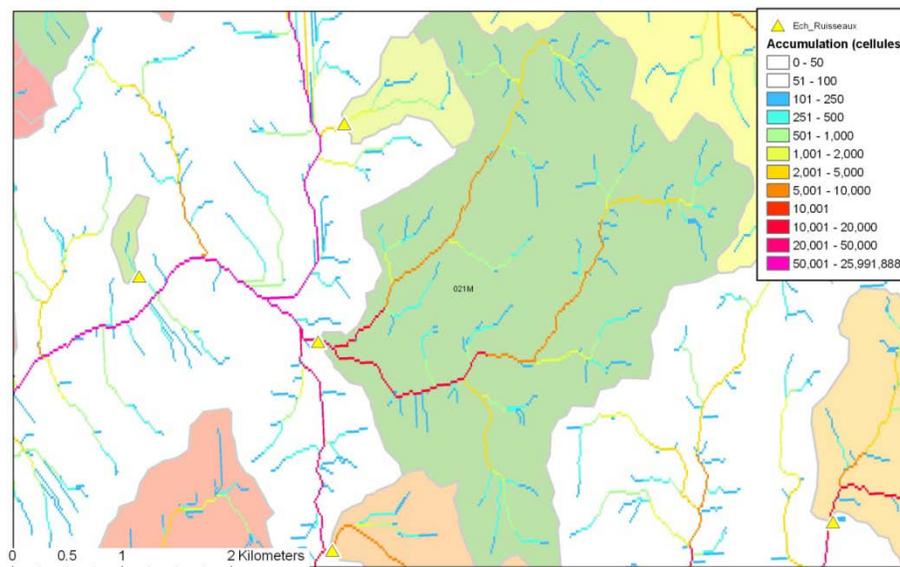

Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration

Partie A : Modélisation des réseaux hydrographiques à partir de modèles numériques de terrain

PROJET 2008-09



PAR : SYLVAIN TRÉPANIÉ

AVRIL 2009

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Trépanier, S., 2009. Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration. Partie A : Modélisation des réseaux hydrographiques à partir de modèles numériques de terrain. Rapport, Projet CONSOREM 2008-09, 28 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce rapport présente et valide une méthodologie permettant de modéliser les réseaux hydrographiques à partir de modèles numériques d'altitude (MNA). La modélisation des réseaux hydrographiques a plusieurs applications dans le contexte de la géochimie des sédiments de ruisseaux en exploration minérale. Elle permet notamment de mieux planifier les campagnes d'échantillonnage, de mieux identifier les tendances géochimiques et de déterminer des seuils et ainsi, de mieux planifier les campagnes de suivi des anomalies.

La première partie de ce rapport examine les fondements théoriques de la modélisation. Par la suite, les différents aspects pratiques de mise en œuvre de la modélisation sont examinés, notamment les différents logiciels disponibles pour y arriver.

Une méthode d'évaluation objective de la qualité de la modélisation hydrographique est présentée dans la seconde partie du rapport. Les différentes méthodes qui existent pour améliorer la qualité de la modélisation sont également examinées.

La méthodologie de modélisation des réseaux hydrographiques est finalement appliquée aux secteurs couverts par des levés de sédiments de ruisseaux du sud-ouest de la Province de Grenville, au Québec ainsi que sur deux secteurs de la boutonnière du Kerdous dans l'Anti-Atlas du Maroc.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures	iv
1 Introduction	1
2 Méthodologie de modélisation du réseau hydrographique et des bassins de drainage des échantillons	2
2.1 Fondements théoriques	2
2.2 Application pratique pour la géochimie des sédiments de ruisseaux.....	6
2.3 Logiciels de mise en œuvre de la modélisation	7
3 Évaluation de la qualité de la modélisation du réseau hydrographique et améliorations.....	8
3.1 Méthode d'évaluation de la qualité de la modélisation.....	8
3.2 Évaluation de la qualité de la modélisation en différents secteurs du Québec.....	8
3.3 Influence de la qualité de la modélisation sur les bassins de drainage des échantillons	10
3.4 Amélioration des MNA pour les rendre « hydrologiquement acceptables »	12
3.4.1 Qualité des MNA réalisés par l'algorithme ANUDEM.....	12
3.4.2 Méthodes d'amélioration des MNA.....	12
3.4.3 Mise en œuvre des méthodes d'amélioration.....	12
3.4.4 Comparaison de l'algorithme ANUDEM et de la méthode AGREE.....	13
4 Application au sud du Grenville	14
5 Application à la boutonnière de Kerdous, Anti-Atlas du Maroc.....	15
5.1 Production de nouveaux MNA à résolution de 1 seconde d'arc	17
5.2 Cartes hydrologiques des deux secteurs de la boutonnière	18
5.3 Déplacement des échantillons.....	20
5.4 Identification des cibles d'exploration.....	20
6 Conclusion	21
Références.....	22
Annexe 1 Méthodologie de modélisation des réseaux hydrographiques par ArcGIS.....	23
Annexe 2 Méthodologie de modélisation des réseaux hydrographiques par ILWIS 3.3 Académique	25
Annexe 3 Modélisation des réseaux hydrographiques pour le secteur du sud du Grenville	27
Annexe 4 Modélisation des réseaux hydrographiques pour la boutonnière de Kerdous, Anti-Atlas du Maroc	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Étapes préliminaires de la modélisation des bassins hydrographiques.....	2
Figure 2.	Modèle numérique d'élévation au 1 : 50K et données topographiques vectorielles, feuillet 31J08.....	2
Figure 3.	Système de codage des cartes de direction du drainage.....	3
Figure 4.	Carte de direction du drainage dérivée du MNA de la figure 3.....	4
Figure 5.	Carte d'accumulation du drainage dérivée de la carte de direction de drainage de la figure 4.	5
Figure 6.	Réseau hydrographique modélisé réalisé en appliquant un seuil sur la carte d'accumulation du drainage. Pour cet exemple, un seuil de 1000 a été appliqué.....	5
Figure 7.	Exemple de bassins de drainage d'échantillons de sédiments de ruisseaux.....	6
Figure 8.	Proportion d'erreurs par feuillet 1/50 000 sur des modélisations réalisées en vrac. Noter que les taux d'erreurs sont plus faibles dans les Appalaches et le Grenville.....	9
Figure 9.	Relation entre l'écart-type du MNA et la proportion d'erreurs de localisation de la modélisation ($r^2 = 0,26$).....	10
Figure 10.	Modélisation d'un secteur de 31P04 à partir du MNA original (non-modifié). Noter la différence entre la modélisation et la position réelle du cours d'eau (en noir); noter aussi le bassin de drainage de l'échantillon (point rouge) selon la modélisation.....	11
Figure 11.	Modélisation après la méthode "AGREE". Noter la bonne correspondance entre la modélisation et le cours d'eau réel, et le bassin de drainage de l'échantillon.....	11
Figure 12.	Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le feuillet 31J10, à partir du MNA brut.	13
Figure 13.	Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le feuillet 31J10, après l'application de la méthode "AGREE".	14
Figure 14.	Division de la région du sud du Grenville en 4 zones et accumulations du drainage.....	15
Figure 15.	Localisation de la boutonnière du Kerdous, Anti-Atlas du Maroc (tiré du site Web de l'ONHYM http://www.onhym.com/mine/PDF/promotion/KERDOUS.pdf	16
Figure 16.	Levés de minéraux lourds de Kerdous (source des données : ONHYM).....	16
Figure 17.	Modèles numériques d'élévation HydroSHEDS couvrant la région de Kerdous.	17
Figure 18.	Nouveau MNA produit pour le levé sud-est, résolution de 30 m. Le réseau hydrographique réel est superposé (bleu).....	18
Figure 19.	Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le MNA couvrant le levé nord, après l'application de la méthode "AGREE". Le taux d'erreurs, défini par des écarts de plus de 2 pixels (60 m), est de 6,5 %.....	19
Figure 20.	Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le MNA couvrant le levé sud-est de la boutonnière de Kerdous, après l'application de la méthode "AGREE". Le taux d'erreurs, défini par des écarts de plus de 2 pixels (60 m), est de 5,8 %.....	19
Figure 21.	Cibles d'exploration du levé nord (Kerdous), définies par valeur aurifère > 85e centile et accumulation < 15e centile.	20
Figure 22.	Cibles d'exploration du levé sud (Kerdous), définies par valeur aurifère > 85e centile et accumulation < 15e centile.	21

1 INTRODUCTION

De nombreuses méthodes de traitement des données de sédiments de ruisseaux publiées dans la littérature sont basées sur la définition des bassins de drainage des échantillons (p. ex. Spadoni, 2006; Ahadjie, 2003; Spadoni et al., 2005). Le bassin de drainage d'un échantillon de sédiment de ruisseau peut être défini comme la zone qui se draine vers la position de l'échantillon.

La définition des bassins de drainage des échantillons offre plusieurs opportunités pour l'exploration, entre autres :

- Orienter les campagnes de suivi des anomalies sur le terrain; les bassins versants délimitent la zone où peut se trouver la source.
- Orienter le choix des anomalies à considérer en priorisant les échantillons anormaux ayant un bassin versant de taille limitée.
- Orienter la prise d'échantillons lors d'une campagne d'échantillonnage pour optimiser la couverture géochimique d'une région.
- Fixer les seuils d'anomalies selon les lithologies du bassin de drainage, selon sa surface ou selon les dépôts de surface présents.

Les bassins de drainage des échantillons peuvent être définis en utilisant des cartes topographiques ou des modèles numériques d'altitude (MNA). Lorsque le nombre d'échantillons est relativement restreint, ils peuvent être dessinés manuellement en tenant compte des données topographiques. Cependant, lorsque le nombre d'échantillons augmente, la définition manuelle devient vite fastidieuse et relativement imprécise. Alternativement, il existe une approche permettant de définir de façon (semi-)automatique les bassins de drainage des échantillons à partir des MNA. Ces techniques automatisées ont l'avantage d'être beaucoup plus rapides et précises que la méthode manuelle. L'approche automatique se base sur une modélisation préalable du réseau hydrographique à partir des MNA. La modélisation du réseau hydrographique permet de définir entre autres un réseau hydrographique modélisé.

La modélisation des réseaux hydrographiques nécessite des MNA détaillés et de bonnes qualités. De plus, les traitements informatiques requis pour arriver à des résultats satisfaisants sont relativement lourds et demandent des ordinateurs puissants. Depuis quelques années, des MNA détaillés et basés sur les cartes topographiques nationales au 1/50 000 sont disponibles gratuitement grâce à l'initiative Geobase (www.geobase.ca). La disponibilité de ces MNA jumelée à l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs personnels rend maintenant possible la modélisation des réseaux hydrographiques dans un contexte d'exploration minérale.

La question qui se pose par rapport à ce type de modélisation demeure toutefois de savoir à quel point les MNA sont suffisamment précis pour bien représenter le réseau hydrographique réel. Un MNA sera qualifié « hydrologiquement acceptable » lorsque la modélisation du réseau hydrographique est « similaire » au réseau réel. La similarité est définie de façon pratique dans la section 3.

2 MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ET DES BASSINS DE DRAINAGE DES ÉCHANTILLONS

2.1 Fondements théoriques

La modélisation du réseau hydrographique consiste simplement à reconstituer de façon numérique et détaillée le flux de l'eau à la surface. La méthodologie générale de modélisation des bassins hydrographiques utilisée dans le cadre de ce projet est basée sur les travaux de Jenson et Domingue (1988). Trois étapes préliminaires de traitement, qui doivent être réalisées de façon séquentielle (**Figure 1**) y sont identifiées. Les différentes étapes sont illustrées à l'aide d'un exemple de MNA couvrant le feuillet 31J08 (**Figure 2**).

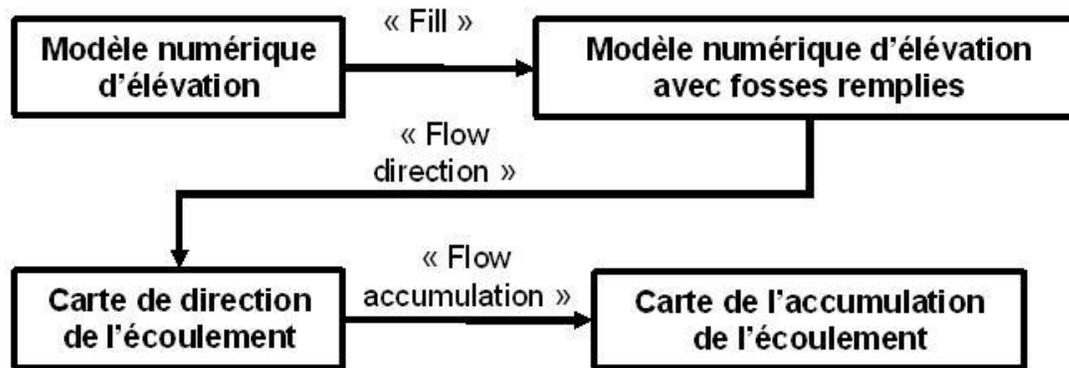


Figure 1. Étapes préliminaires de la modélisation des bassins hydrographiques.

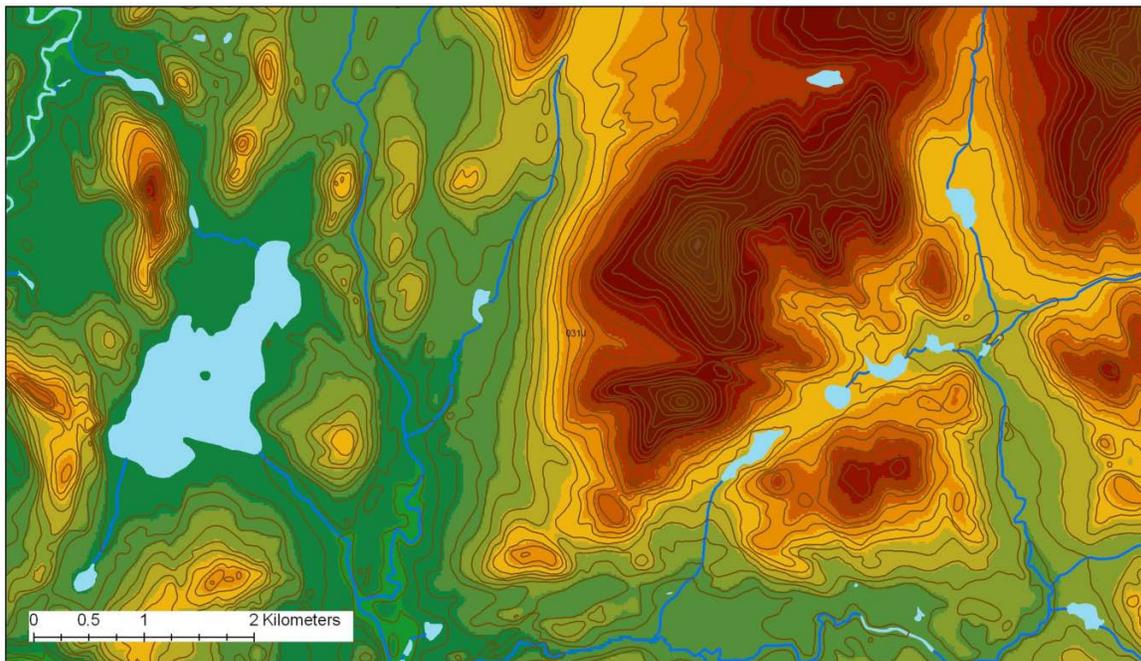


Figure 2. Modèle numérique d'élévation au 1 : 50K et données topographiques vectorielles, feuillet 31J08.

1. Remplir les dépressions dans le MNA

Les modèles numériques de terrain contiennent souvent de petites fosses qui sont communément causées par des imperfections dans le modèle. Ces fosses empêchent un écoulement correct. Un MNA dont les fosses ont été remplies est produit; toutes les cellules du MNA s'écoulent alors vers une de ses bordures.

2. Directions du drainage

Cette étape consiste à définir la direction de l'écoulement en chaque cellule du MNA. La direction de l'écoulement est codée selon un système numérique simple (**Figure 3** et **Figure 4**). L'algorithme de détermination de la direction de l'écoulement traite de façon cohérente tous les cas problématiques (par exemple, les secteurs plats où toutes les cellules adjacentes à la cellule considérée ont la même altitude que celle-ci). La carte de direction du drainage est réalisée à partir du MNA dont les dépressions ont été remplies.

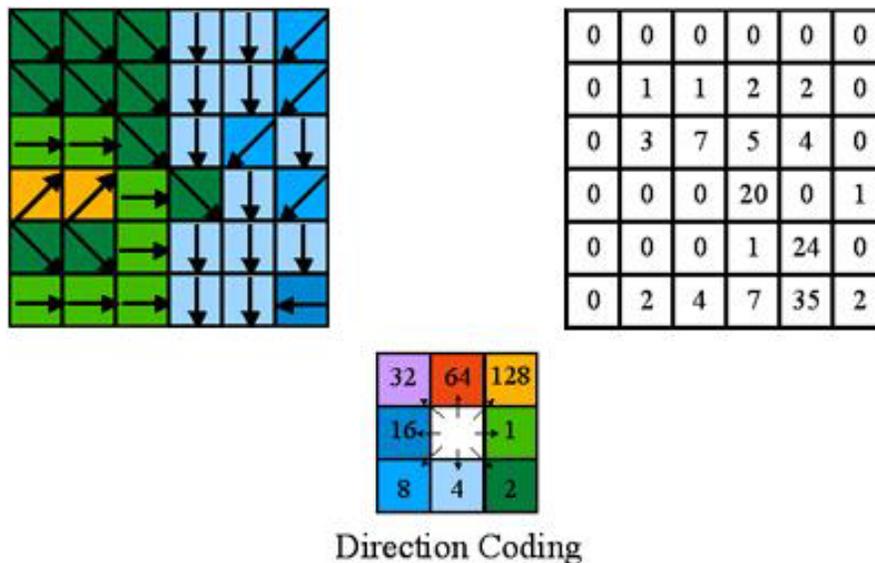


Figure 3. Système de codage des cartes de direction du drainage.

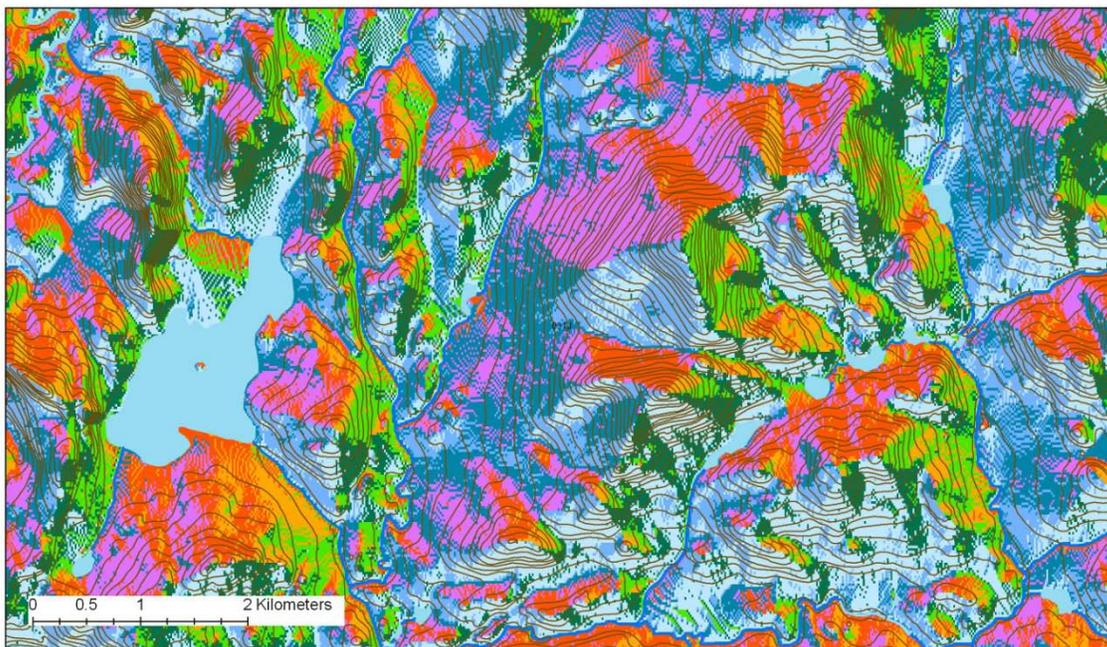


Figure 4. Carte de direction du drainage dérivée du MNA de la figure 3.

3. Accumulations du drainage

Cette troisième étape consiste à calculer, à partir de la carte de directions du drainage, le nombre de cellules du MNA qui se drainent vers une cellule donnée (**Figure 5**).

Les trois cartes précédentes permettent par la suite de définir plusieurs autres cartes hydrologiques. Voici deux exemples de cartes qui présentent un intérêt dans un contexte d'exploration minière :

A. Réseau hydrographique modélisé sous forte matricielle

En fixant un seuil minimum sur la carte d'accumulation du drainage, on peut définir le réseau hydrographique modélisé comme tel (**Figure 6**). La valeur du seuil peut être déterminée approximativement en comparant la carte d'accumulation du drainage avec le réseau hydrographique réel (c.-à-d. celui tracé sur les cartes topographiques). Il faut alors prendre une valeur de seuil qui fasse en sorte que tous les ruisseaux réels soient représentés sur le réseau modélisé. Le réseau hydrographique est représenté par une carte matricielle dans laquelle le réseau hydrographique a une valeur quelconque alors que le reste a une valeur « nulle » (« No Data »). On peut par la suite transformer cette carte matricielle en carte de polygones (vectorielle).

B. Bassins de drainage en des points quelconques du réseau hydrographique

Il est possible de définir le bassin de drainage en des points spécifiques du réseau hydrographique. En contexte d'exploration, il s'agit principalement de définir les bassins de drainage en des sites d'échantillons géochimiques. Cette définition s'effectue à partir d'une carte de direction de drainage. Le produit est une carte de polygones (**Figure 7**).

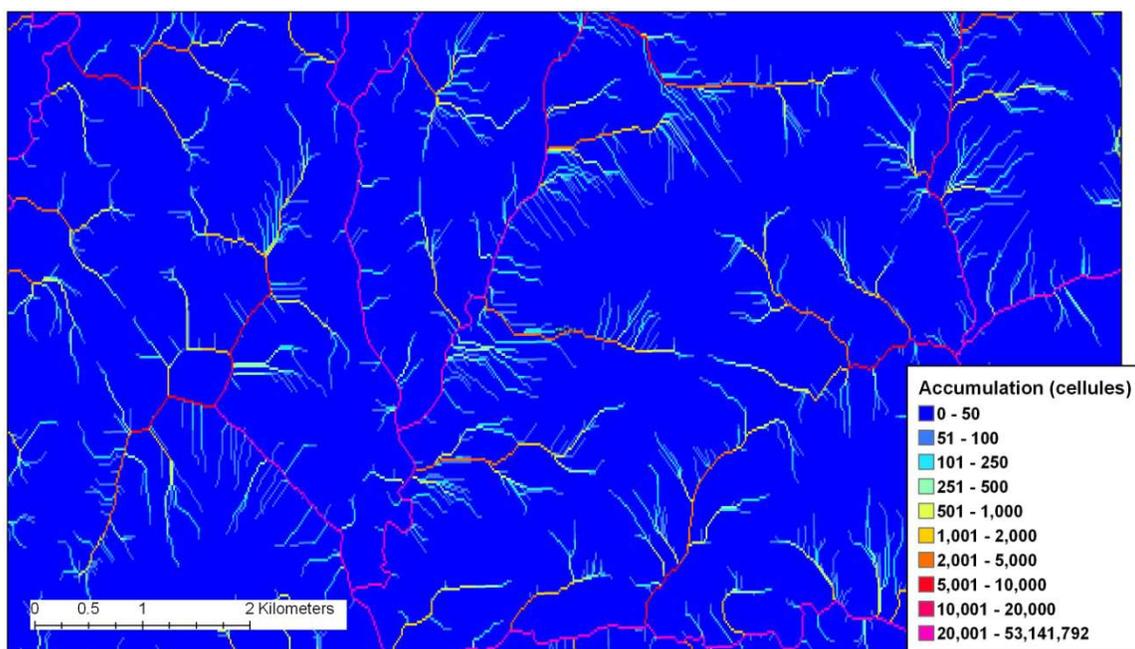


Figure 5. Carte d'accumulation du drainage dérivée de la carte de direction de drainage de la figure 4.

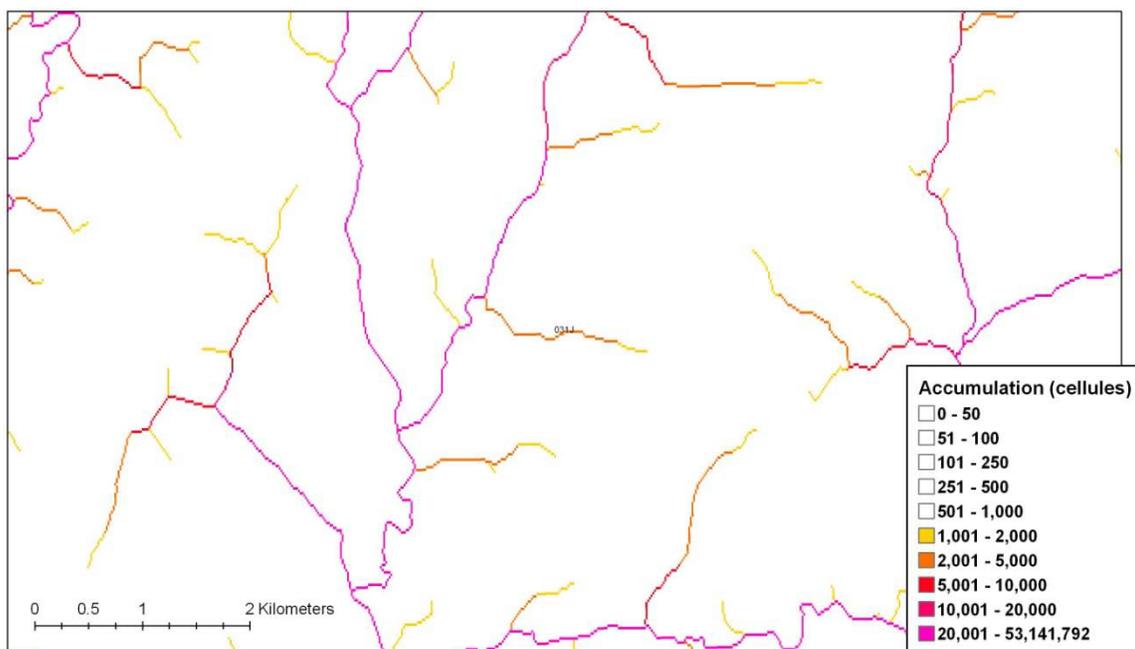


Figure 6. Réseau hydrographique modélisé réalisé en appliquant un seuil sur la carte d'accumulation du drainage. Pour cet exemple, un seuil de 1000 a été appliqué.

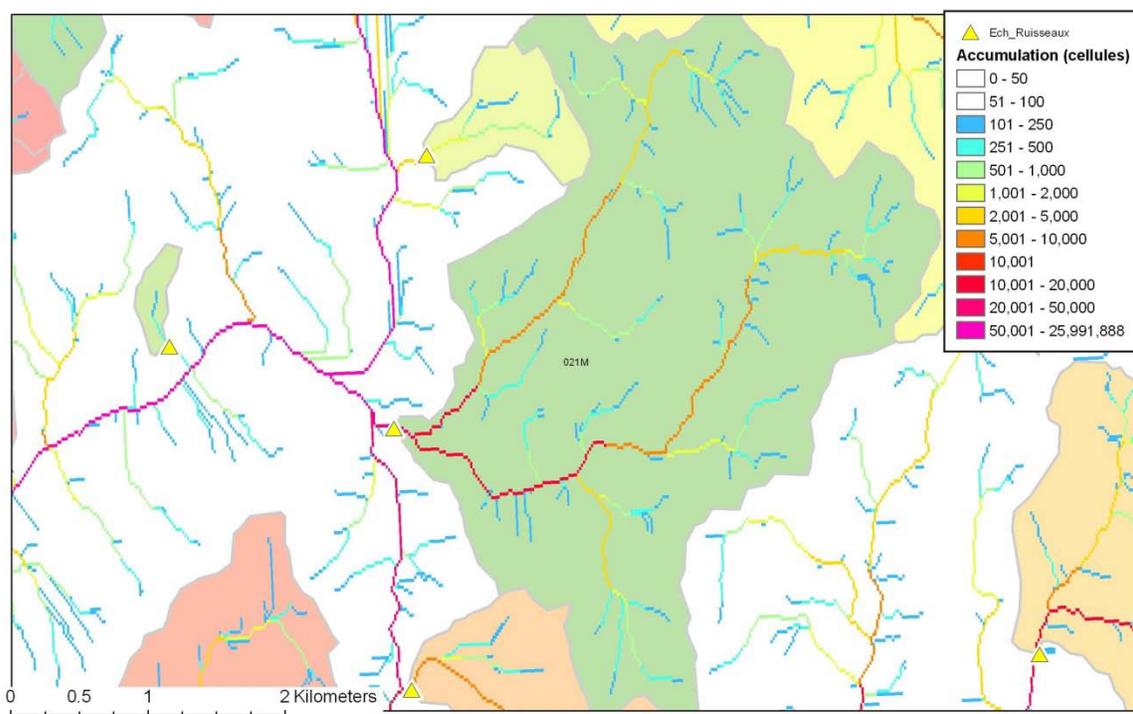


Figure 7. Exemple de bassins de drainage d'échantillons de sédiments de ruisseaux.

2.2 Application pratique pour la géochimie des sédiments de ruisseaux

Ajustement de la localisation des échantillons

En pratique, il existe une certaine imprécision sur la localisation des échantillons de sédiments de ruisseaux. Lorsque l'on compare la localisation des points d'échantillons et le réseau hydrographique modélisé, on trouve communément des décalages. Or, si on veut définir les bassins de drainage des échantillons, il est essentiel qu'ils soient localisés exactement sur le réseau hydrographique modélisé.

La méthode la plus évidente pour combler cette lacune est de déplacer manuellement chaque échantillon pour le ramener sur le cours d'eau défini par la modélisation. Il est préférable de consulter les cartes originales des échantillons lorsqu'elles sont disponibles et qu'elles contiennent le réseau hydrographique.

Cette méthode manuelle d'ajustement de la localisation des points devient relativement fastidieuse dans le cas de levés régionaux. L'expérimentation sur la base de données du Grenville montre toutefois que, dans la majorité des cas, les ajustements à effectuer sont relativement mineurs, souvent d'une ou deux cellules du MNA original. Dans de tels cas, on peut envisager d'ajuster automatiquement la localisation des échantillons pour les faire correspondre au réseau hydrographique modélisé. Deux méthodes différentes peuvent être envisagées pour ce faire :

1. Déplacer chaque échantillon vers le cours d'eau modélisé le plus proche, s'il est à moins d'une certaine distance.
2. Déplacer chaque échantillon vers la cellule ayant la valeur d'accumulation la plus élevée dans un certain rayon de l'échantillon.

La méthode (2) présente plusieurs problèmes évidents. D'abord, si un échantillon se trouve localisé près d'une jonction entre deux cours d'eau, il sera automatiquement déplacé vers le cours d'eau le plus important même si l'autre est en réalité plus proche. De plus, la méthode nécessite un choix non évident d'un rayon maximal de déplacement,

Pour ces raisons, la méthode (1) est préférable, car elle assure de toujours amener l'échantillon vers le cours d'eau le plus proche. L'utilisation d'un seuil de distance permet par la suite d'identifier facilement les échantillons qui sont à une distance irréaliste des ruisseaux modélisés et qui demandent une intervention manuelle. Toutefois, la méthode demande tout de même une définition correcte et préalable d'un seuil d'accumulation. Comme il sera mentionné dans la section suivante, la méthode (1) n'est pas directement supportée par les logiciels courants.

2.3 Logiciels de mise en œuvre de la modélisation

Certains logiciels permettent la mise en œuvre de la modélisation des réseaux hydrographiques. Deux logiciels ont été testés dans le cadre de ce projet. Les deux logiciels prennent en charge les opérations préliminaires du traitement (c.-à-d. remplissage des fosses, carte de direction et carte d'accumulation). Cependant, les opérations subséquentes ne sont pas supportées par tous les logiciels. En particulier, des lacunes sont présentes dans tous les logiciels pour la définition des bassins versants de points quelconques. Ces lacunes sont corrigées à l'aide d'un outil informatique CONSOREM.

1. ArcGIS 9.x

Les fonctions de modélisation hydrologique dans ArcGIS nécessitent l'extension optionnelle « Spatial Analyst ». L'extension prend en charge toutes les opérations nécessaires à la modélisation, sauf la définition des polygones des bassins de drainage. La fonction « Watershed », qui définit des bassins de drainage à partir de points, crée une carte matricielle (« raster ») plutôt que des polygones. Or, lorsque les bassins versants de deux échantillons se superposent, le bassin de l'échantillon en amont tronque celui de l'échantillon en aval sur la carte matricielle. Cette troncature rend donc cette fonction insatisfaisante en termes d'exploration.

Il faut finalement noter que ArcGIS prend en charge le déplacement automatique de points d'échantillonnage. Toutefois, la méthode supportée par ArcGIS est la méthode (2) de la section précédente, qui n'est pas la meilleure pour les raisons précédemment énoncées. L'[annexe 1](#) présente en détail les étapes nécessaires à la modélisation sur ArcGIS.

Par contre, il y a cependant une limite physique à la taille des secteurs qui peuvent être traités; cette limite peut être reliée à la mémoire disponible. La taille maximale déterminée empiriquement semble être de l'ordre de 10 000x10 000 cellules.

2. ILWIS 3.3

Le logiciel gratuit ILWIS 3.3 permet également de réaliser la modélisation du réseau hydrographique. L'[annexe 2](#) présente en détail les étapes nécessaires à la modélisation grâce à ILWIS.

ILWIS ne permet toutefois pas d'effectuer la délimitation des bassins de drainage des échantillons.

3. Outil CONSOREM d'assistance à la définition des bassins de drainage

Pour remédier aux lacunes des logiciels existants, un outil CONSOREM a été développé et est livré avec les données numériques du projet. Cet outil permet :

1. La création des polygones des bassins de drainage des échantillons à partir d'une carte de direction de drainage en format GRID (ArcGIS) et de la localisation des échantillons en format de point (Shapefile .SHP). Le produit est un fichier de polygones des bassins versants des échantillons.
2. Le déplacement automatique des échantillons vers le réseau hydrographique modélisé, fourni en format de polygones (Shapefile .SHP). Chaque échantillon est déplacé vers le réseau modélisé le plus proche. Le produit est un fichier de points des échantillons déplacés. Un champ du fichier produit indique la distance de déplacement effectuée. Une valeur maximale de déplacement peut être fixée pour empêcher des déplacements excessifs. Un champ indique alors si l'échantillon a été déplacé ou non.

3 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE LA MODÉLISATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ET AMÉLIORATIONS

3.1 Méthode d'évaluation de la qualité de la modélisation

L'exactitude de la modélisation est l'une des questions auxquelles il est important de répondre. Pour ce faire, une méthode d'évaluation de la qualité de la modélisation est nécessaire. La méthode proposée est la suivante :

1. Transformer le réseau hydrographique modélisé (en format de polygones) en points espacés à des intervalles réguliers (par exemple 500 m).
2. Calculer la distance de chaque point au cours d'eau réel le plus proche (polygones provenant des cartes topographiques vectorielles et numériques). En principe, si la modélisation est parfaite, toutes les distances seront faibles (< à la taille de 1/2 pixel du MNA).
3. Calculer la proportion des points de l'étape (1) qui se trouvent à plus d'une certaine distance des ruisseaux réels. Le seuil de distance utilisé dans les sections suivantes est de 2 cellules du MNA original (environ 40 mètres). Tous les points situés plus loin que ce nombre de cellules sont considérés comme des erreurs. La proportion de ces erreurs nous renseigne sur la qualité de la modélisation. Arbitrairement, on peut déterminer que plus de 5 % d'erreurs est inacceptable.

La méthodologie pour réaliser cette évaluation de qualité à partir de ArcGIS est expliquée dans la seconde partie de l'[annexe 1](#).

3.2 Évaluation de la qualité de la modélisation en différents secteurs du Québec

Pour évaluer la qualité de la modélisation, un nombre important (n = 139) de MNA de différents secteurs du Québec à l'échelle de 1/50 000 ont été récupérés du site gratuit Géobase (**Figure 8**). Ces MNA ont été traités en bloc sur ArcGIS à l'aide d'une procédure d'automatisation permettant de produire des cartes de réseaux hydrographiques modélisés à partir de chaque MNA. Les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000 ont également été récupérées du site Geogratis pour

obtenir le réseau hydrographique vectoriel réel tel qu'identifié par photos aériennes. Pour chacune de ces modélisations, la proportion d'erreurs a été calculée selon la méthode présentée dans la section précédente.

La proportion d'erreurs varie de 11 % à 73 % selon les feuillets si on utilise un seuil de 2 pixels (~40 m) comme tolérance. La médiane est de 38 %. Ces proportions sont nettement plus importantes que le seuil d'acceptation de 5 % déterminé. L'examen de la proportion d'erreurs selon les secteurs montre des tendances régionales très nettes (**Figure 8**). On peut constater qu'il existe une certaine relation entre la proportion d'erreurs et l'écart-type de l'altitude sur le MNA original (**Figure 9**). En effet, les erreurs les plus importantes se retrouvent sur les MNA à écart-type faible, qui représentent des zones à relief plus plat.

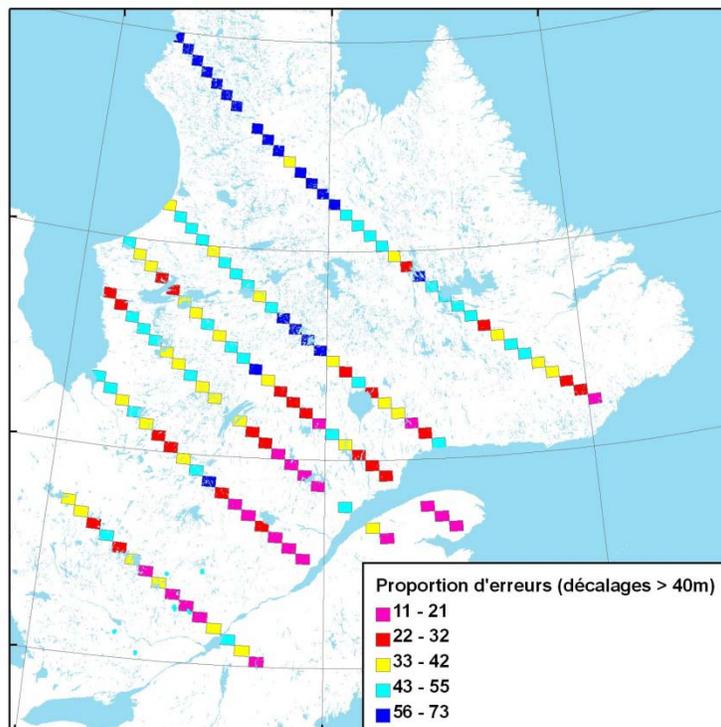


Figure 8. Proportion d'erreurs par feuillet 1/50 000 sur des modélisations réalisées en vrac. Noter que les taux d'erreurs sont plus faibles dans les Appalaches et le Grenville.

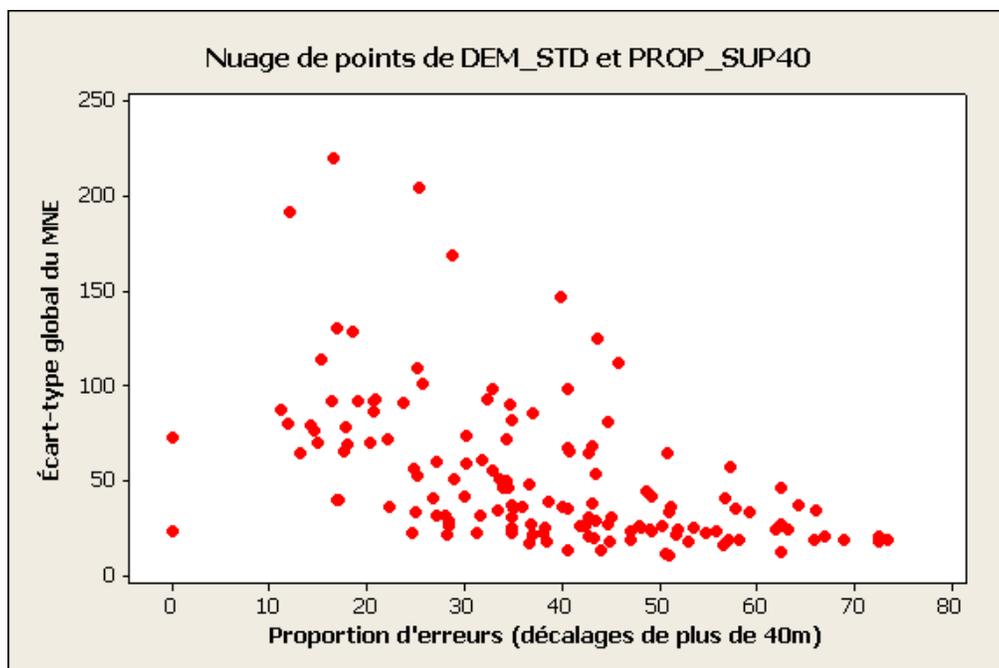


Figure 9. Relation entre l'écart-type du MNA et la proportion d'erreurs de localisation de la modélisation ($r^2 = 0,26$).

3.3 Influence de la qualité de la modélisation sur les bassins de drainage des échantillons

Les erreurs dans la position des cours d'eau modélisés par rapport à la réalité peuvent avoir des conséquences importantes sur les bassins de drainage des échantillons. La **Figure 10** montre une modélisation effectuée à partir d'un MNA non modifié. La localisation du bassin de drainage d'un échantillon y est indiquée; comme l'échantillon semble à première vue situé sur un affluent mineur d'un cours d'eau un peu plus important, son bassin de drainage est de taille limitée. Or, lorsque l'on compare la modélisation avec la localisation réelle du cours d'eau, on constate qu'en réalité l'échantillon a été prélevé sur le ruisseau principal et qu'en réalité, le bassin de drainage de l'échantillon est beaucoup plus large que ne l'indique la modélisation.

La **Figure 11** montre une modélisation du même secteur effectuée sur un MNA modifié par la méthode « AGREE » (voir section 3.4). On constate que le cours d'eau modélisé correspond maintenant parfaitement au cours d'eau réel. Le bassin versant de l'échantillon est alors beaucoup plus réaliste.

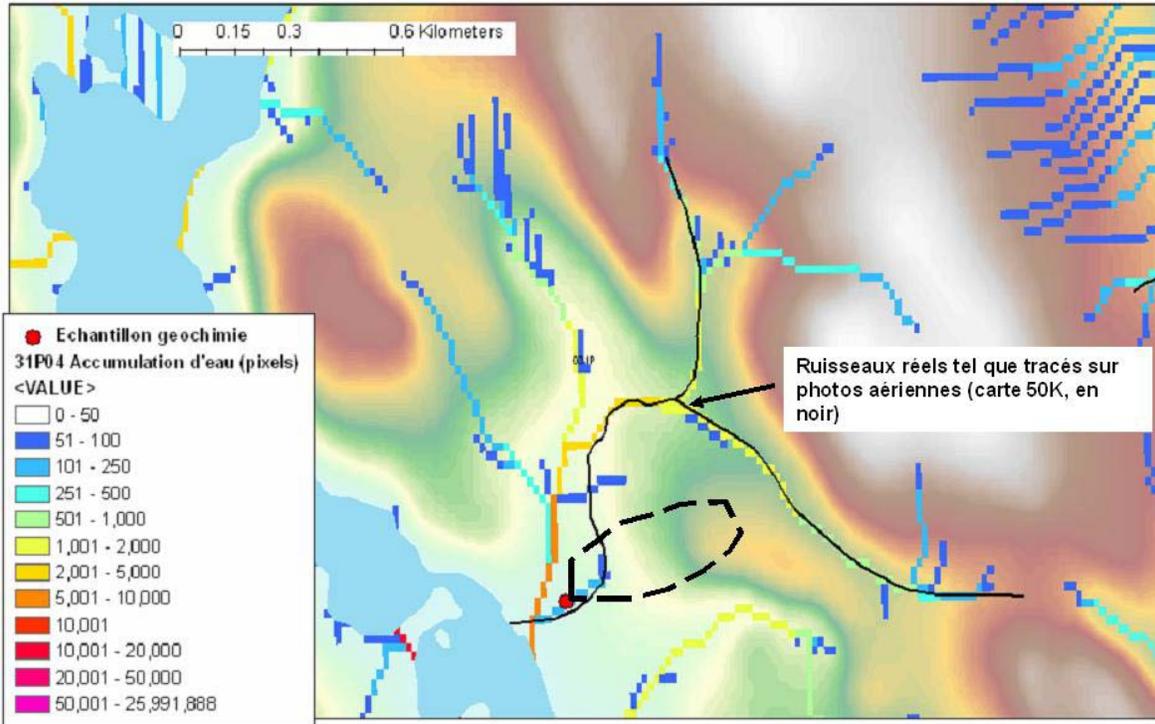


Figure 10. Modélisation d'un secteur de 31P04 à partir du MNA original (non-modifié). Noter la différence entre la modélisation et la position réelle du cours d'eau (en noir); noter aussi le bassin de drainage de l'échantillon (point rouge) selon la modélisation.

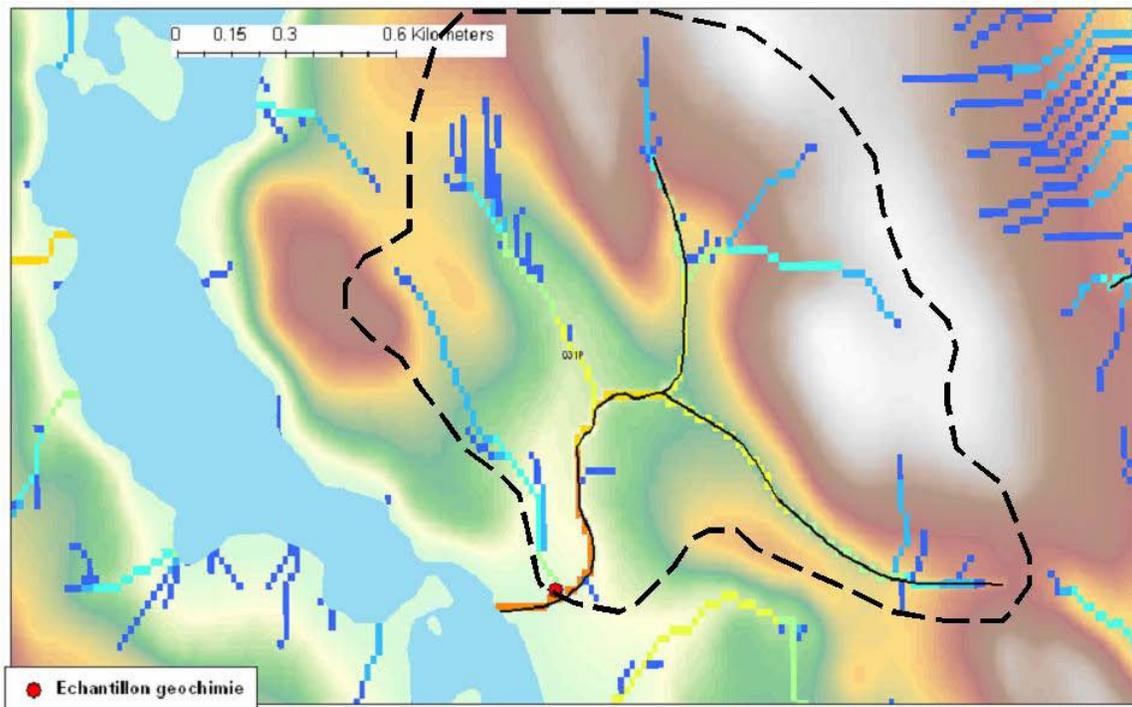


Figure 11. Modélisation après la méthode "AGREE". Noter la bonne correspondance entre la modélisation et le cours d'eau réel, et le bassin de drainage de l'échantillon.

3.4 Amélioration des MNA pour les rendre « hydrologiquement acceptables »

3.4.1 Qualité des MNA réalisés par l'algorithme ANUDEM

Les tests effectués dans les sections précédentes démontrent que les MNA publics ne sont pas en général de qualité suffisante pour effectuer une modélisation qui soit hydrologiquement acceptable. La documentation des MNA de Geobase explique que leur construction se base sur l'algorithme ANUDEM (Hutchinson, 1989). L'outil « Topo to Raster » de l'extension « Spatial Analyst » de ArcGIS utilise la version 4.6.3 de cet algorithme. Cet algorithme utilise les courbes de niveau en format vectoriel (provenant des cartes topographiques vectorielles) et la localisation des ruisseaux (polylignes) et des lacs (polygones) pour construire un MNA qui doit être en principe hydrologiquement acceptable. Les tests précédents indiquent toutefois que ce n'est pas le cas dans de nombreux exemples. On peut arriver à la même conclusion à partir des résultats de Kenny et Matthews (2005), qui ont effectué une modélisation du réseau hydrographique d'un secteur du sud-est de l'Ontario. L'utilisation de l'algorithme ANUDEM dans leur modélisation a mené à un taux d'erreurs variant de 3 à 13 % (selon l'ordre du ruisseau), si on utilise également un seuil de distance de 2 pixels (50 m) comme limite. Le taux d'erreurs dépasse alors le 5 % proposé précédemment.

3.4.2 Méthodes d'amélioration des MNA

En réalité, l'obtention d'un MNA hydrologiquement acceptable reste un problème de recherche fondamentale (Kenny et Matthews, 2005; Kenny et Matthews, 2008; Hellweger, 1997). En général, trois types de méthodes peuvent être utilisées pour obtenir une modélisation qui soit hydrologiquement acceptable (Kenny et Matthews, 2005) :

1. Construire le MNA en prenant compte directement la localisation des ruisseaux et cours d'eau dans le processus. C'est l'approche de ANUDEM, avec un succès variable.
2. « Creuser » le MNA d'un certain nombre de mètres à l'endroit où se trouvent les cours d'eau réels tels que vus sur les cartes topographiques vectorielles (méthode « AGREE » ou « stream burning », de Hellweger, 1997). Le MNA peut être creusé uniquement à l'endroit où se trouve le cours d'eau sur la carte, ou bien également de façon graduelle dans un certain rayon autour du cours d'eau. Pour obtenir de bons résultats, il faut également « creuser » le MNA à la position des lacs selon des polygones d'écoulement pour en assurer le drainage.
3. Modifier la carte de direction de drainage pour prendre en compte la position des cours d'eau (lacs, rivières, marécages; Kenny et Matthews, 2005).

3.4.3 Mise en œuvre des méthodes d'amélioration

La méthode « AGREE » (creusage du MNA; Hellweger, 1997) est probablement la plus simple à mettre en œuvre, car elle ne nécessite que des opérations géomatiques facilement disponibles dans la plupart des SIG. Par contre, elle requiert d'avoir une carte de l'écoulement des lacs en format de polylignes. Ces cartes, qui n'étaient pas disponibles auparavant, le seront graduellement pour tout le Canada à travers l'initiative « Réseau hydrographique national » de Géobase. Par contre, d'après les travaux Kenny et Matthews (2005), la méthode « AGREE » est légèrement moins efficace que la méthode (3). Cette dernière méthode est toutefois nettement plus complexe à mettre en œuvre et n'est pas pour l'instant réalisable à l'aide des outils géomatiques existants.

3.4.4 Comparaison de l'algorithme ANUDEM et de la méthode AGREE

On peut comparer l'amélioration obtenue en utilisant la méthode « AGREE » par rapport au MNA original, réalisé avec l'algorithme ANUDEM. Kenny et Matthews (2005), obtiennent, pour un certain secteur, un taux d'erreurs de 3 à 14 % pour ANUDEM, à 2 pixels de tolérance d'erreur. Le taux d'erreur pour le même secteur est de 0 à 6 % pour AGREE. La comparaison d'une modélisation effectuée sur le feuillet 31J10 donne 10 % d'erreurs pour ANUDEM par rapport à 2 % pour AGREE (Figure 12 et Figure 13).

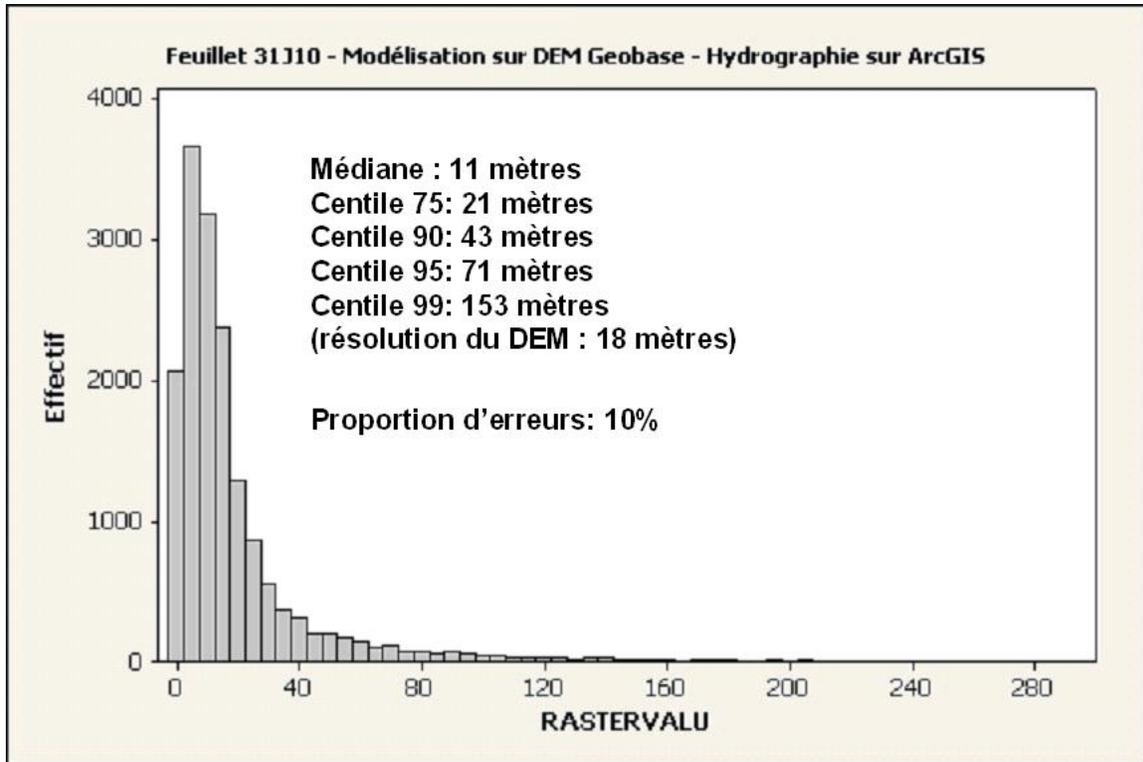


Figure 12. Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le feuillet 31J10, à partir du MNA brut.

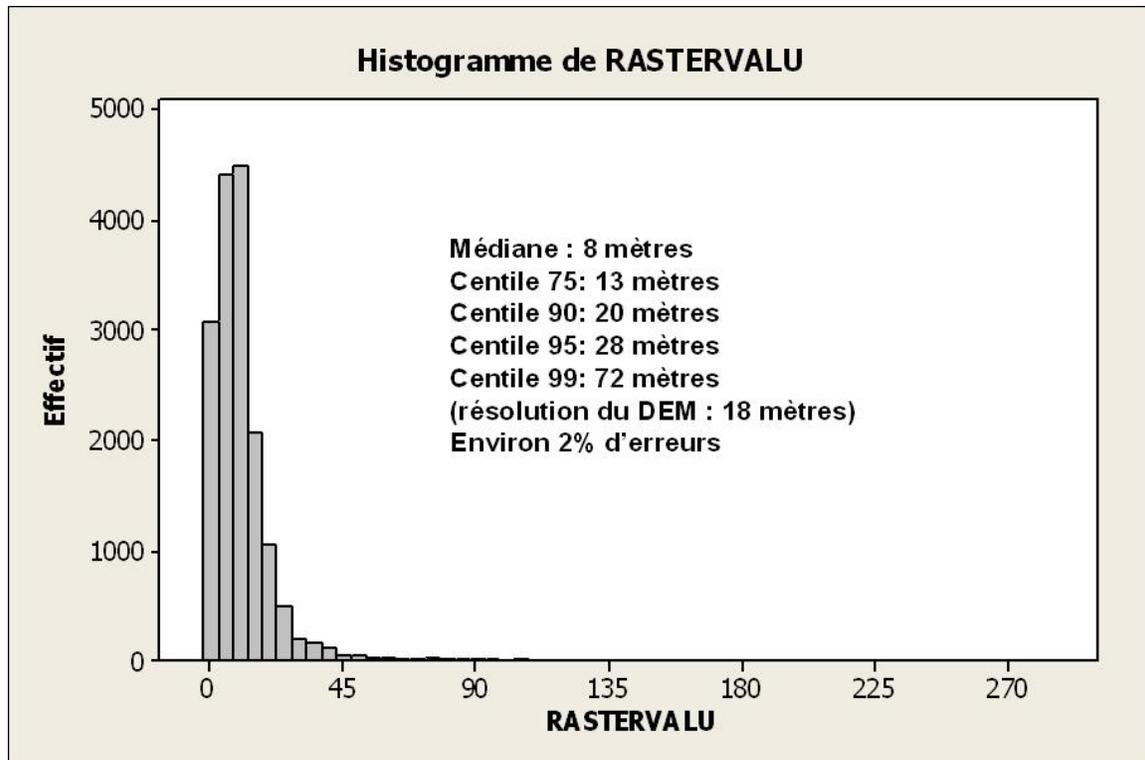


Figure 13. Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le feuillet 31J10, après l'application de la méthode "AGREE".

Ces résultats montrent une nette amélioration de la qualité des MNA par la méthode « AGREE ». En général, les MNA publics, réalisés par l'algorithme ANUDEM, ne sont pas suffisamment hydrologiquement acceptables pour obtenir une bonne modélisation. L'amélioration par la méthode AGREE permet d'obtenir des résultats qui sont nettement plus satisfaisants.

4 APPLICATION AU SUD DU GRENVILLE

La modélisation des réseaux hydrographiques a été appliquée au secteur couvert par les levés 1987040, 1988040, 1989040 et 1989045, de la partie sud de la Province de Grenville. La région a dû être divisée en 4 zones distinctes pour le traitement (**Figure 14**) car des problèmes survenaient avec les cartes de la modélisation lorsque l'ensemble de la région était traité (limites de mémoire probablement). L'[annexe 3](#) présente en détail les étapes spécifiques de la modélisation. La méthode « AGREE » a été utilisée pour améliorer la modélisation.

Tous les produits de la modélisation sont fournis avec les données numériques du projet.

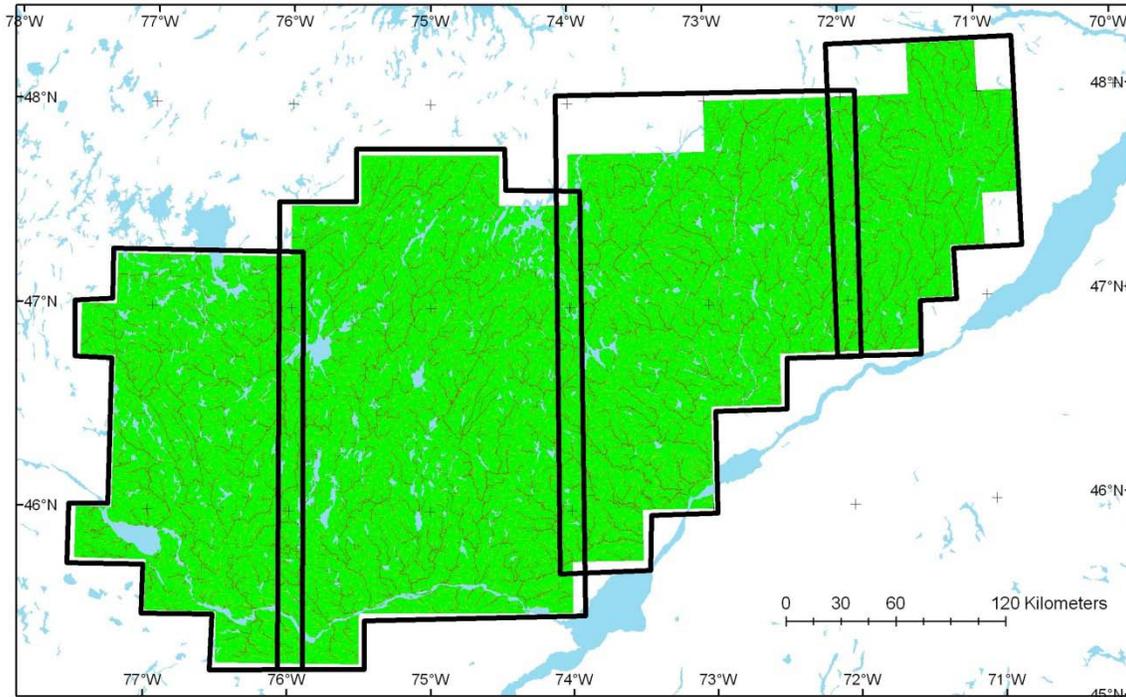


Figure 14. Division de la région du sud du Grenville en 4 zones et accumulations du drainage.

5 APPLICATION À LA BOUTONNIÈRE DE KERDOUS, ANTI-ATLAS DU MAROC

Afin de tester la méthodologie développée plus avant, deux secteurs de la boutonnière de Kerdous dans l'Anti-Atlas du Maroc (**Figure 15**) couverts par des levés de géochimie des minéraux lourds ont été analysés (**Figure 16**). De nombreuses anomalies aurifères s'y retrouvent. En fait, le nombre d'anomalies aurifères y est tellement important qu'il y est difficile d'identifier celles qui méritent des travaux de suivis sur le terrain.

Pour faire une meilleure sélection des anomalies, il a été proposé de modéliser le réseau hydrographique pour identifier les anomalies qui possèdent des bassins de drainage les plus restreints. Ces bassins de drainage de petite taille seront beaucoup plus faciles à prospecter par la suite.

La région a été couverte par le programme « Shuttle Radar Topographic Mission » (SRTM) de la NASA. Divers MNA et produits dérivés ont été réalisés par différents organismes à partir des données de la mission. Des MNA à une résolution de 3 secondes d'arc (90 m) sont disponibles pour l'ensemble de la planète. Les MNA utilisés ici proviennent de l'initiative HydroSHEDS (**Figure 17**). Cette initiative vise à produire des cartes hydrologiques régionales et globales à partir des données du MNA. Deux MNA différents sont nécessaires pour couvrir les deux secteurs d'intérêt.

La comparaison entre les MNA et les réseaux hydrographiques vectoriels (fournis par l'ONHYM¹ (partenaire du CONSOREM)) des deux secteurs montre que la résolution de 3 secondes d'arc est

¹ ONHYM : Office national des hydrocarbures et des mines du Maroc.

insuffisante par rapport à la densité du réseau réel. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire d'avoir un MNA plus précis.

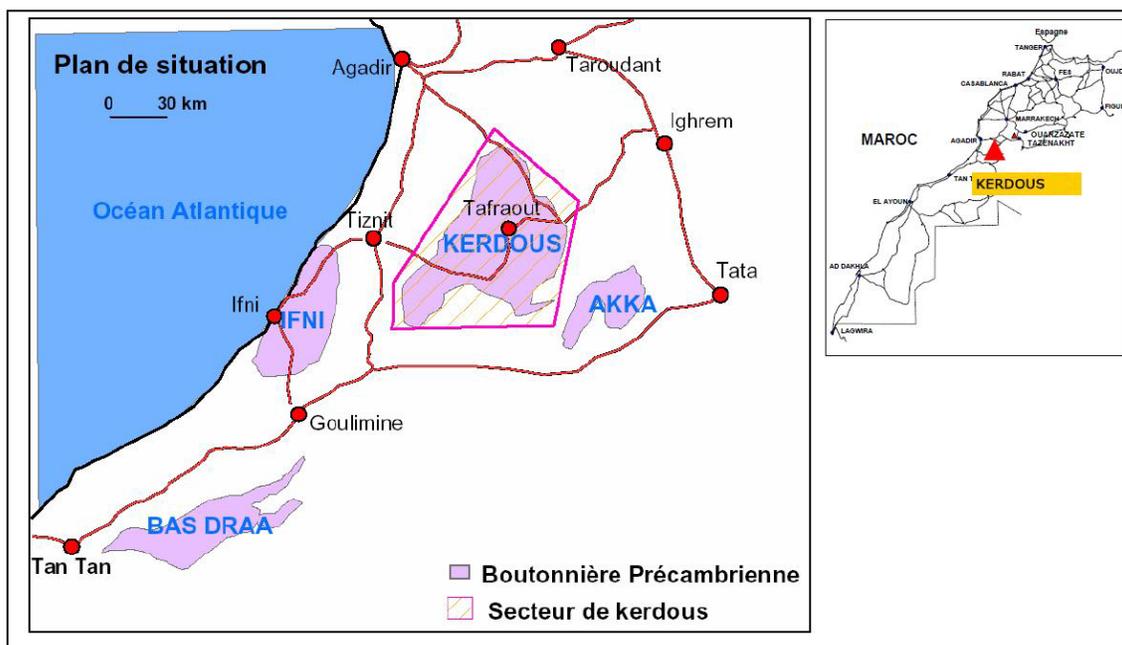


Figure 15. Localisation de la boutonnière du Kerdous, Anti-Atlas du Maroc (tiré du site Web de l'ONHYM <http://www.onhy.com/mine/PDF/promotion/KERDOUS.pdf>)

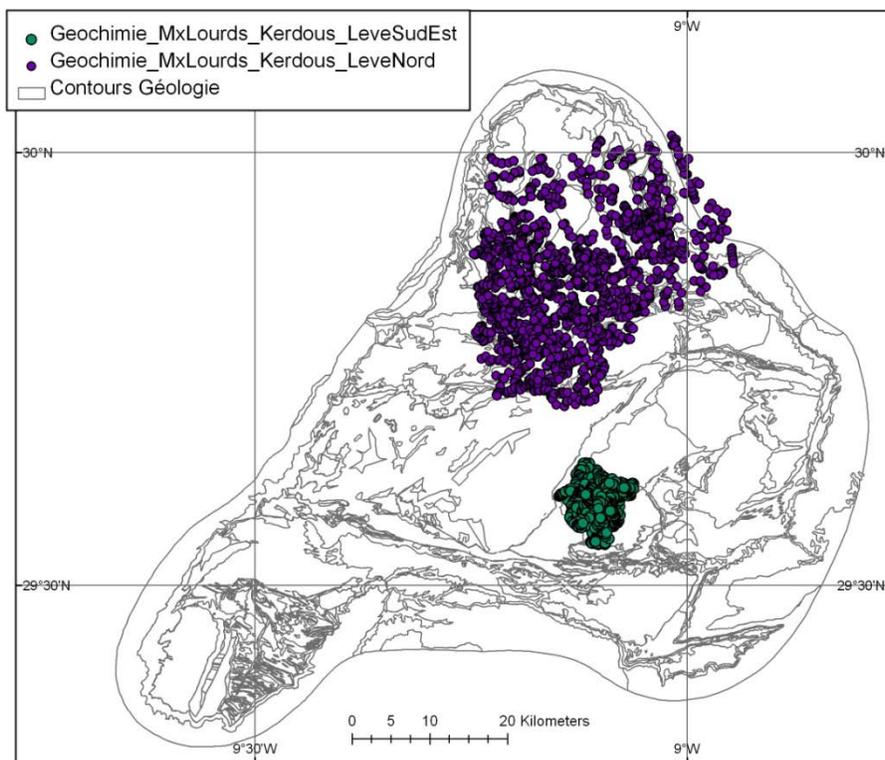


Figure 16. Levés de minéraux lourds de Kerdous (source des données : ONHYM).

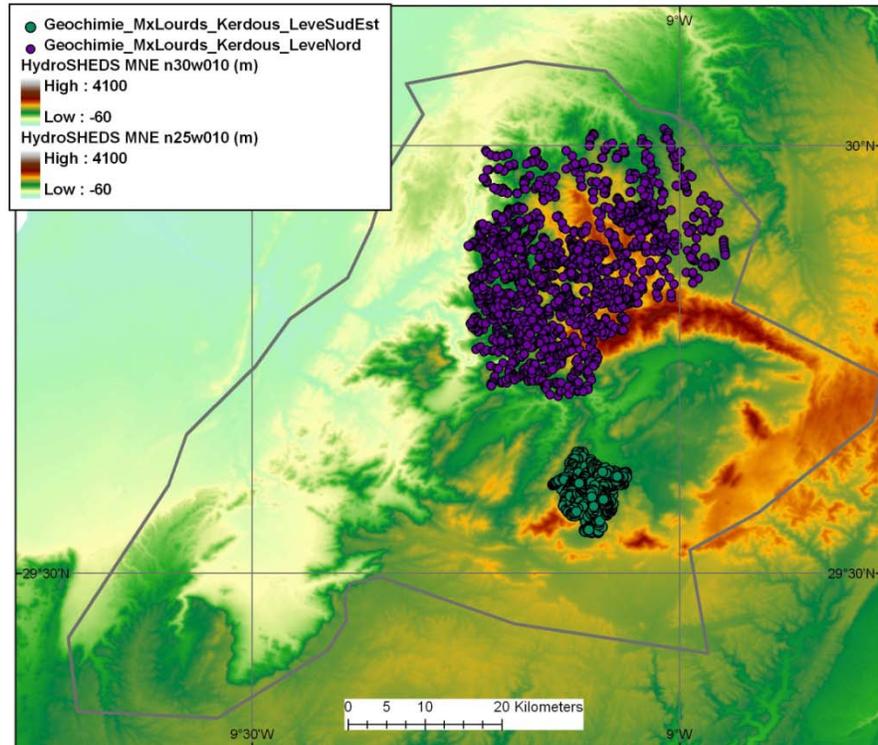


Figure 17. Modèles numériques d'élévation HydroSHEDS couvrant la région de Kerdous.

5.1 Production de nouveaux MNA à résolution de 1 seconde d'arc

Deux cartes de contours (polygones) à intervalles d'altitude de 15 m ont d'abord été dérivées des MNA d'HydroSHEDS. Chaque carte de contour couvre l'un des deux levés de géochimie.

Les réseaux hydrographiques vectoriels fournis par l'ONHYM ont été par la suite déplacés pour mieux correspondre au MNA, puis modifiés pour rejoindre les segments trop courts et pour faire pointer les segments vers l'aval.

A l'aide des contours et des réseaux hydrographiques modifiés, deux nouveaux MNA à une résolution de 1 seconde d'arc (env. 30 m) ont été créés en utilisant l'outil « Topo to Raster » de ArcGIS (qui utilise l'algorithme ANUDEM). La **Figure 18** montre le MNA couvrant le levé du sud-est. Finalement, les deux MNA produits ont été « creusés » en utilisant le réseau hydrographique réel, par la méthode « AGREE ».

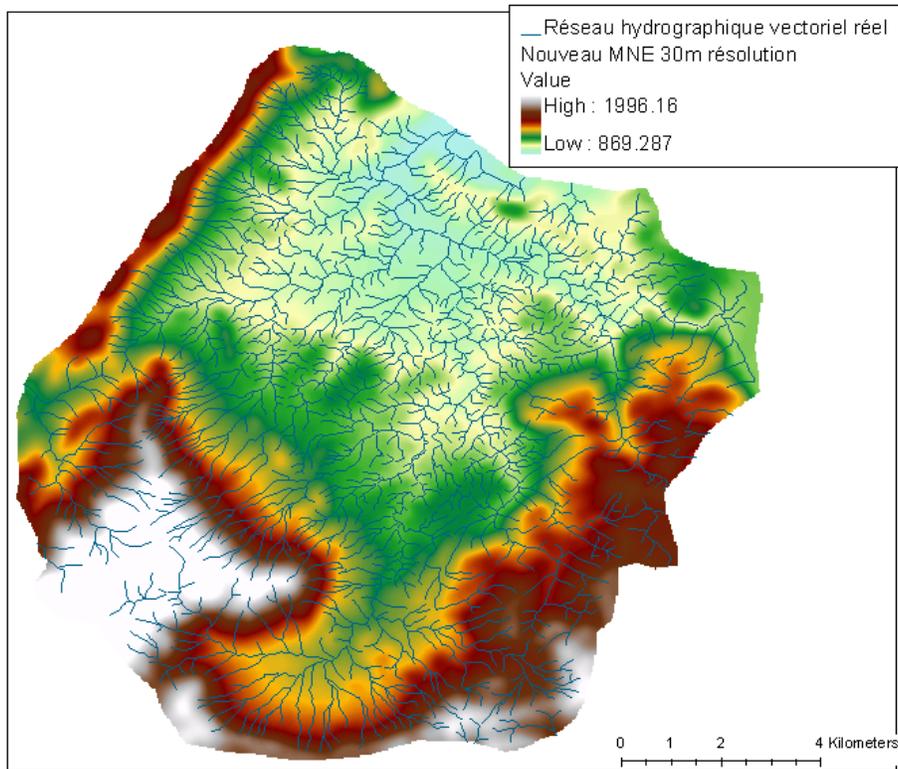


Figure 18. Nouveau MNA produit pour le levé sud-est, résolution de 30 m. Le réseau hydrographique réel est superposé (bleu).

5.2 Cartes hydrologiques des deux secteurs de la boutonnière

Les cartes hydrologiques préliminaires ont été produites à partir des MNA « creusés ». Les modélisations résultantes montrent de bonnes correspondances avec le réseau hydrographique réel (**Figure 19** et **Figure 20**). Le taux d'erreurs, défini par une erreur de plus de 2 pixels (60 m) est de 6,5 % pour le levé le plus au nord, et de 5,8 % pour le levé sud-est. Ces taux sont légèrement plus élevés que les taux d'acceptation définis précédemment, mais restent quand même raisonnables.

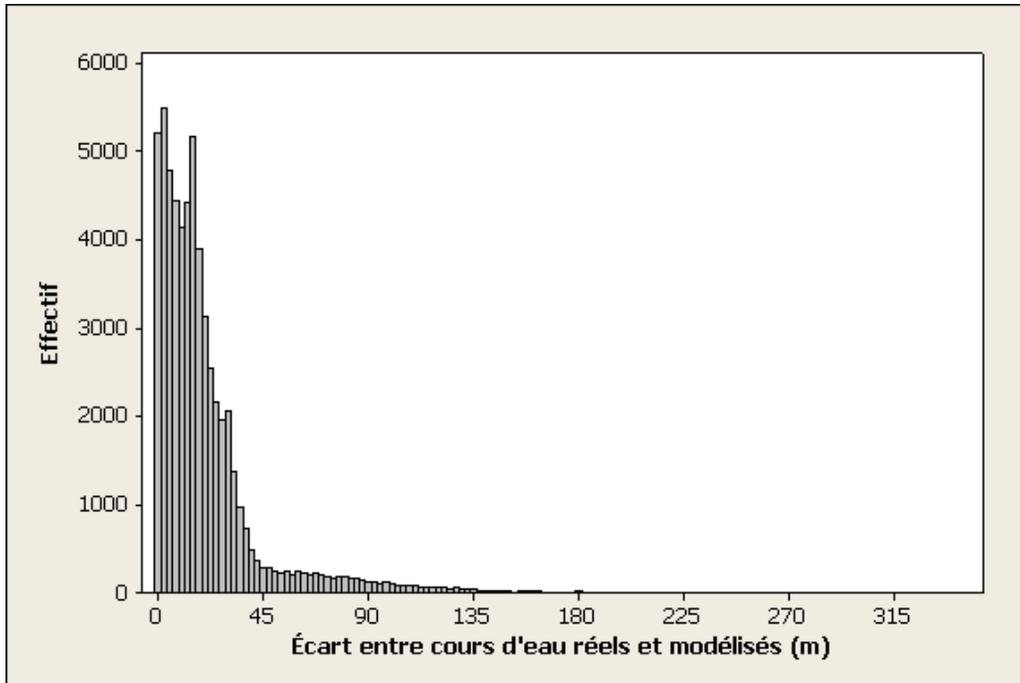


Figure 19. Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le MNA couvrant le levé nord, après l'application de la méthode "AGREE". Le taux d'erreurs, défini par des écarts de plus de 2 pixels (60 m), est de 6,5 %.

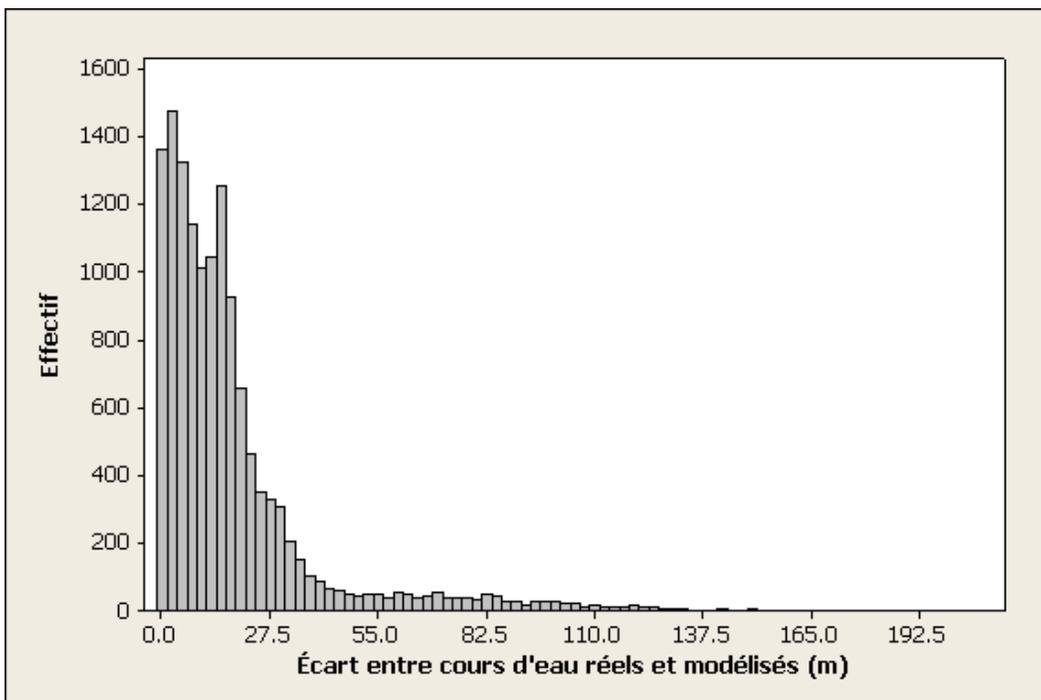


Figure 20. Écarts (mètres) entre le réseau hydrographique modélisé et le réseau réel pour le MNA couvrant le levé sud-est de la boutonnière de Kerdous, après l'application de la méthode "AGREE". Le taux d'erreurs, défini par des écarts de plus de 2 pixels (60 m), est de 5,8 %.

5.3 Déplacement des échantillons

Les échantillons de géochimie ont été par la suite déplacés pour correspondre au réseau hydrographique vectoriel remplacé. Par la suite, ils ont été ajustés pour correspondre aux cours d'eau modélisés. Finalement, les valeurs d'accumulation du drainage des cartes hydrologiques ont été rapportées aux échantillons.

5.4 Identification des cibles d'exploration

Des cibles d'exploration peuvent être définies en considérant les valeurs aurifères élevées jumelées à des ruisseaux représentant de petits bassins de drainage. On peut y arriver en fixant, pour chacun des deux levés, un seuil correspondant au 85^e centile sur les valeurs aurifères ainsi qu'un seuil sur le 15^e centile des valeurs d'accumulation.

Pour le levé le plus au nord, le 85^e centile en or est de 0,5 ppm, et le 15^e centile de l'accumulation est de 105 (~0,08 km²). Les cibles correspondent alors aux échantillons (30 échantillons sur 1 500) répondant aux deux critères (**Figure 21**). Pour le levé sud-est, le 85^e centile est de 10 ppm pour l'or et le 15^e centile est de 85 cellules pour l'accumulation. Onze échantillons sur 400 correspondent à ces deux critères réunis et sont des cibles d'exploration (**Figure 22**).

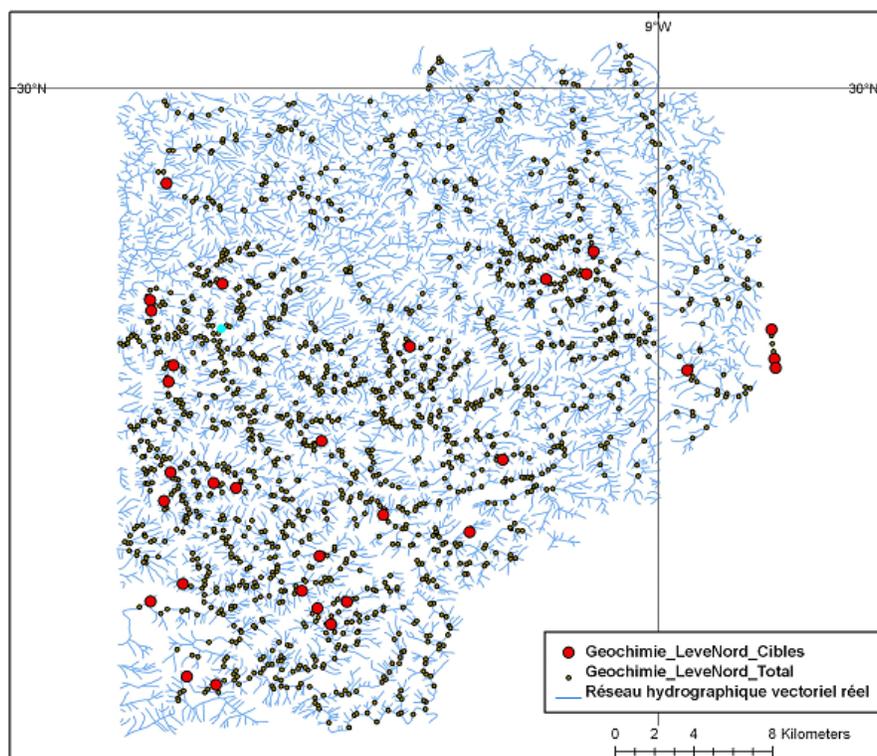


Figure 21. Cibles d'exploration du levé nord (Kerdous), définies par valeur aurifère > 85e centile et accumulation < 15e centile.

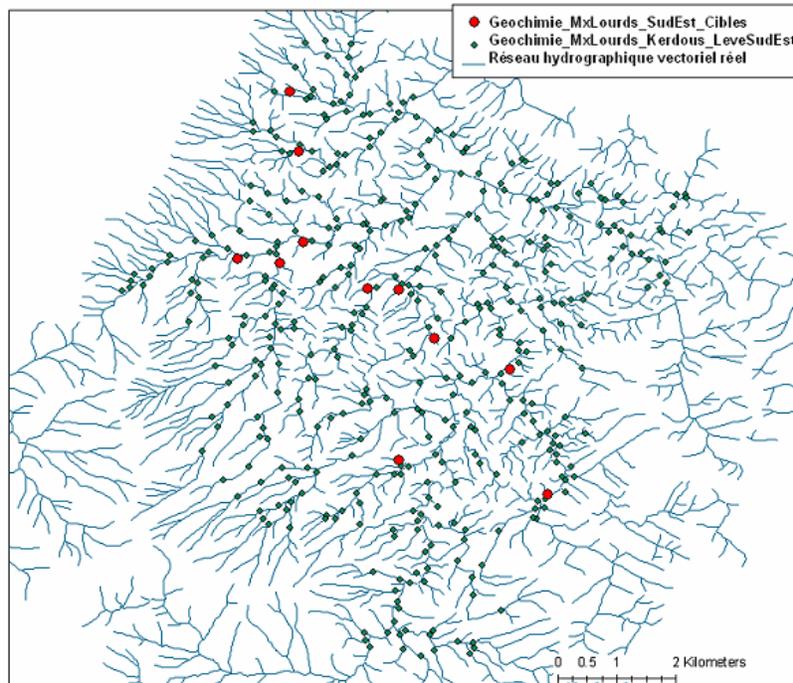


Figure 22. Cibles d'exploration du levé sud (Kerdous), définies par valeur aurifère > 85e centile et accumulation < 15e centile.

L'[annexe 4](#) présente, avec plus de détails, la méthodologie appliquée aux MNA du Kerdous. Tous les produits numériques correspondants aux traitements effectués sont livrés avec le projet.

6 CONCLUSION

Ce projet a permis de tester et valider les méthodologies existantes de modélisation des réseaux hydrographiques. Ces modélisations sont très utiles pour la planification, le suivi et l'analyse des levés de sédiments de ruisseaux. Des marches à suivre détaillées pour réaliser ce type de modélisation par deux logiciels de mise en œuvre (ArcGIS et ILWIS 3.3) ont été proposées. Un outil logiciel distinct a également été développé pour prendre en charge des aspects de la modélisation qui sont négligés ou imparfaitement réalisés par les outils existants (déplacement automatique des échantillons et construction de polygones des bassins de drainage).

Les modélisations des réseaux hydrographiques réalisées sur le sud du Grenville au Québec et sur deux levés de la boutonnière de Kerdous au Maroc montrent que, dans les deux cas, les modèles numériques d'élévation disponibles ne sont actuellement pas suffisamment précis pour obtenir des modélisations « hydrologiquement acceptables » des réseaux hydrographiques. Des traitements supplémentaires se sont avérés nécessaires. Dans le cas des levés du sud du Grenville, la méthode « AGREE » a été testée et s'est révélée suffisante pour obtenir des modélisations de bonne qualité. Dans le cas des levés du Kerdous, de nouveaux MNA plus précis ont dû être générés à partir des MNA existants et de l'hydrographie vectorielle pour obtenir des résultats satisfaisants. Les modélisations réalisées dans le secteur du Kerdous ont permis d'identifier des anomalies aurifères qui sont à proximité de leur source potentielle.

RÉFÉRENCES

- Ahadjie, J. 2003. Spatial data integration for classification of stream sediment geochemical anomalies in Masbate Island, The Philippines. Thèse de doctorat, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands.
- Hellweger, F., 1997. AGREE–DEM surface reconditioning system.
<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>.
Consulté en octobre 2008.
- Hutchinson, M.F. 1989. A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology* 106: 211-232.
- Initiative Géobase. www.geobase.ca. *Consulté en octobre 2008.*
- Jenson, S.K., Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data from geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 54, p. 1593-1600.
- Kenny, F., Matthews, B. 2005. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers and Geosciences* 31, p. 768-779.
- Kenny, F., Matthews, B., Todd, K. 2008. Routing overland flow through sinks and flats in interpolated raster terrain surfaces. *Computers and Geosciences* 34, p. 1417-1430.
- Spadoni, M. 2006. Geochemical mapping using a geomorphological approach based on catchments. *Journal of Geochemical Exploration* 90, p. 183-196.
- Spadoni, M., Voltaggio, M., Cavarretta, G. 2005. Recognition of areas of anomalous concentration of potentially hazardous elements by means of a subcatchment-based discriminant analysis of stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration* 85, p. 83-91.

Modélisation des réseaux hydrographiques par MNA

Les étapes suivantes s'appliquent à la modélisation d'un ensemble de modèles numériques d'élévation (MNA) en format .DEM, à l'aide de ArcGIS 9.2 :

1. Stocker tous les MNA dans un dossier dont le nom ne contient pas d'espaces (ex : C:\TEMP).
2. Transformer chaque MNA en format ArcGIS, par l'outil « Conversion Tools → To Raster → DEM to Raster ».
3. Faire une mosaïque des MNA au 1/50 000 par la fonction « Data Management → Raster → Mosaic to new raster » de ArcGIS. Dans « Environment → Raster Analysis Settings → Cell size », fixer la taille des cellules à la taille originale des cellules des MNA (ex : 0,0002083 pour les MNA de Geobase au 1/50 000).
4. L'étape 4 est optionnelle et sert à effectuer une amélioration du MNA par la méthode « AGREE »
 - 4.1. Récupérer tous les fichiers du réseau hydrographique vectoriel (lignes) correspondant aux MNA. Pour obtenir des résultats acceptables, l'écoulement dans les lacs doit être représenté par des lignes. Le thème « Filamentaire d'écoulement » du « Réseau Hydrographique National » de Géobase offre une telle représentation de l'écoulement réel du réseau hydrographique.
 - 4.2. Effectuer une mosaïque des fichiers vectoriels par l'outil « Data management → General → Merge ».
 - 4.3. Transformer la mosaïque des fichiers vectoriels en une carte matricielle de la même résolution que les MNA par la fonction « Conversion → To Raster → Polyline to Raster » de ArcGIS. Dans « Environment → Raster Analysis Settings → Cell size », fixer la taille des cellules à celle de la mosaïque des MNA. Dans « Environment → General Settings → Output coordinate system », choisir la même projection que la mosaïque des MNA. Dans « Environment → General Settings → Extent », choisir de définir l'étendue par la mosaïque des MNA.
 - 4.4. Effectuer une reclassification de la carte matricielle du réseau hydrographique vectoriel (4.3) par la fonction « Spatial Analyst → Reclass → Reclassify » en changeant les valeurs NoData en 0, et les valeurs positives par X (X étant le nombre de mètres choisi pour la méthode AGREE).
 - 4.5. Appliquer la méthode AGREE sur la mosaïque des MNA (3) par un calcul arithmétique sur carte matricielle (« Raster Calculator » de l'outil « Spatial Analyst ».) Carte (3) – Carte (4.4). Donc ici la méthode AGREE est appliquée uniquement sur la localisation exacte des cours d'eau, sans toutefois « creuser » les environs du cours d'eau.
5. Appliquer la fonction « Spatial Analyst → Hydrology → Fill » pour remplir les fosses du MNA, sur la mosaïque des MNA si la méthode « AGREE » a été appliquée ou le MNA creusé sur la méthode « AGREE » n'a pas été appliquée. Dans « Environment → Raster Analysis Settings → Cell size », fixer la taille des cellules à la taille originale des cellules des MNA (ex : 0,0002083 pour les MNA de Geobase au 1/50 000).

6. Appliquer la fonction « Spatial Analyst → Hydrology → Flow Direction » pour créer la carte de direction du drainage à partir du MNA rempli, produit à l'étape 5. Dans « Environment → Raster Analysis Settings → Cell size », fixer la taille des cellules à la taille originale des cellules des MNA (ex : 0.0002083 pour les MNA de Geobase au 1 :50000).
7. Appliquer la fonction « Spatial Analyst → Hydrology → Flow Accumulation » pour créer la carte d'accumulation du drainage à partir de la carte de direction du drainage. Dans « Environment → Raster Analysis Settings → Cell size », fixer la taille des cellules à la taille originale des cellules des MNA (ex : 0,0002083 pour les MNA de Geobase au 1/50 000).
8. Pour obtenir un réseau hydrographique modélisé, utiliser la fonction « Spatial Analyst → Conditional → Set Null ». Les paramètres suivants doivent être utilisés : Input conditional raster : carte d'accumulation du drainage (#7); Input false raster or constant value : 1; Expression : Value < seuil. Le seuil représente la limite d'accumulation du drainage qui définit le réseau hydrographique.
9. Une version vectorielle du réseau hydrographique peut être produite par l'outil « Spatial Analyst → Hydrology → Stream to feature ».
10. Déplacer chaque échantillon de sédiments de ruisseaux vers le ruisseau le plus proche grâce à l'outil CONSOREM. On doit fixer un déplacement maximal. Les ruisseaux non-déplacés sont indiqués dans un champ ajouté au fichier.
11. Appliquer l'outil CONSOREM pour tracer automatiquement les bassins de drainage à partir des échantillons déplacés (#10) et de la carte d'accumulation du drainage. Le fichier des échantillons doit contenir un champ d'identification unique pour les échantillons.

Évaluation de la qualité de la modélisation

12. Transformer les lignes de la mosaïque du réseau hydrographique réel (voir #4.1 de la modélisation) en points par la méthode « Data management → Features → Feature vertices to points ».
13. Calculer la distance au réseau hydrographique modélisé (#8) par la fonction « Spatial Analyst → Distance → Euclidian Distance ».
14. Extraire les valeurs de distance (#13) aux points du réseau hydrographique (#12) par la fonction « Spatial Analyst → Extraction → Extract values to points ». Un champ est ajouté à la couche de points (#12) qui représente la distance de ce point au ruisseau modélisé le plus proche (champ « Extract »).
15. Faire un histogramme des distances pour évaluer la qualité de la modélisation. Une modélisation est bonne lorsque le 95^e centile des distances est inférieur à 2 fois la résolution du MNA.

[Retour au texte](#)

ANNEXE 2 MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION DES RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES PAR ILWIS 3.3 ACADÉMIQUE

Modélisation des réseaux hydrographiques par MNA

Les étapes suivantes s'appliquent à la modélisation d'un ensemble de modèles numériques d'élévation (MNA) en format .DEM, à l'aide de ILWIS 3.3 Academic. Cette version est incluse avec les données numériques du projet.

1. Stocker tous les MNA de format .DEM dans un dossier.
2. Transformer chaque MNA en format ILWIS, par l'outil « Import/Export → Import via GDAL ».
3. Faire une mosaïque des MNA par la fonction « Raster operations → Glue Raster Maps ». Choisir la projection d'un des MNA originaux.
4. L'étape 4 est optionnelle et sert à effectuer une amélioration du MNA par la méthode « AGREE ».
 - 4.1 Récupérer tous les fichiers du réseau hydrographique vectoriel (lignes) correspondant aux MNA. Pour obtenir des résultats acceptables, l'écoulement dans les lacs doit être représenté par des lignes. Le thème « Filamentaire d'écoulement » du « Réseau Hydrographique National » de Géobase offre une telle représentation de l'écoulement réel du réseau hydrographique.
 - 4.2 Effectuer une mosaïque des fichiers vectoriels par l'outil « Vector Operations → Segments → Glue segment maps ».
 - 4.3 Appliquer la méthode AGREE sur la mosaïque des MNA par l'outil « DEM hydro-processing → Flow Modification → DEM optimization ». Cette fonction est une mise en œuvre de la méthode « AGREE ». Dans « Input DEM », choisir la mosaïque des MNA (#3). Dans « Drainage map », choisir la mosaïque des ruisseaux (#4.2). Pour la méthode « AGREE » appliquée seulement sur le tracé des ruisseaux (sans tampons), indiquer « Buffer Distance = 0 », « Smooth drop = 0 », « Sharp drop = X », où X est le nombre de mètres utilisé pour creuser le MNA.
5. Appliquer la fonction « DEM hydro-processing → Flow Determination → Fill sinks » pour remplir les fosses du MNA, sur la mosaïque des MNA si la méthode « AGREE » a été appliquée ou le MNA creusé sur la méthode « AGREE » n'a pas été appliquée.
6. Appliquer la fonction « Spatial DEM hydro-processing → Flow Determination → Flow direction » pour créer la carte de direction du drainage à partir du MNA rempli, produit à l'étape 5. Utiliser l'option « Steepest slope », et cocher l'option « Parallel Drainage correction Algorithm ».
7. Appliquer la fonction « DEM hydro-processing → Flow Determination → Flow Accumulation » pour créer la carte d'accumulation du drainage à partir de la carte de direction du drainage.
8. Pour obtenir un réseau hydrographique modélisé, utiliser la fonction « DEM hydro-processing → Network and catchment extraction → Drainage network extraction ». Le seuil représente la limite d'accumulation du drainage qui définit le réseau hydrographique.

9. Exporter la carte d'accumulation du drainage en format ArcInfo ASCII (.ASC) avec l'outil « Import/Export → Export ».
10. Déplacer chaque échantillon de sédiments de ruisseaux vers le ruisseau le plus proche grâce à l'outil CONSOREM. On doit fixer un déplacement maximal. Les ruisseaux non déplacés sont indiqués dans un champ ajouté au fichier.
11. Appliquer l'outil CONSOREM pour tracer automatiquement les bassins de drainage à partir des échantillons déplacés (#10) et de la carte d'accumulation du drainage. Le fichier des échantillons doit contenir un champ d'identification unique pour les échantillons.

[Retour au texte](#)

ANNEXE 3 MODÉLISATION DES RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES POUR LE SECTEUR DU SUD DU GRENVILLE

Les étapes suivantes ont été effectuées pour chacune des zones de la FIGURE 13, pour la modélisation :

1. Récupéré tous les MNA au 1/50 000 de la zone du site Geobase.
2. Récupéré tous les réseaux hydrographiques « réels » au 1/50 000 du site Geobase (Réseau Hydrographique National). Le thème « Filamentaire d'écoulement » a été utilisé pour représenter l'écoulement réel du réseau hydrographique. Ce thème représente par des polygones, l'écoulement dans les lacs et les ruisseaux.
3. Effectué une mosaïque des MNA au 1/50 000 par la fonction « Data Management → Raster → Mosaic to new raster » de ArcGIS.
4. Effectué une amalgamation de tous les « Filamentaires d'écoulement » en un seul fichier.
5. Transformé l'amalgamation des « Filamentaires » en une carte matricielle de la même résolution que les MNA par la fonction « Conversion → To Raster → Polyline to Raster » de ArcGIS.
6. Effectuée une reclassification de la carte matricielle (5) pour changer les valeurs positives en une valeur de 10, et les valeurs de NoData en 0 par la fonction « Spatial Analyst → Reclass → Reclassify ».
7. Appliqué la méthode AGREE sur la mosaïque des MNA (3) par un calcul arithmétique sur carte matricielle (« Raster Calculator » de l'outil « Spatial Analyst ». Carte (3) – Carte (6). Donc ici la méthode AGREE a été appliquée uniquement sur la localisation exacte des cours d'eau, sans toutefois « creuser » les environs du cours d'eau.
8. Appliqué successivement les fonctions du module « Spatial Analyst → Hydrology »: « Fill », «Flow Direction », « Flow Accumulation » pour réaliser les cartes préliminaires de la modélisation.
9. Appliqué un seuil de 50 comme valeur de coupure sur les cartes d'accumulation du drainage pour obtenir des ruisseaux modélisés, en utilisant la fonction « Spatial Analyst → Conditional → Set Null ». La valeur de 50 a été obtenue de façon arbitraire en comparant les cartes d'accumulation du drainage et les filamenteuses d'écoulement.
10. Transformé le drainage matriciel en drainage vectoriel par la fonction « Stream to Feature ».
11. Déplacé les échantillons de géochimie de ruisseaux pour les faire correspondre au réseau hydrographique modélisé (voir annexe 4).

[Retour au texte](#)

ANNEXE 4 MODÉLISATION DES RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES POUR LA BOUTONNIÈRE DE KERDOUS, ANTI-ATLAS DU MAROC

Deux modèles numériques de terrain sont produits pour le levé de la partie nord et pour celui de la partie sud-est. Il est à noter qu'une petite partie du levé de la région nord manque dans le modèle.

Étapes de construction :

1. Transformé le modèle numérique de terrain de la NASA (STRM) au 90 m en contours vectoriels. Par la fonction Spatial Analyst --> Surface --> Contour, avec un intervalle de 15m.
2. Déplacé le réseau hydrographique de la partie nord, puis celui de la partie sud (réseaux vectoriels fournis par l'ONHYM), pour le faire correspondre le mieux possible avec les vallées vues sur le modèle numérique original. Le réseau déplacé et fusionné pour les deux secteurs (fichier Reseau_Hyd_Merge_wgs1984) est inclus. Cela permet de comparer le déplacement avec les fichiers originaux en votre possession.
3. Complété le réseau hydrographique vectoriel réel existant pour rejoindre les lignes, faire des intersections et s'assurer que la direction des lignes est la même que l'écoulement de l'eau (les lignes ont été inversées au besoin). En particulier, le réseau hydrographique de la partie nord était très incomplet (il a fallu rejoindre les petits bouts de cours d'eau ensemble).
4. Déplacé les échantillons existants de la partie nord et de la partie sud-est pour les faire correspondre aux réseaux hydrographiques déplacés au point 2
5. Utilisé la méthode Spatial Analyst → Interpolation → Topo to Raster pour créer des modèles numériques de cellules de 0,0003 degrés (environ 30 m) séparés pour les deux secteurs, en utilisant les contours et les réseaux hydrographiques séparés. Des fichiers de contours séparés ont été produits pour les deux secteurs et sont inclus également. NOTE : pour obtenir un modèle numérique hydrologiquement acceptable, il faut avoir la localisation des cours d'eau. C'est pourquoi que seuls les deux secteurs pour lesquels le réseau hydrographique est disponible ont été utilisés.
6. Pour obtenir une meilleure correspondance entre le réseau hydrographique réel, la méthode AGREE a été appliquée aux modèles produits au point 4). La méthode consiste à « creuser » (ici de 20 m) le MNT à l'endroit où des cours d'eau réels sont présents. Ceci permet une modélisation nettement meilleure par la suite.
7. Produit les différentes cartes de modélisation à partir du modèle « creusé » pour les deux secteurs.
8. Ajusté finalement les échantillons pour les faire correspondre exactement au réseau hydrographique modélisé. Les fichiers de géochimie déplacés sont inclus également
9. Calculé l'accumulation d'eau selon le réseau hydrographique modélisé aux points d'échantillons. Les échantillons ont maintenant un champ supplémentaire appelé « ACCUMUL » qui représente l'accumulation d'eau, ou la surface du bassin versant en cellules, au point d'échantillonnage.
10. Calculé l'erreur de la modélisation par rapport à la réalité.

[Retour au texte](#)