

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LA DÉLIMITATION DES ESPACES DE LIBERTÉ DES RIVIÈRES DU MASSIF ARDENNAIS

Jean-Philippe SNIJDERS, Eric HALLOT, Geoffrey HOUBRECHTS et François PETIT

Résumé

Dans les schémas départementaux d'aménagement et de gestion des cours d'eau (France), le concept d'espace de liberté des cours d'eau, introduit en 1991, attribue à la rivière un espace de mobilité propre, de manière à restaurer la dynamique naturelle d'érosion des berges. Une partie de la méthodologie proposée repose sur l'utilisation de documents cartographiques anciens en vue de déterminer les espaces de divagation historique des cours d'eau. Cette démarche a été appliquée à différentes rivières du massif ardennais (Ourthe, Amblève, Semois, Rulles). Les espaces de mobilité obtenus pour ces rivières étant assez réduits, il a été nécessaire de prendre en considération les erreurs liées à la correction géométrique et au géoréférencement des différents documents utilisés. L'utilisation des microscories, rejets de l'ancienne industrie du fer, en tant que marqueur stratigraphique, nous a permis de tester, sur plusieurs rivières, les vitesses d'érosion latérale obtenues par la méthode cartographique. En conclusion, la méthode cartographique entraîne une nette surestimation des vitesses d'érosion latérale et des espaces de mobilité des cours d'eau dans leur plaine alluviale.

Mots-clés

Déplacement latéral des cours d'eau, espace de liberté, gestion durable, correction géométrique, géoréférencement, analyse de cartes anciennes, scories

Abstract

The concept of space of freedom, introduced in 1991, refers to a space for the river in order to restore the natural dynamic of erosion of the banks. Part of the methodology uses ancient maps in order to delimit the area of historical shifting of the river. This approach has been used for different rivers in the Ardennes massif (Ourthe, Ambleve, Semois, Rulles). Spaces of mobility achieved for these rivers are rather limited and it was necessary to take into account imprecisions linked to geometric correction and the georeferencing of the different documents. The turning of the material thrown out from the old iron manufactures (slag, micro-slag) as a stratigraphic stamper allows us to test the values of the velocity of lateral erosion obtained thanks to the cartographic method. In conclusion, the approach using historical maps leads to a clear over-estimate of the rates of lateral erosion and of the mobility spaces of the rivers in their alluvial plain.

Keywords

Channel shifting, space of freedom, sustainable management, geometric correction, georeferencing, historical map analysis, slag.

INTRODUCTION

Il est globalement admis que tout cours d'eau adapte la morphologie de son lit en fonction de l'énergie à dissiper ce qui se traduit notamment par l'érosion des berges, **phénomène naturel observable de tout temps**. Les rivières naturelles sont ainsi à la recherche d'un équilibre dynamique, ce qui ne signifie pas une absence totale de modification des caractéristiques morphologiques du cours d'eau mais un ajustement permanent autour de « conditions » moyennes (Malavoi, 1998). Combattre de manière systématique ces phénomènes d'érosion

perturbe inévitablement cette dynamique naturelle et conduit le plus souvent à accentuer les dysfonctionnements : augmentation de la vitesse et de la force érosive du courant, encaissement du lit, érosion régressive, appauvrissement biologique du milieu, etc.

Aujourd'hui, on se rend compte que de très nombreux cours d'eau ont été endigués sans que l'on tienne compte de leur « respiration » (Frossard *et al.*, 1998). C'est dans le cadre de cette prise de conscience collective que s'inscrit le concept d'espace de liberté des cours d'eau qui fut introduit pour la première fois lors des Assises nationales de l'eau en mars 1991 (Piegay *et*

al., 1996). Elle a ensuite été reprise par le groupe de travail « protection et gestion des plaines alluviales » de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse qui a proposé la définition suivante : « *Espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres* » (Malavoi, 1998). Ce qui rejoint la formulation de Piegay *et al.* (1996) : « *Ce concept naturaliste affirme la nécessité de préserver les caractères fonctionnels des hydrosystèmes caractérisés par une dynamique latérale active ; l'objectif est une gestion écologique et durable, qui puisse reposer sur un équilibre entre les usages de l'espace et le milieu* ».

La première partie de ce travail est consacrée à une brève description de la méthodologie française en matière de délimitation des espaces de liberté des cours d'eau. Notons que, à notre connaissance, seules les autorités françaises en matière de gestion des cours d'eau ont développé une méthodologie propre à cette problématique. Nous développons ensuite l'intérêt d'analyser les documents cartographiques anciens en vue de l'étude historique de la dynamique fluviale des rivières du massif ardennais. Les techniques de correction géométrique et de géoréférencement¹, nécessaires à ce type d'étude diachronique, sont introduites, et nous établissons les limites inhérentes à ce type d'opération. Nous décrivons finalement la méthodologie reposant sur l'usage des rejets métallurgiques en tant que traceur de la mobilité latérale des cours d'eau.

I. ÉTAT DE LA QUESTION : PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE FRANÇAISE

La délimitation des espaces de liberté nécessite la mise en œuvre d'une méthodologie rigoureuse qui devrait permettre l'intégration de ce concept dans des programmes d'aménagement du territoire et de gestion des espaces fluviaux. Le SDAGE (Schémas Départementaux d'Aménagement et de Gestion des Eaux) propose dans son guide technique trois enveloppes de mobilité qui peuvent être considérées comme des espaces emboîtés. C'est l'échelle de temps inhérente à chacune de ces trois enveloppes qui les différencie. De plus, si les deux premières enveloppes (espace de liberté maximal et espace de liberté fonctionnel) sont des espaces morphodynamiques « vrais », c'est-à-dire délimitables sur des bases physiques, le troisième espace (espace de liberté minimal) constitue plutôt un concept de gestion (Malavoi, 1998).

La première enveloppe définie par le SDAGE, l'espace de liberté maximal (**EMAX**), délimite l'espace balayé par le cours d'eau à l'échelle des derniers milliers d'années ; cet espace constitue l'enveloppe la plus vaste et la plus externe. Le SDAGE le définit comme correspondant au corps sédimentaire à matériel grossier mis en place depuis la fin de la glaciation du Würm (-12 000 ans) dans les fonds de vallée. Ces matériaux sont potentiellement

mobilisables par les cours d'eau actuels (Fig. 1a). L'espace de divagation maximal est par conséquent la plaine alluviale à l'échelle de temps géologique (10 000-15 000 ans). Il faut cependant tenir compte des basses terrasses plus anciennes qui peuvent fournir des matériaux au cours d'eau lorsque l'espace de divagation est en marge de la plaine alluviale (Malavoi, 1998). Ces basses terrasses sont alors à intégrer dans l'EMAX et délimitent ce que le SDAGE définit comme étant l'espace de divagation résiduel. D'un point de vue méthodologique, la méthode la plus simple consiste à se référer aux cartes géologiques, ou pédologiques pour le cas de la Belgique, et à prendre comme enveloppe externe de l'EMAX les limites des alluvions modernes.

La deuxième enveloppe, l'espace de liberté fonctionnel (**EFONC**), constitue l'espace de liberté au sens préconisé par le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse et repose sur des concepts morphologiques ainsi que sur des concepts de gestion. Par conséquent, cet espace est de loin le plus difficile à délimiter. Sa cartographie peut être réalisée en cinq sous-étapes dont certaines sont optionnelles (Malavoi, 1998) :

- **Sous-étape 1 : Approche par le concept d'amplitude d'équilibre (Fig. 1b)**

Cette première approche repose sur certaines relations établies entre divers paramètres géométriques des cours d'eau (pente, largeur aux pleins bords, longueur d'onde et amplitude des méandres, etc.) et d'autres variables (débit dominant, débit de pleins bords, etc.), afin d'approcher la géométrie d'équilibre dynamique des lits fluviaux. Toutefois, par simplification, on considère généralement cette amplitude théorique comme étant égale à 10 fois la largeur du lit mineur au niveau du plein bord.

- **Sous-étape 2 : Approche par la capacité de transport**

Le calcul de la capacité de transport d'un cours d'eau permet de connaître, non la charge transportée, mais celle que sa géométrie lui donne la capacité de transporter. La cartographie réalisée lors de cette sous-étape délimite par conséquent les surfaces (et donc les volumes) nécessaires pour fournir une certaine quantité de charge solide au cours d'eau. Toutefois, comme nous le verrons par la suite, cette approche est difficile à mettre en œuvre, spécialement en terme de gestion courante.

- **Sous-étape 3 : Approche basée sur l'évolution historique (Fig. 1c)**

La définition de l'espace de mobilité fonctionnel d'un cours d'eau peut être en partie basée sur l'analyse de sa dynamique fluviale récente (les deux derniers siècles) et notamment sur l'emprise spatiale historique des déplacements du lit d'amplitude généralement plus limitée que l'EMAX, l'espace de divagation historique du cours d'eau sera déterminé essentiellement par analyse de documents anciens (cartes, photos aériennes, plans, etc.).

- **Sous-étape 4 : Les zones d'érosion à 50 ans**

Cette enveloppe est particulièrement délicate car elle fait appel à une démarche prospective. L'objectif poursuivi est de déterminer les zones d'érosion probable à moyen

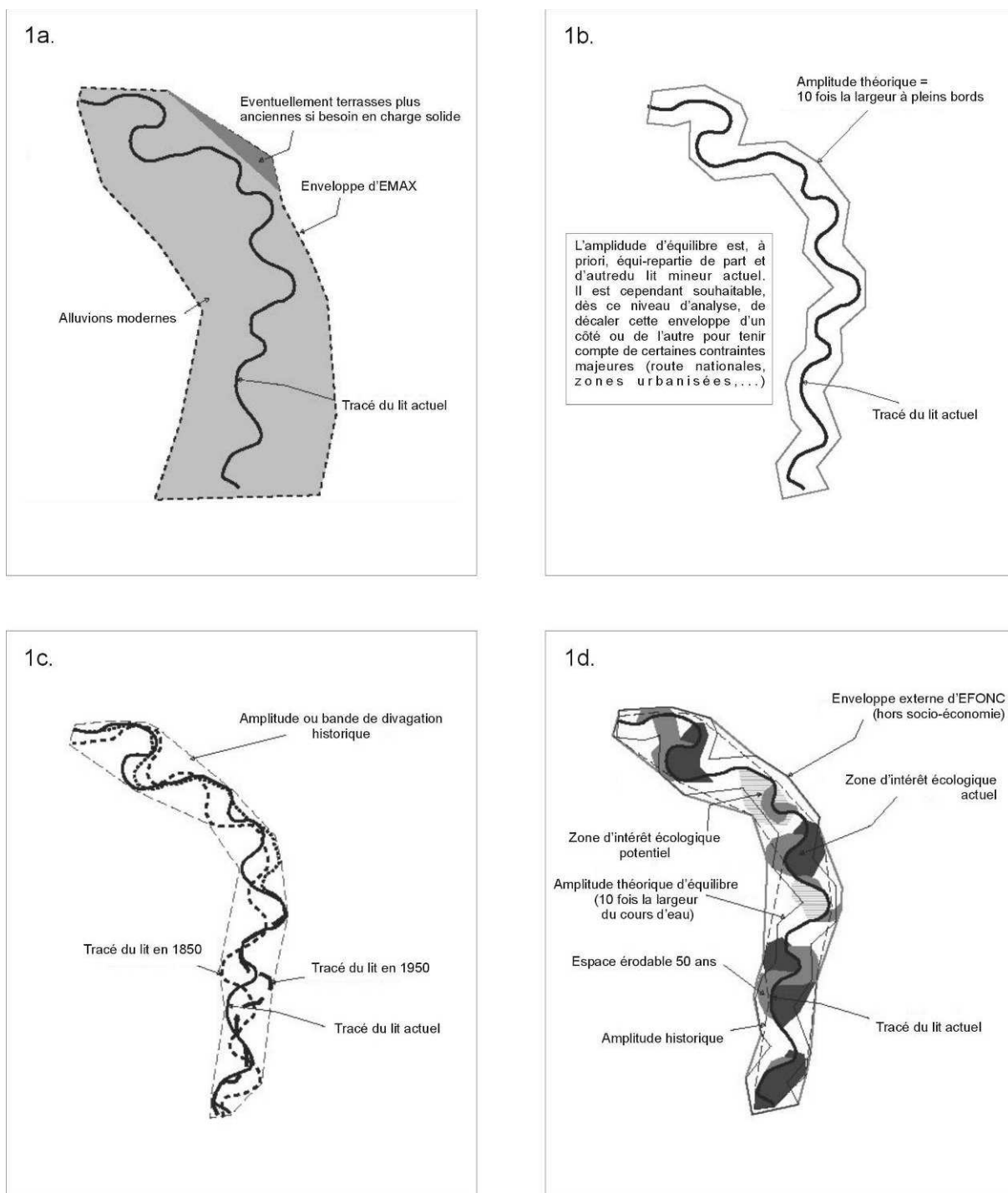


Figure 1a. Délimitation de l'espace de liberté maximal (EMAX) sur base de la carte géologique ; **1b.** Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel (EFONC) – approche par l'amplitude d'équilibre (sous-étape 1) ; **1c.** Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel (EFONC) – délimitation de l'espace de divagation historique (sous-étape 3) ; **1d.** Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel (EFONC) – Délimitation de l'enveloppe externe (sous-étape 5). Ces figures sont reprises du guide technique n°2 (Malavoi, 1998).

terme (50 ans). Pour ce faire, des vitesses d'érosion sont calculées sur base de l'étude cartographique (sous-étape 3), et les valeurs obtenues sont extrapolées pour les 50 ans à venir.

- Sous-étape 5 : Délimitation de l'enveloppe minimale fonctionnelle (Fig. 1d)

Cette sous-étape de synthèse doit permettre de délimiter l'enveloppe externe de l'espace de mobilité fonctionnel. La méthode est simple puisqu'il suffit de dessiner l'enveloppe externe des enveloppes dessinées précédemment et d'y intégrer les zones d'érosion probable à 50 ans.

La troisième enveloppe définie par le SDAGE, l'espace de liberté minimal (EMIN), n'est que l'espace fonctionnel retouché au cas par cas, en fonction des enjeux et des concentrations locales, pour prendre en considération certaines contraintes anthropiques secondaires telles que les axes de communication, les puits de captages, certaines habitations isolées, etc. (Malavoi, 1998). Cet espace correspond alors à la surface et à l'amplitude indispensables pour ne pas provoquer ou accentuer des dysfonctionnements hydrologiques, sédimentologiques ou écologiques.

L'originalité des principes de gestion proposés par le SDAGE en matière de gestion de l'espace de liberté, c'est l'absence de protection de berges. Il est alors nécessaire de mettre sur pied une orientation réfléchie de l'aménagement du territoire, où la rivière se voit attribuer un espace dans lequel elle ajuste son cours en fonction de ses aspirations à un équilibre dynamique.

II. ESPACE DE DIVAGATION HISTORIQUE ET ANALYSE DES CARTES ANCIENNES

Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation de documents cartographiques anciens en vue de délimiter l'espace de divagation historique des cours d'eau (sous-étape 3 de la deuxième enveloppe). Seule cette sous-étape a été retenue. En effet, le confinement trop important des plaines alluviales du massif ardennais, c'est-à-dire le rapport trop élevé entre la largeur du lit mineur et la largeur de la plaine alluviale, a rendu impossible l'utilisation de l'amplitude d'équilibre comme courbe enveloppe (sous-étape 1 de la deuxième enveloppe). L'utilisation des cartes géologiques (et pédologiques, pour la Belgique) (première enveloppe) donne des espaces de liberté à échéance trop longue. L'approche par la capacité de transport (sous-étape 2 de la deuxième enveloppe) est certes un concept intéressant mais difficilement applicable en terme de gestion au quotidien. En effet, pour répondre à cette approche, il faut tout d'abord estimer la capacité de charriage des rivières, nécessitant la mise en œuvre de différentes équations de charriage telles que celles de Meyer-Peter, de Bagnold, ou encore de Schoklitsch (Gob *et al.*, 2005) et donc de connaître de nombreux paramètres dynamiques et hydrologiques. En outre, il convient de connaître l'importance et les caractéristiques du stock sédimentaire. Finalement, il semble donc que

l'approche basée sur l'analyse des cartes anciennes soit la plus adaptée à une délimitation aisée, à une échelle de temps acceptable (de 50 à +/- 200 ans).

Les rivières sélectionnées pour cette étude sont : l'Ourthe, l'Amblève, la Semois et la Rulles. Le choix de ces rivières se justifie par leur taille, car la représentation cartographique des cours d'eau se précise lorsque leurs dimensions augmentent, ce qui est fondamental dans le cadre de ce travail. Une deuxième contrainte concernant la sélection des cours d'eau a été notre volonté de comparer les résultats obtenus à la suite de l'analyse des cartes anciennes avec ceux résultant de l'analyse des rejets métallurgiques comme traceur de la mobilité latérale des cours d'eau. Nous avons donc choisi des rivières qui ont connu une industrie du fer à partir de la moitié du XIV^e siècle (Houbrechts, 2005).

Les tronçons finalement étudiés sont (Fig. 2) : l'Ourthe entre Bomal et Comblain-Fairon, l'Amblève entre Quarreux et Comblain-au-Pont, la Semois entre Tintigny et Jamoigne, la Rulles entre Orsinfain et Tintigny.

A. Définition et objectif de la correction géométrique

Les documents cartographiques anciens nous communiquent des informations précieuses sur « l'histoire » de nos rivières (Bousquet-Bressolier, 1995). Toutefois, plusieurs éléments importants doivent attirer notre attention. Premièrement, les différentes cartes utilisables en vue d'une étude diachronique présentent rarement les mêmes caractéristiques : l'échelle et le système de projection cartographique (parfois inexistant) diffèrent d'une carte à l'autre, les réseaux géodésique et topographique ont été modifiés au cours du temps. De plus, nous devons également considérer les déformations du support papier dues à l'âge et à l'usage des cartes qui peuvent être une source d'erreur significative. Ensuite, la plupart des objets représentés sur une carte ne sont pas représentés à l'échelle et sont souvent symbolisés ou généralisés. Néanmoins, « *le réseau hydrographie naturel constitue un élément planimétrique majeur et il est toujours représenté dans la position la plus exacte possible, les autres éléments planimétriques étant décalés si nécessaire* » (Donnay, 1995). Une comparaison directe des tracés de rivières entre ces différentes cartes est donc malaisée, et s'il est possible de repérer les « grandes » modifications du tracé du cours d'eau, il devient beaucoup plus difficile d'interpréter les mouvements d'amplitude plus limitée. Comment savoir si un mouvement apparent est le résultat d'une modification réelle du cours d'eau plutôt qu'un effet graphique dû à l'utilisation d'un autre système de projection ? Il est donc nécessaire de corriger géométriquement les différents documents cartographiques (rectification) ainsi que de les rattacher à des coordonnées cartographiques communes (géoréférencement).

Ces opérations sont effectuées à l'aide du logiciel Erdas Imagine (Leica Geosystems ©). Comme carte de

référence, nous avons choisi la carte IGN au 1/10.000 de 1980 (Projection Lambert 1972) car nous disposons d'une couverture complète de la Belgique au format numérique. La première étape consiste à rechercher sur la carte à corriger, préalablement numérisée, et sur la carte de référence, des paires de points représentant le même objet, tout en tenant compte des effets de la symbolisation et de la généralisation, comme des croisements de route, des calvaires ou l'angle d'un bâtiment remarquable (château, église...). Le choix de ces points doit répondre à plusieurs critères. Premièrement, ils doivent être susceptibles de ne pas avoir été déplacés dans le temps. Ensuite, il est également nécessaire de sélectionner des points ayant le moins de relation possible avec le phénomène à étudier. Tout point sur la rivière est donc à proscrire. Enfin, il faut veiller à garder tant que possible une répartition homogène des points sur

le document. En moyenne, nous avons pu sélectionner une vingtaine de points sur chacun de nos documents (1 point / 2 km²).

Les paires de points ainsi obtenues, appelés Ground Control Points (GCPs), correspondent aux pixels de coordonnées cartographiques (x', y') sur la carte numérique de référence, et aux pixels de coordonnées (x, y) de l'image d'origine. Ces GCPs permettent au logiciel de déterminer une matrice de transformation constituée des coefficients des équations polynomiales qui définissent l'équation de changement de repère pour lequel l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est minimale (Peeters, 2001). En effet, la résolution des équations de transformation étant non linéaire, chaque nouvelle coordonnée calculée à l'aide de cette équation diffère de la coordonnée observée (Zhang & Kirby, 2000). L'écart, selon les composantes x et y, entre la position observée

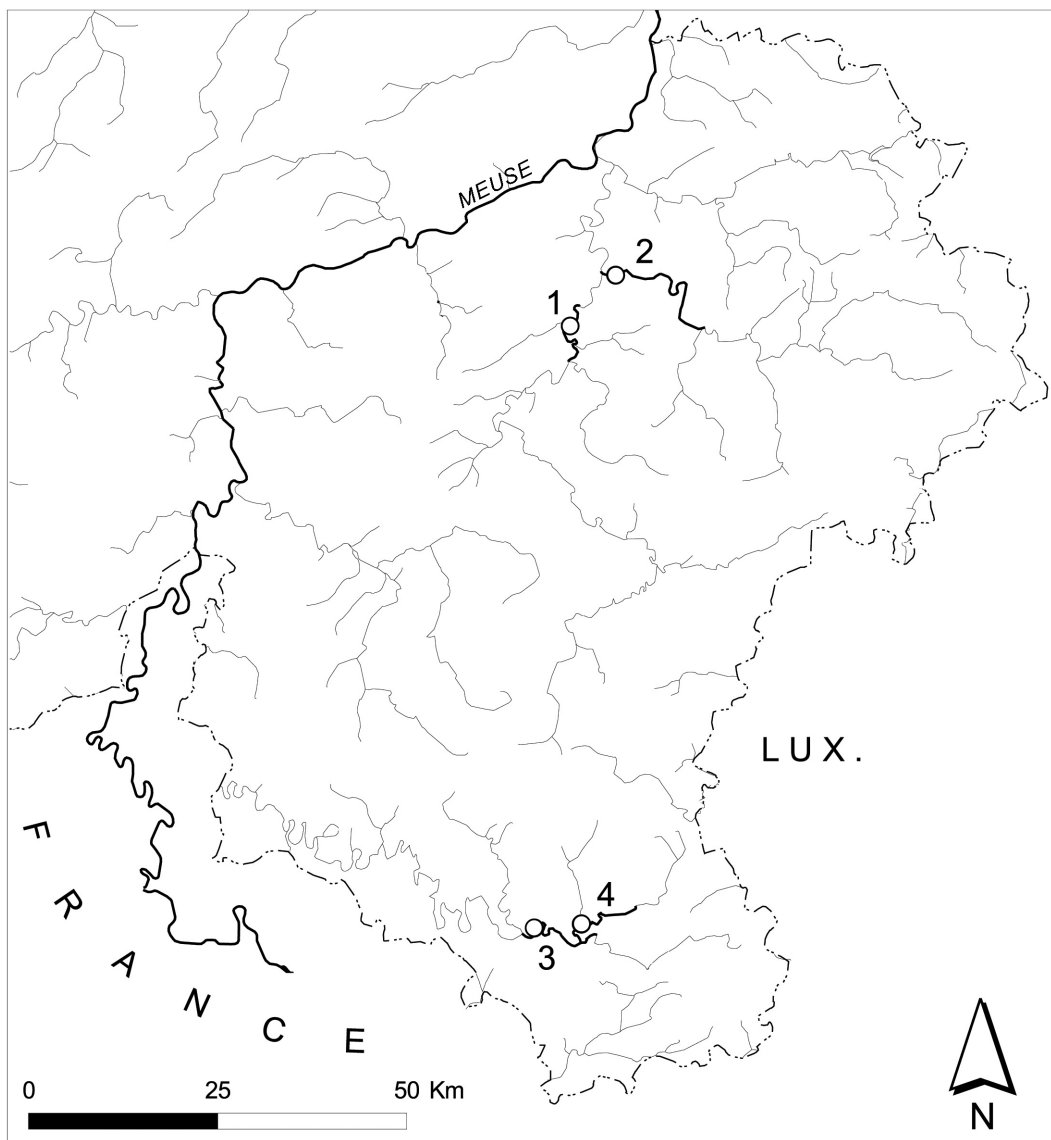


Figure 2. Localisation des tronçons étudiés par l'analyse cartographique : 1. l'Ourthe entre Bomal et Comblain-Fairon ; 2. l'Amblève entre Quarreux et Comblain-au-Pont ; 3. la Semois entre Tintigny et Jamoigne ; 4. la Rulles entre Orsinaifang et Tintigny. Les cercles correspondent aux profils étudiés.

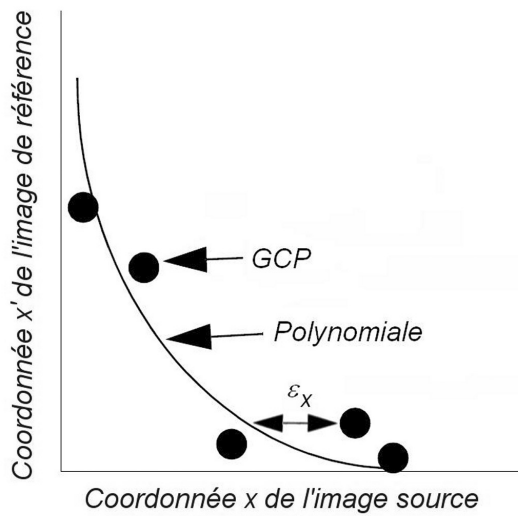


Figure 3. Position des GCPs et ajustement de la polynomiale : le résidu en x (ϵ_x) est défini comme la distance, selon la coordonnée X dans ce cas, entre les GCPs et la polynomiale ajustée grâce à ceux-ci. (Erdas, 2003 – modifié)

(déterminée par les GCPs) et la position attendue (donnée par le modèle) constitue les deux composantes des résidus (ϵ_x et ϵ_y) (Fig. 3). La taille de cette matrice dépend de l'ordre de la transformation qui définit aussi le nombre minimum de GCPs à sélectionner. Nous avons choisi d'utiliser une transformation du second degré (paraboloïde nécessitant un minimum de 6 GCPs). Les images sont également souvent fortement déformées pour s'ajuster au mieux à tous les GPCs. Les équations de cette polynomiale s'écrivent :

$$X'(x,y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F + \epsilon_x$$

$$Y'(x,y) = Gx^2 + Hxy + Iy^2 + Jx + Ky + L + \epsilon_y$$

À titre d'illustration, nous avons sélectionné un tronçon de l'Ourthe situé dans la plaine alluviale à proximité du Château de Lassus, juste en amont de Hamoir. Les cartes disponibles pour ce secteur étaient la carte de Vandermaelen (1850), la carte ICM 1^{re} édition (1903), la carte IGN (1980) et IGN (2000). La carte de Ferraris (1770) était également disponible mais les grandes difficultés rencontrées pour y sélectionner un nombre suffisant de GCPs nous ont fait renoncer à son utilisation. Après correction des différentes cartes, les différents tracés de l'Ourthe ont été digitalisés et superposés sur un fond de plan commun (IGN, 2001) (Fig. 4).

Les observations que nous pouvons effectuer sur ce secteur sont généralisables à l'ensemble des tracés des quatre rivières étudiées. En effet, lors de la première lecture des différentes cartes de superposition de tracés « historiques » des cours d'eau, nous avons été surpris par les faibles changements de tracé des différentes rivières. S'il apparaît quelquefois des changements de

tracé plus importants qui semblent être dus, à première vue, à des recoupements de méandre par débordement, les tracés conservent généralement une allure identique dans le temps et restent parallèles entre eux. Ce parallélisme est problématique, car il est extrêmement délicat d'interpréter s'il y a eu mouvement de la rivière, ou s'il s'agit plutôt d'erreurs dues à la correction géométrique des documents. Une interprétation directe de ces cartes n'est donc pas souhaitable et il est dès lors nécessaire de s'attarder davantage aux erreurs introduites lors des différents traitements.

B. Incertitude de positionnement et résidus

Étant donné que les résidus sont connus en x et en y pour tous les GCPs, il est possible d'interpoler ces valeurs à l'ensemble de la carte et d'obtenir ainsi une estimation des résidus x et en y en tous points. Mais il faut au préalable poser deux conditions. La première est d'avoir une continuité spatiale des deux variables (ϵ_x et ϵ_y). Dans le cas contraire, les erreurs en chaque GCP sont indépendantes et l'erreur totale du document est égale à la racine carrée de la somme des carrés des erreurs, donc la RMSE totale. La seconde est de considérer que l'erreur (en x et en y) « quasi aléatoire » survenue lors du repérage des GCPs sur les deux documents est négligeable.

La position *observée* d'un point, en d'autres termes les coordonnées (X' , Y') que le logiciel aurait calculé si la résolution des équations de transformation avait été parfaite, peut donc être estimée en additionnant les valeurs calculées de résidus aux coordonnées de ce même point (X^* , Y^*) *attendues* par le modèle.

$$X'(\text{observé}) = X^*(\text{attendu}) + \epsilon_x$$

$$Y'(\text{observé}) = Y^*(\text{attendu}) + \epsilon_y$$

À la figure 4, nous avons représenté, à pas constant le vecteur $\epsilon_{x,y}$ dans une zone tampon centrée sur la rivière. Chaque vecteur est formé par deux points (point *attendu* → point *observé*) et nous renseigne sur l'imprécision de la position de la rivière suite à la correction géométrique. Notons que nous avons exagéré 5 fois la norme de ces vecteurs de manière à faciliter la lecture. Ces vecteurs ont été calculés à partir de valeurs interpolées des résidus des 20 GCPs, utilisés pour rectifier la carte ICM (1903).

Si nous comparons le tracé « rectifié » de l'Ourthe figurant sur la carte de 1903 et celui de 2001, nous observons qu'il est important d'apporter des corrections de positionnement. En effet, les vecteurs nous indiquent qu'il est nécessaire de reporter la partie amont du tracé de 1903 vers le nord-nord-est, et la partie aval vers l'ouest. Cet exemple est illustratif car, sans prise en considération de ces corrections de positionnement, nous devrions admettre que l'Ourthe « historique » de 1903 se serait écoulée sur les deux rangées de tilleuls qui bordent actuellement la rivière en rive droite. Or, deux tilleuls ont été datés

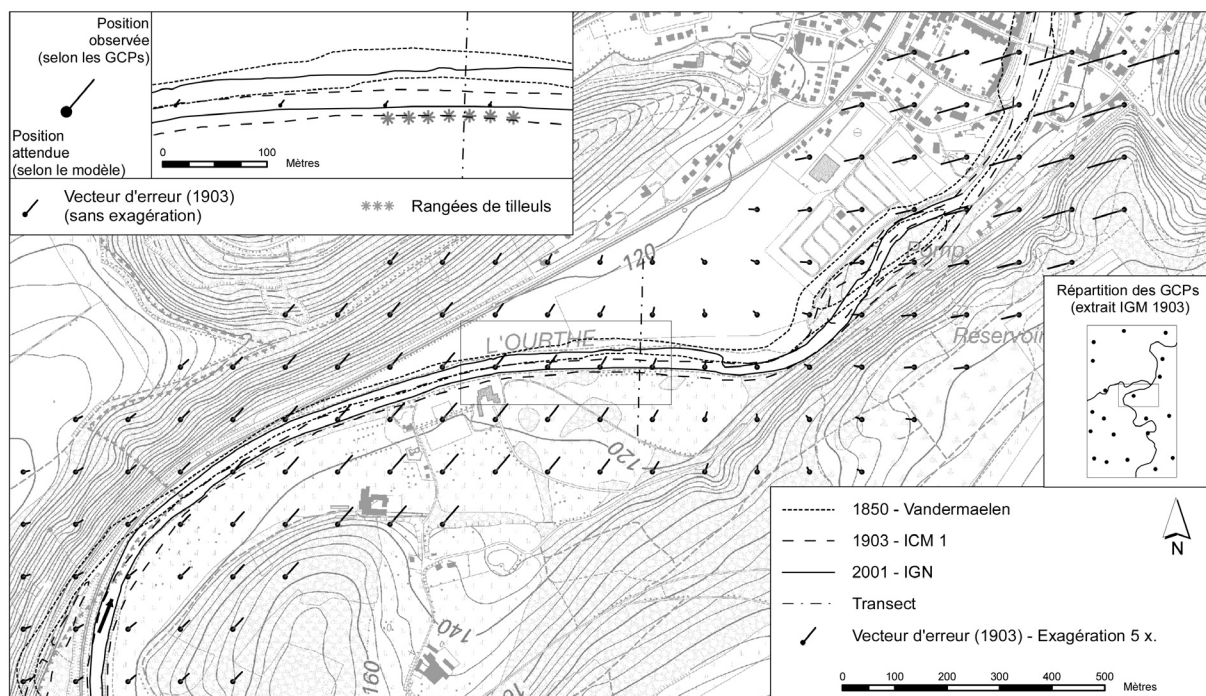


Figure 4. Carte de superposition des tracés historiques de l'Ourthe dans la plaine alluviale du château de Lassus à Hamoir. Fond de plan : IGN 2001, planche 49-5 N. Le transect mentionné sur cette figure localise les sondages étudiés à la figure 7.

par dendrochronologie et nous révèlent qu'ils sont au minimum centenaires (104 et 105 ans avec une marge d'erreur de 10%). Par conséquent, la considération de ces corrections est essentielle afin d'estimer rigoureusement les espaces de divagation historique des cours d'eau ainsi que pour estimer leur vitesse d'érosion latérale.

Afin de valider les résultats obtenus par l'analyse cartographique, nous avons utilisé les rejets de l'industrie du fer comme marqueur stratigraphique en vue d'estimer les vitesses d'érosion latérale. Cette méthodologie est décrite et illustrée dans le paragraphe suivant.

III. LES REJETS DE L'INDUSTRIE DU FER EN TANT QUE TRACEUR STRATIGRAPHIQUE

D'après les sources historiques, il semble que ce soit au XIV^e siècle que les métallurgistes installèrent les premiers fourneaux en bordure de cours d'eau afin de tirer profit de l'énergie hydraulique (Houbrechts, 2005). Cette innovation technique permit d'intensifier l'aération au cœur du foyer et ainsi d'augmenter les capacités de production des hauts-fourneaux (Leboutte, 1979). Entre la fin du XIV^e siècle et le milieu du XIX^e siècle, plus de trois cents sites sidérurgiques ont fonctionné le long des cours d'eau du massif ardennais (Houbrechts, 2002). La localisation des sites était principalement influencée par la proximité des matières premières et plus spécialement par la présence des massifs forestiers qui fournissaient le charbon de bois.

De cette activité sidérurgique ancienne, il ne subsiste que très peu de traces matérielles. Les principaux témoins

de cette activité consistent en d'importantes quantités de scories, de dimension micrométrique à décimétrique. Ces scories sidérurgiques correspondent à l'ensemble des résidus qui se forment lors de la transformation du minerai de fer en métal. Ces scories étaient rejetées sur les plaines alluviales à proximité des sites de production et formaient des crassiers (Houbrechts, 2005). De plus, des sphérules métalliques de quelque dizaines de microns de diamètre étaient produites dans les forges d'affinage et étaient emportées avec les fumées. Ces billes se déposaient ensuite dans un rayon de quelques kilomètres autour des sites de production (Richardeau, 1977), notamment sur les plaines alluviales. Par ailleurs, lors des crues, ces différents rejets de l'industrie du fer peuvent être transportés en suspension et faire partie intégrante de la charge sédimentaire. Connaissant l'époque des rejets grâce aux études historiques, les scories sidérurgiques peuvent donc être utilisées en tant que marqueur chronostratigraphique pour l'étude des plaines alluviales.

L'utilisation des scories comme traceur pour l'étude des plaines alluviales a été appliquée, pour la première fois, par Henrottay (1973). Ce travail consistait principalement à déterminer l'épaisseur des alluvions accumulées à la suite des crues débordantes. Pour ce faire, Henrottay a mis au point une méthode basée sur une estimation semi-quantitative du nombre de microscories présentes dans les échantillons prélevés à la tarière le long de profils perpendiculaires au tracé des cours d'eau. Cette méthode permettait de déterminer rapidement si les alluvions limoneuses ne contenaient pas, peu ou beaucoup de scories. Sur la base de cette information, il était possible

d'évaluer l'importance de la sédimentation limoneuse mise en place par débordement depuis la période des premiers rejets sidérurgiques. Par ailleurs, dans certains sondages, les scories étaient présentes depuis la surface jusqu'au contact avec la nappe caillouteuse sous-jacente aux limons de crue. Dans ce cas, l'absence de dépôts limoneux « anciens », sans microscories, signifiait que la rivière a balayé cet endroit, par glissement latéral, au moins une fois, depuis l'apparition de l'activité métallurgique. À titre d'exemple, nous présentons à la figure 5, l'analyse réalisée par Henrottay dans la plaine alluviale de l'Amblève (au moulin du Halleux, Comblain-au-Pont). Au niveau de ce profil, l'ensemble des alluvions contiennent des microscories depuis le cailloutis jusqu'en surface, sur toute la largeur de la plaine alluviale. De telle sorte, on peut en déduire que l'Amblève a balayé l'ensemble de sa plaine alluviale (110 m) en moins de sept siècles. Toutefois, comme nous le verrons par la suite, les sondages réalisés par Snijders (2004) ont abouti à nuancer fortement cette interprétation.

Sluse (1996) a également utilisé ces scories dans des plaines alluviales de rivières du sud du massif ardennais. Mais, lors du comptage des microscories, il a constaté qu'aucun échantillon n'était totalement vierge de résidus de l'industrie du fer. Cette présence généralisée ne pouvait s'expliquer que par la bioturbation (Depaifve, 1979). Sur la base des données obtenues, Sluse proposait de considérer tous les échantillons contenant moins de 20 % du nombre de scories présentes dans l'échantillon le plus riche du profil comme étant contaminés par la bioturbation et donc mis en place avant l'apparition de la sidérurgie le long des cours d'eau. Par ailleurs, il proposait de représenter les mesures de concentration en quatre classes (< 20 %, 20-50 %, 50-80 %, > 80 % de la valeur maximale du profil) mais ne donnait malheureusement

pas d'indication sur le nombre d'éléments sidérurgiques présents dans l'échantillon le plus riche du profil.

Cette méthode a été améliorée par Houbrechts (2002, 2005). Premièrement, il préconisait d'indiquer les vraies valeurs de concentration en microscories sous la forme de graphique d'évolution verticale, de manière à localiser les pics de concentration en microscories d'une part et à mieux interpréter les faibles concentrations d'autre part. Un exemple de profil établi sur la Chavanne (affluent de la Lienne) est donné à la figure 6 (Houbrechts, 2005). Deuxièmement, il a estimé l'importance de la bioturbation en analysant la présence de scories dans les loess superficiels de Rocourt contaminés en surface par les retombées de poussières sidérurgiques du bassin industriel liégeois depuis le milieu du XIX^e siècle. Il ressort de cette étude que la bioturbation affecte essentiellement les 70 cm supérieurs du sol et que, dans les échantillons contaminés par la bioturbation, les teneurs en billes sidérurgiques représentent moins de 5 % de la concentration de la couche de surface exposée aux retombées.

Nous avons utilisé les microscories afin de suivre le déplacement historique des cours d'eau dans leur plaine alluviale en appliquant la méthodologie développée par Houbrechts, c'est-à-dire en prenant en compte l'impact de la bioturbation. Cette recherche a été effectuée le long de trois profils perpendiculaires aux cours d'eau (Ourthe, Amblève, Rulles) dont la localisation est indiquée à la figure 2. Il n'a pas été possible d'appliquer cette méthode à la Semois (entre Tintigny et Jamoigne) car les rejets métallurgiques retrouvés dans les sédiments ne présentaient pas une concentration suffisante pour permettre une interprétation rigoureuse. Cette pauvreté en scories s'explique probablement par l'éloignement des anciens sites industriels qui, pour les plus proches, se situaient à plus de 20 km en suivant le cours de la rivière.

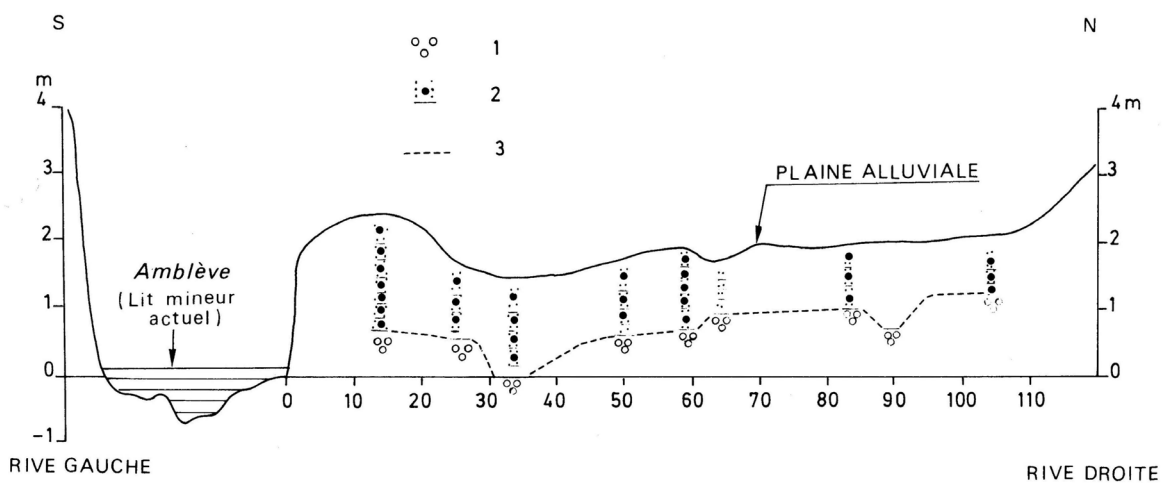


Figure 5. Coupe transversale de l'Amblève (2 km en amont de sa confluence avec l'Ourthe) montrant l'importance de l'érosion latérale depuis les premiers rejets sidérurgiques (d'après Henrottay, 1973).

(1) Cailloutis de base, (2) Scories microscopiques, billes et plaquettes, (3) Limite supérieure du cailloutis de base (hauteur exagérée 10 fois).

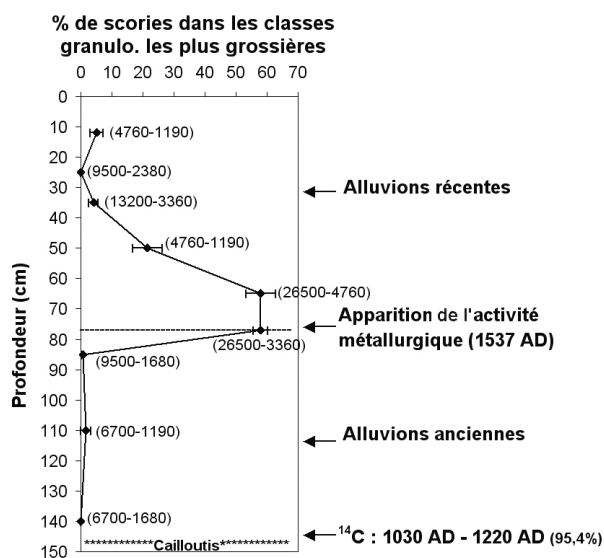


Figure 6. Exemple de l'évolution de la concentration en microscorie dans un sondage réalisé dans la plaine alluviale de la Chavanne (bassin de l'Amblève) (Houbrechts, 2005). Les valeurs indiquées entre parenthèses sur le graphique à côté de chaque valeur correspondent aux limites granulométriques exprimées en micron sur lesquelles portent les mesures de concentration.

IV. COMPARAISON DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Lorsque nous comparons les résultats obtenus à la suite de l'analyse cartographique (mesures sur carte entre les différents tracés historiques de l'Ourthe) avec les résultats obtenus à la suite de l'étude des rejets métallurgiques, nous constatons que les valeurs d'érosion latérale ne sont pas du même ordre de grandeur, et ce malgré la prise en

compte des erreurs de la correction géométrique. En effet, si nous considérons la première approche qui consiste en une superposition cartographique des différents tracés historiques de l'Ourthe, il devient possible de mesurer les déplacements latéraux de la rivière (Fig. 4). De plus, connaissant la date du levé cartographique des différents documents utilisés, il est possible d'estimer les vitesses d'érosion latérale. Les résultats obtenus pour le profil transversal de l'Ourthe à Hamoir sont de 38 m de déplacement latéral entre 1850 (Vandermaelen) et 1903 (ICM 1^{re} édition) et de 26 m entre 1903 et 2001, mais dans le sens opposé au déplacement observé entre 1850 et 1903.

Les rejets sidérurgiques ont également été utilisés afin d'étudier la mobilité latérale et les vitesses d'érosion de ce même tronçon de l'Ourthe. Quinze sondages ont été effectués, chaque sondage étant sélectionné sur les sommets ou dans les dépressions d'un profil transversal préalablement établi à la lunette de nivellement. À la suite de l'analyse en laboratoire des différents échantillons prélevés, la figure 7 nous révèle la présence de scories sur toute la hauteur des sondages 1 et 8. Ce cas de figure est différent de celui étudié par Henrottay (1973) sur l'Amblève par le fait que l'on retrouve des scories de part et d'autre du lit mineur actuel. Premièrement nous pouvons estimer que la rivière a balayé au moins une fois l'espace compris entre ces deux sondages depuis la mise en place de l'industrie métallurgique dans le bassin en 1380. Si nous posons comme hypothèse que la largeur du lit mineur est restée constante dans le temps, l'espace minimum de mobilité est égal à 10 m depuis cette époque (entre les sondages 1 et 8). L'espace maximum est défini, quant à lui, entre les sondages 2 et 9 à partir desquels nous ne trouvons plus de scories au

	Cartes anciennes			Rejets métallurgiques		
	Espace maximum (m)	Période (années)	Vitesse (m/siècle)	Espace min-max (m)	Apparition de la sidérurgie	Vitesse (m/siècle)
L'Ourthe	38 38	150 53	25 72 (*)	10 - 30 (**) 14 - 43	1380	- 2,3 - 7
L'Amblève	18	150	12	4 - 20	1390	0,7 - 3,3
La Semois	79	150	52	-	-	-
La Rulles	77 43	150 53	51 81 (*)	8 - 30	1540	1,7 - 6,4

Tableau 1 : Comparaison des vitesses d'érosion latérale obtenues par l'analyse de documents cartographique, et par l'usage des scories en tant que traceur stratigraphique. La fourchette de valeurs pour les rejets sidérurgiques correspond aux vitesses minimales et maximales calculées en fonction de la position du sondage le plus éloigné dans lequel se trouve des scories d'une part, de la position du sondage voisin dans lequel les scories sont absentes à ce même niveau d'autre part.

(*) Vitesses maximales observées pour un espace et une période donnés par la méthode des cartes anciennes.

(**) Espace de gainage minimum et maximum. Les autres valeurs représentent l'espace de mobilité maximum et minimum à partir desquels sont calculées les vitesses d'érosion latérale. Ces valeurs ne diffèrent que dans le cas de l'Ourthe (cf. texte).

contact du cailloutis (du moins en nombre significatif). Celui-ci est égal à 30 m.

Ensuite, si nous raisonnons en terme de vitesse d'érosion au sein de cet espace de mobilité nous devons considérer d'autres mouvements de la rivière (tenant compte de l'érosion latérale dont elle est responsable). Nous devons tenir compte du repositionnement actuel de la rivière à l'intérieur de cet espace de mobilité. On définit donc un *déplacement minimum* égal à 14 m (en considérant les sondages 1 et 8) et un *déplacement maximum* égal à 43 m (sondages 2 et 9).

Dans le cas de l'Amblève et de la Rulles où l'on ne retrouve des scories que d'un seul côté du lit mineur, la valeur des déplacements correspond donc à celle de l'espace de mobilité.

Le tableau 1 reprend pour les rivières étudiées, les vitesses de déplacements (exprimées en m/siècle) mais également leurs espaces de mobilité. On constate tout d'abord que les vitesses d'érosion latérale mises en évidence par les scories se situent schématiquement entre 0,7 et 7 m/siècle, selon les rivières et l'espace considéré (espace minimum ou maximum). En revanche, par comparaison des cartes (avec les corrections apportées), ces vitesses de déplacement oscillent entre 12 et 81 m/siècle.

Les différences de résultats entre les deux méthodologies sont flagrantes. Toutefois, il faut souligner que les vitesses de migration latérale obtenues avec les cartes anciennes et les microscories portent sur des pas de temps différents. Or, la dynamique d'érosion latérale des cours d'eau n'est pas continue dans le temps. En effet, les modifications se produisent lors des événements hydrologiques qui peuvent être plus ou moins nombreux en relation notamment avec les fluctuations climatiques tels que le Petit Age Glaciaire (Gob, 2005). D'autre part, le déplacement latéral d'un cours peut aussi être causé par une perturbation de l'écoulement. Le cours d'eau tente alors d'ajuster son tracé de manière à recréer un équilibre par rapport aux conditions locales. Comme l'a montré une étude menée sur la Berwinne, ces ajustements se produisent généralement en quelques saisons hydrologiques (parfois moins, si la perturbation est importante) et s'atténuent ensuite fortement (Hallot

et al., 2003). L'importance d'un déplacement sera alors atténuée si on le rapporte à une période plus longue que celle durant laquelle le déplacement s'est produit. Ceci explique notamment que les vitesses obtenues par les microscories sont généralement plus faibles que celles obtenues par les comparaisons de cartes. Par ailleurs, rappelons que la méthode des microscories ne permet pas de reconstituer les déplacements oscillatoires des cours et qu'elle ne fournit que les limites atteintes par la rivière au cours des derniers siècles. En terme d'espace, les limites d'érosion latérale données par les microscories peuvent donc être considérées comme les courbes enveloppes les plus extrêmes dans lesquelles la rivière s'est déplacée au cours des derniers siècles. En conséquence, les tracés des cartes topographiques, plus récentes que les premiers rejets sidérurgiques, doivent être inclus dans cet espace. Dans le cas contraire, il faut alors faire intervenir une erreur de cartographie (simplification du tracé, etc.). Notons ainsi que pour l'Ourthe et l'Amblève, l'espace balayé mis en évidence par l'analyse des cartes (respectivement 38 m et 18 m, cf. tableau 1) reste dans la fourchette proposée par les microscories (respectivement 14 - 43 m pour l'Ourthe ; 4 - 20 m pour l'Amblève). Il n'en n'est pas de même pour la Rulles. Cependant cette rivière est de dimension nettement plus restreinte que les trois autres et il n'est pas interdit de penser que la précision cartographique du tracé ait été moins grande.

Par ailleurs, quelle que soit la méthode retenue, on constate que les vitesses d'érosion latérale sont finalement peu importantes vis-à-vis de ce qui a été mis en évidence dans d'autres rivières telles que l'Allier (Peiry, 2004) et l'Ain (Fagot *et al.*, 1989) où on peut atteindre des déplacements de l'ordre de 300 à 400 m en moins de trente ans, alors que dans les rivières étudiées ici, on arrive au maximum à 40 m en cinquante ans et souvent beaucoup moins. Il convient cependant de nuancer nos résultats car, au moins pour deux des rivières étudiées, on a travaillé dans des contextes régionaux où la plaine alluviale est relativement étroite vis-à-vis de la largeur du chenal (cas de l'Ourthe à Hamoir et de l'Amblève à Comblain). Ces déplacements sont plus importants

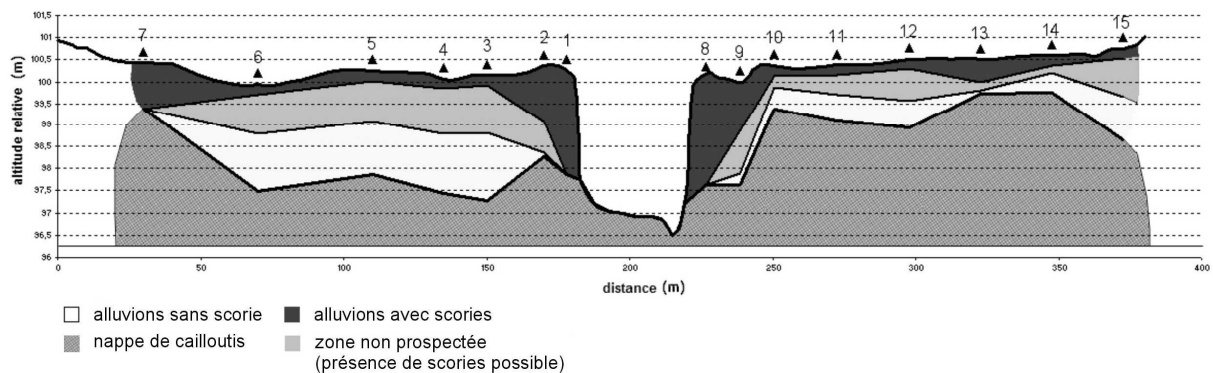


Figure 7. Répartition des scories et des billes magnétiques sur le profil de l'Ourthe à Hamoir (Snijders, 2004). La localisation de ces sondages est repris à la figure 4.

quand les rivières présentent des plaines alluviales plus vastes (cas de la Semois et de la Rulles dans la dépression liasique). Il en est plus que probablement de même pour l'Ourthe en Famenne qui, comme l'a montré Juvigné (1964), s'est fortement déplacée dans sa plaine alluviale depuis l'époque de Ferraris (1770). Toutefois, vu l'absence de sites sidérurgiques en Famenne (Houbrechts, 2005), il n'a pas été possible d'y utiliser les scories pour confronter les deux méthodes. Par ailleurs, la comparaison de cartes de différentes époques a montré que la Lesse en Famenne présentait également une forte dynamique latérale (Michel, 1970). Dans le cadre d'une étude en cours, portant sur la mobilité latérale de cette rivière, nous comptons tester les valeurs obtenues par l'étude diachronique des cartes (en tenant compte des erreurs introduites lors de la correction géométrique) avec celles obtenues à partir des microscories ; ces dernières produites par les établissements sidérurgiques implantés sur ses affluents (Lomme, Wamme, etc.) du XVI^e au XIX^e siècle (Weber, 1994) permettraient également de remonter plus loin dans le temps.

CONCLUSION

Le principe général de la gestion des berges mis en avant par les nouvelles politiques d'aménagement et de gestion du territoire en France consiste à éviter toutes situations dysfonctionnelles des hydrosystèmes caractérisés par une dynamique latérale active. À cette fin, trois espaces de mobilité ou « espaces de liberté de la rivière » ont été définis sur base de critères morphodynamiques et sur base de concepts de gestion du territoire. Les méthodes préconisées par le SDAGE sollicitent, entre autres, l'usage de documents cartographiques anciens afin de délimiter les espaces de divagations historiques des rivières dans leur plaine alluviale.

Toutefois, une comparaison entre les différents documents cartographiques nécessite une correction géométrique des documents, car les caractéristiques cartographiques (échelle, projection, etc.) peuvent différer d'un document à l'autre. Suite à la superposition des différents tracés d'un même cours d'eau dans un référentiel commun, nous avons été surpris par l'absence de changement majeur. En effet les différents tracés historiques restent parallèles entre eux et montrent une légère translation les uns par rapport aux autres. Il est donc nécessaire de prendre en considération les erreurs introduites lors des opérations de correction géométrique. Une interpolation appliquée aux points de contrôle (GCPs) pour lesquels les deux composantes de l'erreur d'ajustement du modèle polynomiale sont connues a permis la construction de vecteurs représentant la direction et l'importance de l'erreur de positionnement en tout point du document. Leur prise en considération affine les valeurs d'espace de mobilité et de vitesses d'érosion latérale.

Dans les trois rivières où il a été possible d'utiliser les rejets de l'ancienne industrie du fer, les résultats obtenus par cette méthode s'écartent sensiblement des valeurs

résultant de l'analyse cartographique, et ce malgré les corrections de positionnement. Par conséquent, il est difficile d'appliquer directement les méthodologies françaises à nos rivières ardennaises car leur dynamique latérale n'est pas suffisamment active que pour se démarquer par rapport aux erreurs et aux imprécisions propres à la réalisation des documents cartographiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient A. Pissart et Y. Cornet pour la relecture critique de cet article et N. Shields pour la correction de l'abstract.

NOTE

¹ On appelle géoréférencement l'action de rattacher des données à des coordonnées géographiques, tandis que le processus de projection de données dans un plan afin de les rendre conforme à un système de projection cartographique est appelé rectification ou correction géométrique. Lorsque tous les systèmes de projection utilisent des coordonnées cartographiques, la rectification comprend le géoréférencement.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUSQUET-BRESSOLIER C., 1995. *L'œil du cartographe et la représentation géographique du Moyen Age à nos jours*. Édition du comité des travaux historiques et scientifiques, Paris, 283 p.
- DEPAIFVE C., 1979. *L'action des vers de terre sur les remaniements au sein du sol et leur influence sur la vitesse du creep*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 118 p.
- DONNAY J.-P., 1995. *Cartographie topographique*. Laboratoire SURFACES de l'Université de Liège, Liège, 201 p.
- ERDAS, 2003. *Erdas Imagine Field Guide (7th ed.)*, Leica Geosystems, Atlanta, 698 p.
- FAGOT P., GADIOLET P., MAGNE M. & BRAVARD J.-P., 1989. Une étude dendrochronologique dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une « métamorphose fluviale ». *Revue de Géographie de Lyon*, 64(4), pp 213-233.
- FROSSARD P.-A., LACHAT B. & PALTRINIERI L., 1998. *Davantage d'espace pour nos cours d'eau - pour l'homme et la nature*. Contribution à la protection de la nature en Suisse, Pro Natura, 20, 48 p.
- GOB F., 2005. *Application de la lichénométrie à l'étude de rivières en gorge en milieu méditerranéen : caractérisation de leurs paramètres dynamiques et de leur évolution géomorphologique durant le Petit Age Glaciaire*. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 307 p. + annexes.
- GOB F., HOUBRECHTS G., HIVER J.-M. & PETIT F., 2005. *River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (the River*

- Semois, Belgium). *River Research and Applications*, 21(7), pp. 791-804.
- HALLOT E., PETIT F, VERNIERS G & LAMBOT F., 2003. *Utilisation des techniques végétales pour la stabilisation des berges : suivi de chantiers réalisés dans différents types de rivières wallonnes*. Actes du colloque « Évaluer le milieu », Journées des géographes belges, SOBEG-BEVAS, Liège, pp. 173-178.
- HENROTTAY J., 1973. La sédimentation de quelques rivières belges au cours des sept derniers siècles. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, n°9, pp. 101-115.
- HOUBRECHTS G., 2002. *Utilisation des macroscories et des microscories en dynamique fluviale*. Mémoire d'Études Approfondies en Sciences, Université de Liège, 53 p.
- HOUBRECHTS G., 2005. *Utilisation des macroscories et des microscories en dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais (Belgique)*. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 328 p.
- JUVIGNÉ É., 1964. Étude géomorphologique dans la région de Noiseux. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 87, pp. 263-270.
- LEBOUTTE R., 1979. *La grosse forge wallonne (du XV^e au XVIII^e siècle)*. Éditions du musée de la vie wallonne, Liège, 51 p.
- MALAVOI J.-R., 1998. *Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Guide Technique N°2 : Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*. Secrétariat Technique du SDAGE, Lyon, 40 p.
- MICHEL M.-J., 1970. *Étude de la plaine alluviale de la Lesse en Famenne*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 171 p.
- PEETERS A., 2001. *Évolution du littoral du golfe de Sant'Amanza (Corse) depuis 1952*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 153 p.
- PEIRY J.-L., 2004. Les kayaks de la recherche ou comment quantifier la recharge sédimentaire et les transports solides fluviaux. *Microscop, Journal du CNRS en délégation Centre-Auvergne-Limousin*, hors série N° 13, pp. 18-21.
- PIEGAY H., BARGE O., BRAVARD J.-P., LANDON N. & PEIRY J.-L., 1996. *Comment délimiter l'espace de liberté des rivières ?* Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 24^e Journées de l'Hydraulique, septembre 1996. L'eau, l'homme et la nature, Paris, pp. 275-284.
- RICHARDEAU C., 1977. Distribution de sphérules magnétiques provenant de la sidérurgie liégeoise. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 13, pp. 155-165.
- SLUSE P., 1996. *Évolutions de la Rulles, de la Semois et de la Mellier au cours des cinq derniers siècles grâce aux résidus métallurgiques de l'industrie du fer et par l'étude des cartes anciennes*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 206 p.
- SNIJDERS J.-P., 2004. *Délimitation des espaces de liberté des rivières à des échelles temporelles emboîtées. Application aux rivières ardennaises*. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 139 p.
- WEBER J.-P., 1994. *La sidérurgie dans la Terre abbatiale de Saint-Hubert aux Temps Modernes*. In A. Dierkens et J.-M. Duvosquel (Eds) : « La sidérurgie en Terre de Saint-Hubert. De Jehan Riffar à Nestor Martin ». Crédit Communal. Saint-Hubert en Ardenne. Art - Histoire - Folklore, n°5, Bruxelles, pp. 9-34.
- ZHANG J. & KIRBY R. P., 2000. A Geostatistical Approach to Modelling Positional Errors in Vector Data. *Transactions in GIS*, 4(2), pp. 145-159.

Adresse des auteurs:

Jean Philippe SNIJDERS
Eric HALLOT
Geoffrey HOUBRECHTS
François PETIT
Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale
Département de Géographie
Université de Liège
Allée du 6 août, 2
B- 4000 Sart Tilman, Liège