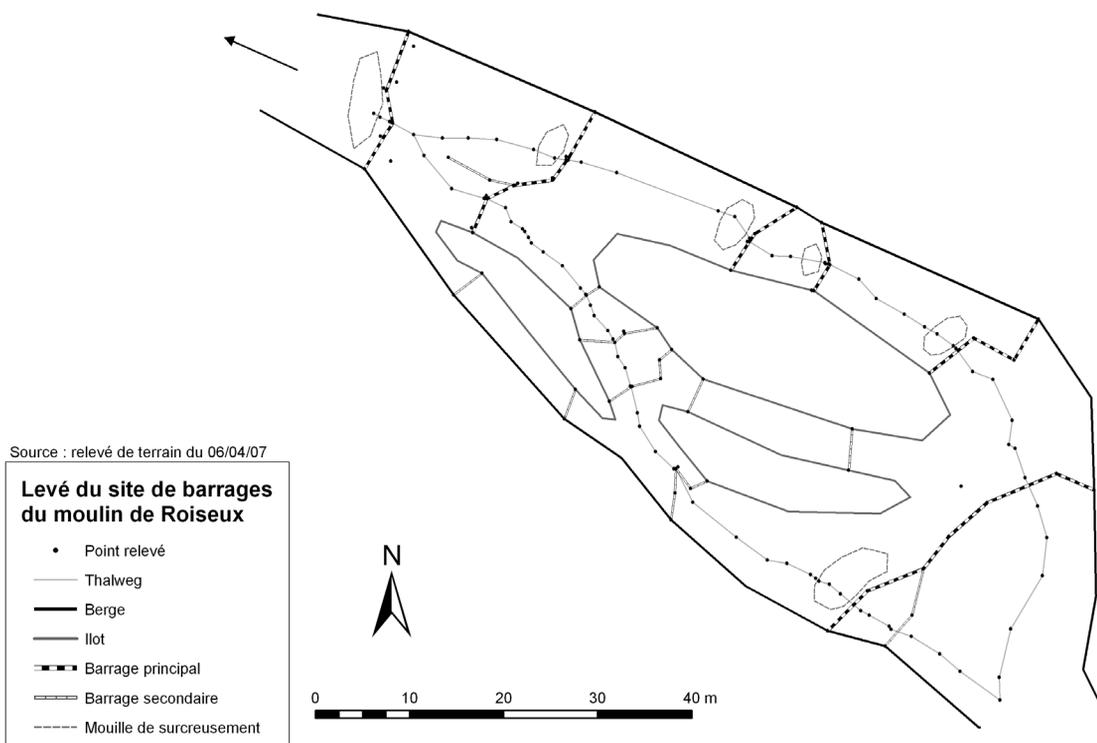


Figure 4. Relevé du site complexe de barrages du moulin de Roiseux. Les îlots alluvionnaires délimitent des biefs bien distincts, entrecoupés par des barrages de travertin. Localisation à la figure 3.

font suite immédiatement. Ceux-ci ont généralement tendance à se placer de façon relativement transversale à la direction d'écoulement, en adoptant un tracé marqué toutefois par quelques cassures et une moindre courbure que les barrages isolés, et sont distants de 10 à 30 m les uns des autres. Au-delà d'une trentaine de mètres d'espacement entre les crêtes principales respectives, on peut considérer que deux barrages deviennent indépendants l'un de l'autre ; ils passent ainsi outre de leur zone d'influence respective et constituent deux sites simples.

Les sites complexes (Figure 4) comprennent de nombreux barrages de travertin, parfois imbriqués les uns dans les autres, et sont responsables d'un certain élargissement de la rivière (d'une largeur d'une dizaine de mètres en secteur calme, le Hoyoux peut passer à près de 30 m de large au niveau de tels sites). Les barrages au sein de ceux-ci diffèrent fréquemment les uns des autres ; nous y observons des barrages si petits qu'ils n'émergent pas, côtoyant les barrages les plus développés du Hoyoux (avec un front d'une hauteur de 2 m). Sur la figure 4, on peut voir que l'organisation au sein des sites complexes paraît relativement aléatoire, mais elle répond souvent au même schéma de base. Tout d'abord, les différents barrages tendent à s'articuler à partir d'un barrage particulièrement développé (mais qui n'est pas toujours présent) situé dans la partie amont du site. Ensuite, des îlots alluvionnaires divisent fréquemment le site en deux ou trois biefs distincts (mais qui incluent régulièrement d'autres chenaux), d'importance similaire, au sein desquels l'énergie de la rivière est dissipée de deux manières différentes. Dans le premier cas, une succession de petits barrages engendrent une suite de cascades mineures, mais la somme de celles-ci représente une importante déperdition d'énergie. Dans le second cas, un nombre restreint de barrages beaucoup plus développés provoquent la même déperdition d'énergie par leur plus grande chute d'eau.

C. Répartition des barrages

La figure 5 représente la répartition des différents sites de barrages (en fonction de leur catégorie) depuis Pont-de-Bonne jusque Régissa. Sur le Hoyoux, les sites de barrages se font de plus en plus nombreux au fur et à mesure que l'on progresse vers l'aval, surtout à partir de Roiseux. De plus, la majorité des sites dans la moitié amont de ce secteur sont des sites simples, alors que dans la moitié aval nous n'en retrouvons pratiquement pas. Par ailleurs, l'espacement entre les sites tend à se réduire de plus en plus en progressant vers l'aval, et nous rencontrons des sites de catégorie de plus en plus importante, toujours vers l'aval. Au vu de ce graphique, il est assez difficile de tirer une logique précise d'organisation ; il semble à première vue qu'il n'y ait pas de réelle cyclicité dans la localisation des barrages. Cependant, la répétition des sites confère au secteur compris entre Pont-de-Bonne et Régissa une certaine organisation en *step pool system*. En effet, les sites de barrages agissent comme des *steps* à écoulement torrentiel, qui délimitent eux-mêmes des tronçons rectilignes beaucoup plus calmes et à pente faible, des *pools*.

Entre le 3^e et le 4^e km du Hoyoux en aval de Pont-de-Bonne, nous remarquons une concentration importante de sites de barrages à hauteur de Roiseux. Ce tronçon correspond à la traversée d'un anticlinal de roches résistantes du Famennien supérieur (Figure 3 ; Fa2) ; il est envisageable que des blocs de grandes dimensions sur le fond du lit du Hoyoux, par les conditions de turbulence et d'oxygénation qu'ils engendrent, constituent des obstacles favorables à l'édification des barrages de travertin.

En totalisant toutes les chutes d'eau engendrées par les barrages de travertin entre Pont-de-Bonne et Régissa, nous obtenons une dénivellée du plan d'eau d'environ 21 m. Or, dans ce secteur du Hoyoux, il y a approxi-

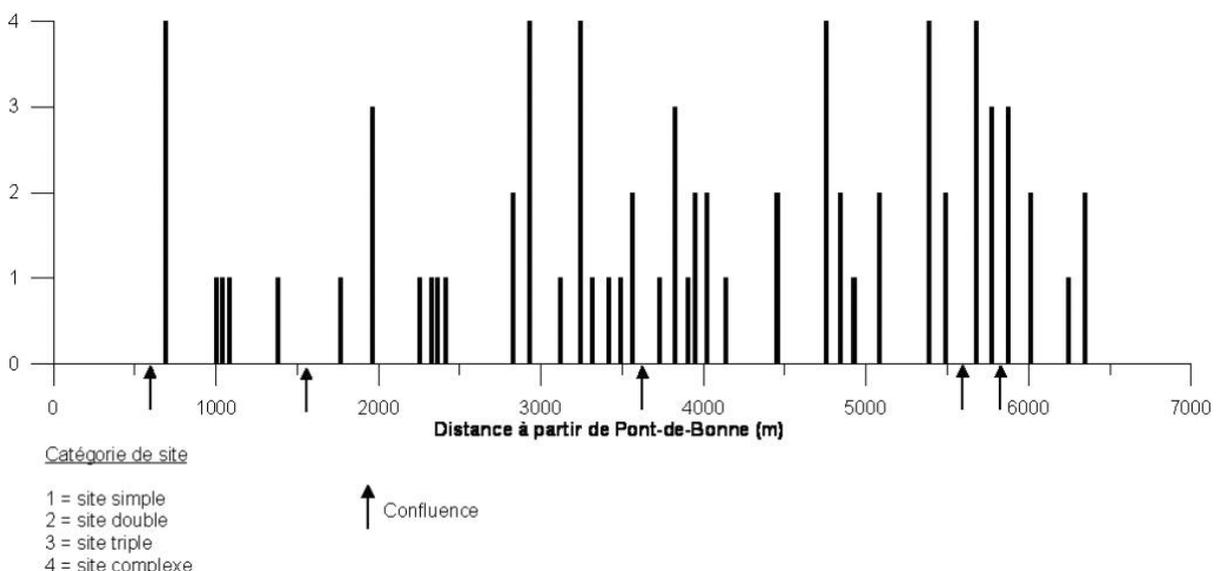


Figure 5. Répartition des sites de barrages de Pont-de-Bonne à Régissa en fonction de leur catégorie

mativement 45 m de différences d'altitude. Cette comparaison est à considérer avec beaucoup de prudence (en raison des difficultés rencontrées lors des prises de mesures au niveau des déversoirs des barrages), mais elle permet néanmoins de comprendre l'ampleur de la chute d'eau totale provoquée par les barrages de travertin dans ce secteur.

III. INFLUENCE DES BARRAGES SUR LES PERTES D'ÉNERGIE ET LA COMPÉTENCE DU HOYOUX

A. Méthodologie

La puissance spécifique (ω exprimée en W/m^2) d'une rivière correspond à l'énergie disponible par unité de surface du lit et permet donc d'estimer l'énergie dépensée par cette rivière pour transporter une particule d'un point à un autre. La relation employée est la suivante :

$$\omega = (\rho \cdot g \cdot Q_b \cdot S_w) / W_b$$

avec ρ la masse volumique du fluide (en kg/m^3), g l'accélération de la pesanteur (en m/s^2), Q_b est la valeur du débit au plein bord (en m^3/s), S_w la pente du plan d'eau (en m/m) et W_b la largeur au plein bord (en m).

La valeur du débit à plein bord ($Q_b = 16,5 m^3/s$) pour le Hoyoux nous est fournie à la station de Marchin (Petit *et al.*, 2005), située au lieu-dit Régissa, à environ 1 km en aval des groupes de barrages que nous étudions. Étant donné que le Hoyoux a déjà reçu la quasi-totalité de ses affluents à ce niveau, nous pouvons considérer cette valeur à la station comme significative par rapport au bassin versant. Par contre, la pente du plan d'eau (S_w)

a été calculée pour chaque site ou secteur à partir des valeurs obtenues lors des relevés ; il s'agit donc d'une pente moyenne. Nous réalisons en fait une approximation car S_w n'est pas calculée forcément pour le Q_b , et varie normalement avec le débit. Toutefois, dans ce cas-ci, nous n'avons à notre disposition que cette valeur de débit au plein bord. Enfin, la largeur au plein bord (W_b) a été calculée sur le terrain en réalisant la moyenne de multiples largeurs prises à intervalle régulier dans le cas des secteurs entre les groupes de barrages, et dans le cas des sites de barrages en effectuant la moyenne des largeurs du site prises au niveau de chaque barrage le composant.

B. Évolution longitudinale des puissances spécifiques

La figure 6 montre le dénivelé (dZ) et la puissance spécifique (ω) pour les sites de barrages numérotés de 1a-1b à 7 (Figure 3), ainsi que pour les secteurs intercalés entre ces sites successifs de barrages. Nous remarquons immédiatement l'importante différence entre la puissance spécifique au sein d'un site de barrages et celle d'un secteur intercalé entre deux de ces sites. En effet, en moyenne pour ces sites de barrages, nous obtenons une valeur élevée de $105 W/m^2$, mais seulement $28 W/m^2$ en moyenne pour tous les secteurs compris entre ces groupements de barrages. Toutefois, il apparaît également d'importantes différences de puissance spécifique entre les divers sites de barrages, et de la même manière entre les secteurs intermédiaires.

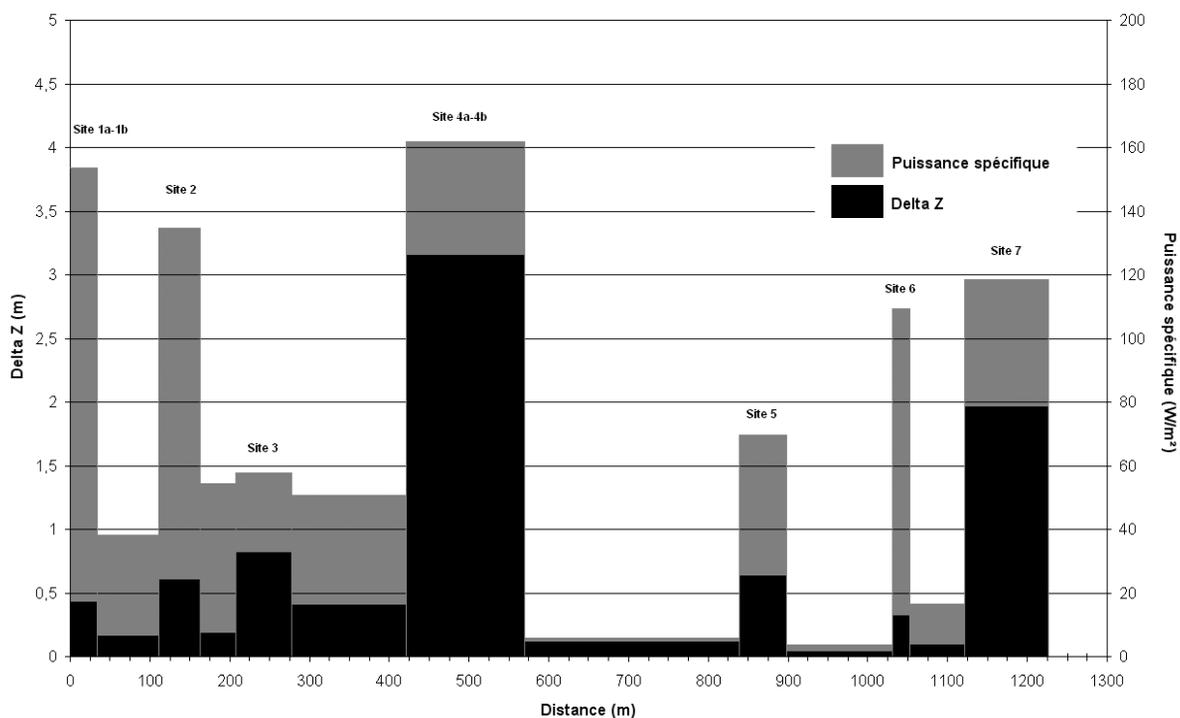


Figure 6. Dénivelé (dZ) et puissance spécifique (W/m^2) des sites de barrages et des secteurs intermédiaires d'un tronçon du Hoyoux

Les plus hautes valeurs sont atteintes par des sites complexes, 4a-4b et le site de barrages du moulin de Roiseux (Figure 3), avec respectivement 162 et 173 W/m² ; ces deux sites contiennent tous les deux un barrage extrêmement développé qui assure à lui seul plus de la moitié de l'importante chute totale du plan d'eau du site, et qui doit utiliser une quantité considérable d'énergie. En règle générale, les sites de barrages de travertin possèdent une plus grande largeur de la rivière que les secteurs intermédiaires, ce qui devrait les désavantager en termes de puissance spécifique, mais le paramètre dominant reste avant tout l'importance de la chute du plan d'eau (dZ) que représentent ces barrages, engendrant de ce fait une puissance spécifique relativement élevée mais généralement sur une courte distance (Figure 6). Concernant les secteurs intercalés entre les sites de barrages, le paramètre majeur de différenciation avec ces derniers est sans conteste la pente moyenne du plan d'eau ; elle est de l'ordre du cm/m pour les sites de barrages, et du mm/m pour les secteurs intercalés. Néanmoins, malgré cette différence d'échelle, les puissances spécifiques peuvent parfois se montrer relativement élevées pour ce type de section régulière et à eau calme. La raison principale tient en la faible largeur moyenne au dénominateur de la formule, ce qui a pour effet direct d'augmenter la puissance spécifique pour ces secteurs.

La pente moyenne du plan d'eau du tronçon du Hoyoux délimité par les sites 1a-1b et 7 est de 0,73 % (une pente très forte pour une rivière de Belgique), alors que les pentes des secteurs intermédiaires, beaucoup plus faibles, sont comprises entre 0,03 % et 0,21 %. Ainsi, 89 % du dénivelé total de ce tronçon se concentre au niveau des sites de barrages de travertin. De plus, avec une largeur à plein bord moyenne (Wb) de ces sites de 11,20 m et un débit à plein bord (Qb) de 16,5 m³/s, la puissance spécifique moyenne (ω) de ces sites de barrages de travertin est de 105 W/m². Cette puissance spécifique devrait théoriquement permettre à la rivière de mobiliser un D₅₀ de 65 mm. Toutefois, entre ces sites de barrages sont compris des secteurs intermédiaires avec des puissances spécifiques beaucoup plus faibles, allant même jusqu'à seulement 4 W/m². Il en résulte un arrêt du transit de la charge de fond et une accumulation au niveau de ces secteurs à très faible puissance spécifique.

Si on considère que le tronçon du Hoyoux sur lequel nous avons réalisé ces calculs, long d'environ 1 200 m, se montre significatif de la situation existante dans la section du Hoyoux au sein de laquelle se présentent les barrages (c'est-à-dire entre Pont-de-Bonne et le lieu-dit Régissa), nous pouvons supposer que les barrages de travertin dépensent une part importante de l'énergie de la rivière. Toutefois, l'espacement entre les sites a tendance à s'agrandir vers l'amont du secteur (Figure 5), à proximité de Pont-de-Bonne, et les sites de barrages perdent progressivement en importance ; il est donc envisageable que la différence de puissance spécifique

entre un site de barrages et un secteur intercalé soit moindre, mais toujours significative. Néanmoins, ce n'est pas pour autant que certains sites en amont ne dépensent pas une énergie importante. En effet, le site de barrages du moulin de Roiseux (Figure 3) par exemple, un des sites de barrages les plus en amont, possède une puissance spécifique considérable de 173 W/m² ; celle-ci représente d'ailleurs la valeur la plus élevée obtenue pour tous les sites que nous avons relevés.

C. Influence sur la compétence du Hoyoux

Le Hoyoux est l'affluent de la Meuse dont la pente longitudinale moyenne est la plus forte (Vereestraeten, 1970). Cependant, une grande partie de l'énergie est dépensée dans les chutes des barrages de travertin, si bien qu'entre les barrages, le Hoyoux ne dispose plus que de très peu d'énergie pour déplacer sa charge de fond, s'inciser, éroder...

De plus, une partie considérable des éléments du lit de la rivière est encroûtée par des précipitations de travertin. Cette croûte calcaire se présente en quelque sorte comme un agglomérat de nodules de travertin à la surface des galets. Composés de matériel majoritairement grossier, les seuils eux-mêmes constituent en quelque sorte des barrages à l'écoulement en périodes de basses eaux, et peuvent réunir les conditions nécessaires (bonne oxygénation de l'eau, mouvements de turbulence...) à la précipitation d'origine physico-chimique du travertin. En général, ce type de croûte calcaire ne peut se développer que sur les éléments qui restent relativement immobiles suffisamment longtemps sur le lit de la rivière, c'est-à-dire les galets les plus gros. En effet, plus un élément est grossier, plus les tensions de cisaillement nécessaires à sa mise en mouvement seront élevées, et donc moins fréquentes. Dans ces conditions, la précipitation de calcaire pourra recouvrir l'entièreté de la surface exposée, sur une certaine épaisseur (qui ne dépasse généralement pas 3 à 4 mm). Par contre, les éléments non affectés par l'encroûtement calcaire, c'est-à-dire les plus fins, sont fréquemment remis en mouvement.

À ce titre, nous avons cherché à connaître la taille des galets à partir de laquelle un encroûtement peut avoir lieu. Au niveau de trois seuils du Hoyoux (Figure 3), entre Pont-de-Bonne et Régissa, nous avons prélevé au hasard une centaine de galets par site, mesuré leur axe b et noté la présence ou non d'une croûte de travertin.

La figure 7 reprend les proportions de galets présentant une croûte de travertin par classe granulométrique. Les galets dont l'axe b mesure entre 16 et 20 mm commencent à devenir suffisamment grossiers pour qu'ils puissent rester immobiles assez longtemps afin de se faire encroûter efficacement par du travertin. Par ailleurs, en dessous d'un axe b de 10 mm, les éléments sont beaucoup trop mobiles pour servir de support au développement d'une croûte calcaire. À l'inverse, à partir de matériaux de 30 mm approximativement, les conditions

favorables à ce type de processus semblent réunies. De plus, il semble que la taille d'apparition de cette croûte se décale progressivement vers les plus grandes dimensions de galets d'amont en aval. Ainsi, les éléments d'une taille donnée sont de plus en plus fréquemment mis en mouvement vers l'aval, et donc constituent un support moins stable pour permettre le développement d'une croûte de travertin. Ceci pourrait s'expliquer en partie par l'augmentation du débit liée aux apports des affluents et des sources de fond de vallée.

IV. ETUDE DE L'ÉVOLUTION DES BARRAGES

A. Méthodologie

Les scories de la sidérurgie pré-industrielle ont été utilisées comme marqueurs stratigraphiques pour l'étude des plaines alluviales, ou pour estimer la progression de la charge de fond des rivières (Houbrechts, 2005). Dans cette étude, nous les avons employées afin de dater les barrages de travertin. Durant leur transport

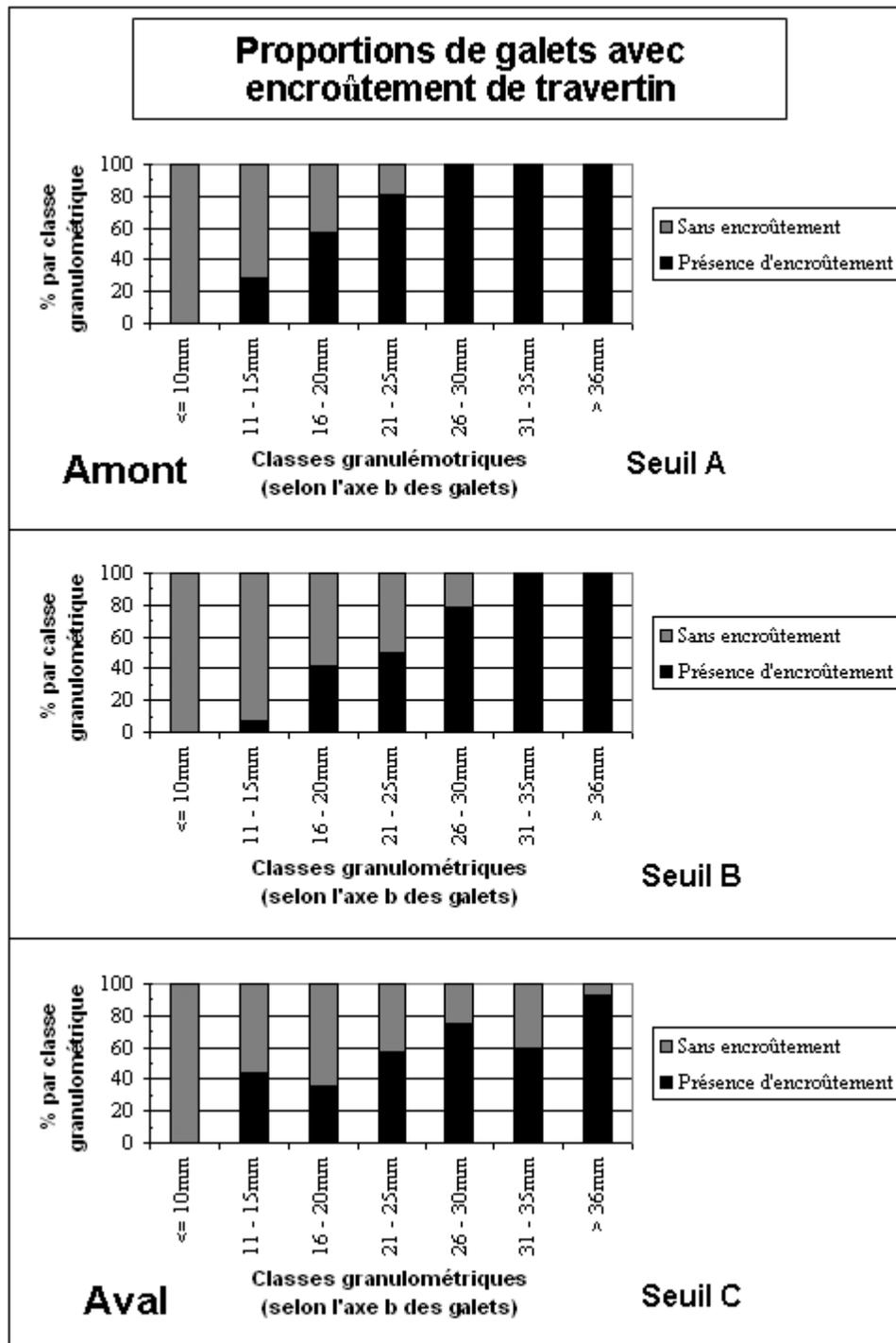


Figure 7. Proportions de galets présentant une croûte calcaire au niveau de 3 seuils du Hoyoux

dans la rivière, les scories produisent de petits éclats (microscories) à la suite des chocs qu'elles subissent ; nous allons montrer que certains de ces éclats peuvent se faire incorporer au travertin de barrage et permettre de dater la partie du barrage plus récente que les premiers rejets de scories.

Nous avons prélevé plusieurs carottes de travertin d'une longueur maximale d'une trentaine de centimètres (souvent moins en fonction de l'importance de la déstructuration du travertin lors du forage) et d'environ 5 cm de diamètre, au niveau de deux sites de barrages situés en aval des sites d'injection vérifiée de scories (Figure 3). Chaque carotte a été découpée transversalement en différentes sections d'environ 4 cm de longueur. Par après, ces morceaux ont été dissous à l'acide chlorhydrique pur à froid. Une fois la dissolution terminée, les résidus ont finalement été tamisés à 212 et 53 μm de manière à obtenir trois fractions pour chaque échantillon. La fraction supérieure à 212 μm est la plus intéressante puisqu'elle représente la classe idéale pour rechercher à la loupe binoculaire les fragments de scories qui nous intéressent (Houbrechts, 2005). Celle comprise entre 212 et 53 μm peut également contenir des fragments de scories, mais surtout nous pouvons y retrouver des sphérules magnétiques également issues des anciennes activités sidérurgiques de la vallée. Enfin, la fraction inférieure à 53 μm est essentiellement composée de particules de loess et d'argiles remaniées.

La période d'activité des anciens sites sidérurgiques qui ont produit et injecté des scories dans le Hoyoux est connue grâce aux sources historiques (notes du fourneau St-Michel). Elle s'étend de la première moitié du XVI^e jusqu'au début du XVII^e siècle. Ainsi, en fonction de la présence ou de l'absence d'éclats de scories dans le travertin, nous obtenons des informations intéressantes quant à l'âge et à l'évolution des barrages.

B. Résultats

Plusieurs industries métallurgiques, essentiellement des forges et des hauts fourneaux, implantées le long du ruisseau de Triffois et du ruisseau de Lilot (Figure 3), ont fonctionné entre la moitié du XVI^e et le début du XVII^e siècle. Après des recherches sur le terrain, il s'est avéré que seuls deux sites mentionnés ont rejetés des scories vitreuses dans le ruisseau de Lilot (aucune véritable injection n'est perceptible dans le ruisseau de Triffois). Cependant, sur l'ensemble du secteur du Hoyoux comprenant les barrages de travertin, nous retrouvons quelques scories denses dont l'origine exacte reste relativement inconnue.

À la suite de la dissolution de différents échantillons prélevés sur des barrages, il s'est avéré que le travertin était capable d'emprisonner dans sa structure poreuse des éléments détritiques au cours de sa croissance, tels que des grains bien émoussés, ou encore des cristaux de calcite (avec un émoussé bien visible au microscope). Parmi ces résidus, dans la fraction supérieure à 212 μm ,

nous retrouvons également des scories vitreuses, des scories denses et des sphérules magnétiques. De plus, ces éléments étant en proportions variables selon les barrages analysés, ou encore selon les sections d'une même carotte, ils ont permis de montrer que la concentration en grains détritiques incorporés dans le travertin dépendait fortement des différences de structure, de cohérence et de porosité de ce dernier ; un travertin massif, peu poreux et à structure dense, s'avère relativement inapte à emprisonner des éléments étrangers au sein du barrage.

Aucun échantillon de travertin prélevé dans des barrages situés à l'amont de la confluence du Hoyoux avec le ruisseau de Lilot ne présente de scories vitreuses dans les résidus, mais tous contiennent plus ou moins la même proportion de scories denses et de sphérules magnétiques. Comme ces échantillons ont été prélevés jusqu'à 30 cm de profondeur au sein du barrage, autant verticalement qu'horizontalement, la présence de ces éléments montrent que toute cette épaisseur de travertin analysée n'a pu se développer qu'après le début de l'industrie métallurgique dans la vallée du Hoyoux, c'est-à-dire à partir de la seconde moitié du XVI^e siècle. La présence abondante de scories vitreuses en concentration accrue jusqu'à la base de barrages de travertin, à l'aval de la confluence du Hoyoux avec le ruisseau de Lilot, laisse supposer que l'entièreté de ces barrages s'est mise en place après le début de l'activité sidérurgique le long de ce ruisseau, durant la première moitié du XVI^e siècle. Malheureusement, le fait que l'on ne retrouve pas au sein d'une même carotte des sections avec scories et des sections sans scories nous empêche d'être plus précis quant à la datation de ces barrages.

Toutefois, cette méthode particulière d'analyse de la croissance des barrages de travertin a montré qu'elle pouvait fournir des informations intéressantes, mais également qu'elle permettait déjà une première estimation de l'âge de ces barrages de travertin. La détermination de l'origine des scories denses et des sphérules magnétiques, ainsi qu'un équipement permettant de forer jusqu'à la base des grands barrages, apporteraient sûrement des réponses supplémentaires.

C. Apports complémentaires

Il est possible de retrouver aujourd'hui toute une série d'anciennes cartes postales datant du début du XX^e siècle qui illustrent les « cascades du Hoyoux », c'est-à-dire les barrages de travertin. À partir des cachets postaux et des timbres, nous connaissons relativement bien la période à laquelle ont été prises ces photographies : fin XIX^e et début XX^e siècle (la plus ancienne date de 1899). Après des recherches sur le terrain, la plupart des sites figurant sur ces cartes postales ont été identifiés, et de nouvelles photographies ont été prises sous les mêmes angles afin de réaliser une comparaison et d'étudier l'évolution des barrages de travertin représentés (Figure 8).



Figure 8. En haut, illustration de carte postale (début XX^e siècle) du sites de barrages du moulin de Roiseux ; en bas, photographie récente

Ainsi, en un siècle, il reste difficile de quantifier l'évolution générale des barrages de travertin. La morphologie principale des différents barrages était déjà bien en place au début du siècle dernier, et seuls quelques changements mineurs sont réellement perceptibles (en l'espace d'un siècle, de telles modifications ne sont toutefois pas négligeables). Par contre, de nombreux barrages semblent évoluer plutôt par le développement de ramifications, d'excroissances et de crêtes secondaires. Celles-ci montrent que les barrages de travertin sont capables de croître rapidement et qu'ils poursuivent donc actuellement leur développement.

Enfin, à la suite de recherches sur le terrain, nous avons retrouvé des objets *récents* (une bouilloire métallique, de la vaisselle, des armatures métalliques...) encroûtés dans le travertin de barrage. Ils nous fournissent une preuve supplémentaire de la croissance du travertin au cours du XX^e siècle et montrent donc que la plupart de ces barrages sont toujours actifs aujourd'hui.

CONCLUSION

Localisés préférentiellement dans un secteur déterminé de la vallée du Hoyoux, entre Pont-de-Bonne et le lieu-dit Régissa, les barrages de travertin forment, isolément ou en groupes, des sites plus ou moins étendus suivant la longueur des barrages mais aussi suivant l'importance de leur impact sur la rivière. À ce titre, une typologie de ces sites a été établie en fonction du nombre de barrages constitutifs et de leur organisation au sein de ces groupements.

Les pertes d'énergie du Hoyoux sont avant tout localisées au niveau des barrages, par les chutes d'eau parfois très importantes qu'ils engendrent. Ainsi, entre Pont-de-Bonne et Régissa, la rivière se comporte en quelque sorte comme un « *step pool system* », caractérisé par une succession de secteurs réguliers à très faible compétence, et de sites de barrages qui consomment une quantité considérable d'énergie. Les barrages de

travertin agissent donc fortement sur le transport de la charge de fond du Hoyoux, réduisant considérablement la compétence de la rivière dans les secteurs intermédiaires qu'ils délimitent, et ralentissant la progression de la charge de fond.

Des échantillons prélevés dans les barrages ont permis de montrer tout d'abord que le travertin était capable d'incorporer à sa structure des éléments transportés par la rivière, au cours de sa croissance. De plus, la présence dans ces échantillons d'éclats de scories sidérurgiques, dont l'origine et la période de production sont relativement bien connues, démontre que les parties de barrages analysées n'ont pu se former qu'après le début des activités sidérurgiques dans la vallée, c'est-à-dire à partir de la moitié du XVI^e siècle. Par ailleurs, la comparaison de la situation actuelle avec d'anciennes illustrations figurant sur des cartes postales montre que les barrages étaient pour la plupart déjà bien en place au début des années 1900, même s'ils sont toujours relativement actifs aujourd'hui.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leurs plus vifs remerciements à C. Ek pour les remarques constructives qu'il a émises lors de la relecture de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- ADOLPHE J.-P. 1981. Exemples de contribution microorganiques dans les constructions carbonatées continentales, *Formations carbonatées externes. Tufts et travertins*. Association Française de Karstologie, Paris, pp. 15-25.
- CASANOVA J. 1981. Morphologie et biolithogenèse des barrages de travertins, *Formations carbonatées externes. Tufts et travertins*. Association Française de Karstologie, Paris, pp. 45-54.
- CHOPPY J. 1985. Phénomènes karstiques, *Dictionnaire de spéléologie physique et karstologie*. Club Alpin Français, Paris, 53 p.
- DISCRY F. 1970. Le passé industriel de notre ville, *Le Miroir de Huy*, 14, pp. 45-46.
- DISCRY F. 1971. L'ancien statut de l'énergie hydraulique, *Annales du 40^e Congrès de la Fédération archéologique et historique de Belgique*, Institut archéologique liégeois, Liège, 2, pp. 523-528.
- EK C. 1973. La dissolution du carbonate de calcium, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, Liège, 9, pp. 55-87.
- EK C. 1994. *Les phénomènes karstiques*. Notes de cours, Liège, 30 p.
- FORD D. & WILLIAMS P. 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*, London : University Press, Cambridge, 601 p.
- GEURTS M.A. 1975. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Thèse de Doctorat en sciences géographiques, *Université catholique de Louvain*, 483 p.
- GULLENTOPS F. & MULLENDERS W. 1972. Age et formation de dépôts de tuf calcaire holocène en Belgique, *Les congrès et colloques de l'Université de Liège*, Liège, 67, pp. 113-135.
- HANSOTTE G. 1973. Contribution à l'histoire de la métallurgie du Hoyoux, *Bulletin de l'Institut archéologique liégeois*, Liège, 80, 59 p.
- HOUBRECHTS G. 2005. Utilisation des macroscories et microscories en dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais (Belgique). Thèse de Doctorat en Sciences géographiques, *Université de Liège*, 328 p.
- LANG J. 1981. *Cadre de la classification des carbonates continentaux, Formations carbonatées externes. Tufts et travertins*. Association Française de Karstologie, Paris, pp. 101-110.
- LANUIT G. 1984. Étude biosédimentologique et pétrographique des travertins du Hoyoux, Mémoire de Licence en Sciences géologiques et minéralogiques, Université de Liège, 107 p.
- LESPINEUX G. 1903. Observations sur les cascades de la vallée du Hoyoux, *Annales de la Société géologique de Belgique*. XXVIII, pp. 160-162.
- LOHEST M. & FORIR H. 1903. Les cascades de Barse et le tuf du Hoyoux, *Annales de la Société géologique de Belgique*, XXVIII, pp. 155-160.
- MUXART T. 1981. Rappel des principaux facteurs conditionnant la précipitation des carbonates en milieu continental, *Formations carbonatées externes. Tufts et travertins*. Association Française de Karstologie, Paris, pp. 119-126.
- PENTECOST A. 2004. *Travertine*, Springer, Berlin, 445 p.
- PETIT F., HALLOT E., HOUBRECHTS G. & MOLS J. 2005. Évaluation des puissances spécifiques de rivières de Moyenne et Haute Belgique, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, Liège, 43, pp. 37-50.
- SERET G. 1960. L'encaissement du Hoyoux depuis la fin de l'ère tertiaire, *Annales de la Société géologique de Belgique*. 84, pp. 199-210.

Adresse des auteurs :

Bruno FRANCO
 Bruno.Franco@ulg.ac.be
 Geoffrey HOUBRECHTS
 G.Houbrechts@ulg.ac.be
 Jean VAN CAMPENHOUT
 Jean.VanCampenhout@ulg.ac.be
 Eric HALLOT
 Eric.Hallot@ulg.ac.be
 François PETIT
 Francois.Petit@ulg.ac.be
 Géographie physique
 Université de Liège
 Allée du 6 Août, 2 – B11, Sart Tilman
 B-4000 Liège