



HAL
open science

Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de l'Arc en Maurienne Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace

M. Bertrand

► **To cite this version:**

M. Bertrand. Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de l'Arc en Maurienne Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace. Sciences de l'environnement. 2009. hal-02592075

HAL Id: hal-02592075

<https://hal.inrae.fr/hal-02592075>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de stage

Master 2 SIG et Gestion de l'Espace

Université Jean Monnet - ENISE – Saint Etienne



Caractérisation du fonctionnement hydro - sédimentaire
du bassin versant de l'Arc en Maurienne

Mise en place d'un Système d'Information Géographique,
analyse spatiale et segmentation de l'espace

Présenté par :

Mélanie Bertrand

∞ Mars – Août 2009 ∞

Responsables : Jérôme Le Coz, Flora Branger – Cemagref,

Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique, Lyon



AVANT PROPOS

Je tiens à remercier Jérôme Le Coz et Flora Branger, chercheurs au Cemagref, qui ont suivi mon travail pendant toute la durée de ce stage, et également Michel Lang responsable de l'unité de recherche Hydrologie / Hydraulique pour m'avoir acceptée dans son service.

Merci également aux personnes qui ont contribué à faire évoluer mes réflexions sur les diverses problématiques du stage : Etienne Leblois, chercheur au Cemagref, pour ses conseils sur l'analyse hydrologique des modèles numériques de terrain, et pour m'avoir présenté son logiciel HydroDEM, à Alain Chandesris, chercheur de l'unité Biologie des écosystèmes aquatiques au Cemagref, avec qui j'ai pu discuter de l'évaluation de la sensibilité à l'érosion des roches, à Didier Richard, chef de l'unité de recherche ETNA du Cemagref de Grenoble, pour les références bibliographiques qu'il m'a fournies sur les glaciers des Alpes, à Brigitte Kaiser, enseignante chercheur à l'Université Paris I, et à Sébastien Monnier, A.T.E.R. au laboratoire de Géographie Physique, Université Paris 12, pour leurs connaissances des formations superficielles et pour m'avoir fait parvenir leurs données. Je remercie aussi Frédéric Gottardi (EDF), pour m'avoir fourni des données climatiques et Alain Poirel (EDF) qui m'a permis d'affiner ma problématique.

Je remercie également mes responsables de master (B. Etlicher, et T. Joliveau), qui ont su guider le choix de mon mémoire de master 1, et de ce stage, ainsi que toute l'équipe pédagogique qui a fortement contribué à l'enrichissement de mes connaissances et de mes compétences en géomatique.

J'adresse un remerciement tout particulier à Frédéric Biesse, mon ami, qui a su m'apporter une aide technique, et ses compétences en programmation, pour automatiser certaines tâches de mon travail et un soutien au quotidien pendant ces six mois.

Je souhaite remercier l'ensemble des stagiaires de l'unité qui ont apporté leurs soutiens moral et technique : Sandie Cadier, Violaine Dugué, Anne-Laure Jeanpierre, Claire Béraud, Charlotte Michel, Olivier Vannier, Damien Lilas, Modou Biteye, Marina Launay, et ceux des autres unités de recherche : Anthony Maire, Marie Lefranck, Elise Bultel, les personnels temporaires : Julien Plasse, Laetitia Lecomte, Antoine Bard, Lucie Liger, Christine Gauroy et Sonja Jankowfsky doctorante, ainsi que leurs conjoints, colocataires et amis.

Enfin, merci à Pierrette, à Adrien, à Sigolène et à mes parents.

RESUME ET NOTICE DU RAPPORT

	Nom	Prénom
Auteur	Bertrand	Mélanie
Titre	Caractérisation du fonctionnement hydro - sédimentaire du bassin versant de l'Arc en Maurienne Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace	
Organisme d'affiliation		Cemagref, Groupement de Lyon
Nom du responsable de stage		Jérôme Le Coz
Nom du co-responsable de stage		Flora Branger
Nombre de pages : 55	Nombre d'annexes : 46	Nombre de références bibliographiques : 32
Mots clés	fonctionnement hydro-sédimentaire, bassin versant, Arc, SIG, analyse spatiale, sensibilité à l'érosion, forçage hydro-climatique, segmentation de l'espace	
Résumé	<p>La caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arc est un enjeu important pour les chercheurs et les acteurs locaux. L'érosion sur ce bassin est la résultante de la sensibilité des versants à l'érosion et des forçages hydro-climatiques. Une analyse spatiale a été réalisée pour déterminer la sensibilité à l'érosion des sous bassins versants. Les données disponibles de topographie, géologie et d'occupation du sol ont été croisées au sein d'un système d'information géographique, au moyen d'une somme pondérée.</p> <p>Le choix de la pondération résulte de nombreux tests, faisant varier la dominance d'un critère par rapport aux autres. La meilleure combinaison, c'est-à-dire pour laquelle le résultat a pu être validé, fait prédominer le critère de géologie, puis d'occupation du sol, et enfin la pente, variables clés expliquant pratiquement à elles seules la sensibilité des versants à l'érosion. Celles-ci ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres, et plusieurs combinaisons peuvent être optimales. Leur pondération ne permet pas de tirer de conclusions sur les processus physiques sous-jacents.</p> <p>Les résultats de l'analyse spatiale ont été comparés avec les densités de drainage en considérant le réseau hydrographique naturel permanent et intermittent, puis avec la localisation des ravines, indicateurs de l'érosion. Enfin, ils ont été superposés avec les travaux effectués par Marnézy (1999) et Latulippe (1995) sur l'érodabilité des sous bassins torrentiels. Globalement, on observe une bonne cohérence. Les différences observées viennent surtout de la prise en compte du forçage hydro-climatique dans ces indicateurs.</p> <p>Les sous bassins versants connectés du point de vue sédimentaire au reste du réseau hydrographique, et où les caractéristiques de sensibilité à l'érosion sont homogènes, ont pu être mis en évidence en combinant les résultats de l'analyse spatiale et les segmentations du bassin versant, sur la base du modèle numérique de terrain. Certaines de ces unités, en raison de la proximité de stations de mesures pourront être utilisées en vue de caler un modèle hydrologique.</p>	
Abstract	<p>The characterization of the hydro-sedimentary processes in the Arc river watershed, Maurienne, is an important issue for researchers and local actors. The erosion of the basin results of sensitivity to erosion and hydro-climatic forcing. A spatial analysis was conducted to determine the sensitivity to erosion of the subcatchments. Available data of topography, geology, and land use were crossed into a geographic information system, using a weighted sum.</p> <p>The choice of weighting coefficients results from numerous tests, varying with dominance of one criterion over the others. The best combination, i.e. for which the result could be validated, is the one in which the dominant criteria are geology, land use, and topography, the key variables explaining most of the sensitivity to erosion. They are not completely independent and many combinations can be optimal. The weighting does not allow to conclude on the underlying physical processes.</p> <p>The results were compared to the drainage densities of the natural river system, then with the location of gullies, erosion indicators. Finally, it was overlaid with the work done by Marnézy (1999) and Latulippe (1995), on torrential catchment areas erodibility. Globally, we observe a good coherence. Observed differences could result from the consideration of hydro-climatic forcing into these indicators.</p> <p>The subcatchments with sedimentary connection to the rest of the river network, and with homogeneous characteristics of sensitivity to erosion have been highlighted, by combining the results of the spatial analysis and the segmentations of the watershed based on the digital elevation model. Some of these units, because of the proximity of measuring stations may be used to calibrate hydrological model.</p>	

TABLE DES MATIERES

Avant propos	<i>i</i>
Résumé et notice du rapport	<i>ii</i>
Table des matières	<i>iii</i>
Introduction	- 1 -
Présentation	- 1 -
1 Contexte du stage	- 1 -
2 Contexte de l'étude	- 1 -
3 Justification du choix de ce stage	- 2 -
4 Problématique	- 2 -
5 Contexte géographique et hydrographique	- 4 -
6 Contexte géologique	- 6 -
7 Contexte climatique	- 6 -
8 Contexte hydro électrique	- 7 -
PHASE 1 : La mise en place d'un SIG	- 8 -
1 Dans quel but ? Quelles sont les tâches effectuées à l'aide du SIG ?	- 8 -
1.1 Une analyse spatiale (voir le détail en phase 2)	- 8 -
1.2 Un découpage en sous bassins contributeurs (voir le détail en phase 3)	- 8 -
2 Quels logiciels seront utilisés, et dans quel but ?	- 8 -
2.1 Un outil SIG puissant et universel	- 8 -
2.2 Des outils spécifiques alliant SIG et hydrologie : découpage des sous bassins versants	- 9 -
3 Quelles sont les données ?	- 10 -
3.1 Inventaire des données, analyse des besoins	- 10 -
3.2 Créer des métadonnées, en respectant les normes ISO	- 11 -
4 Quels sont les utilisateurs ?	- 12 -
5 Création du modèle conceptuel de données	- 12 -
PHASE 2 : Analyse spatiale	- 13 -
1 Bibliographie : les processus hydro sédimentaires et les méthodes existantes pour quantifier l'érosion dans un SIG	- 13 -
1.1 Les processus d'érosion	- 13 -
1.2 Les modèles hydro-sédimentaires couplés aux SIG	- 14 -
1.3 Conclusion	- 16 -
2 Définition de la méthodologie	- 17 -
2.1 Méthodologie développée pour l'étude de la sensibilité à l'érosion du bassin de l'Arc en tenant compte du forçage hydro-climatique	- 17 -
3 Quels sont les critères à prendre en compte ?	- 20 -

3.1	Pour déterminer la sensibilité à l'érosion des sols du bassin versant	- 21 -
3.2	Pour déterminer le forçage hydro-climatique	- 31 -
4	Comparaison de la répartition des classes de sensibilité pour les différents critères	- 35 -
4.1	Sensibilité à l'érosion	- 35 -
4.2	Forçage hydro-climatique	- 36 -
5	Application de la méthodologie	- 36 -
5.1	Test 1 : Dominance du critère topographie	- 36 -
5.2	Test 2 : Dominance du critère géologie	- 36 -
5.3	Test 3 : Dominance du critère occupation du sol	- 37 -
5.4	Test 4 : Dominance du critère géologie puis occupation du sol	- 37 -
6	Résultats	- 37 -
6.1	Quels sont les secteurs sensibles à l'érosion d'après ces tests ?	- 37 -
6.2	Evaluation de la densité de drainage	- 39 -
7	Discussion : Evaluation de la qualité des résultats obtenus	- 40 -
7.1	Vérification de la cohérence du résultat de l'analyse spatiale avec la densité de drainage	- 40 -
7.2	Vérification de la cohérence du résultat de l'analyse spatiale avec la localisation des ravines et rigoles	- 41 -
7.3	Comparaison avec les résultats de Latulippe (1995)	- 43 -
7.4	Comparaison avec les résultats de Marnézy (1999)	- 43 -
7.5	Prise en compte du forçage hydro-climatique	- 44 -
8	Sensibilité à l'érosion pour la segmentation en sous bassins contributeurs	- 45 -
PHASE 3 : Structuration des flux		- 46 -
1	Le découpage en sous bassins contributeurs	- 46 -
1.1	Comparaison de différents logiciels de segmentation en sous bassins	- 46 -
1.2	Découpage en sous bassins directement contributeurs : les sous bassins des affluents directs	- 49 -
1.3	Découpage en sous bassins élémentaires	- 49 -
1.4	Découpage tenant compte des points d'arrêts du flux sédimentaire, et des caractéristiques de sensibilité	- 49 -
2	Evaluation de la qualité des résultats obtenus	- 51 -
Conclusion / perspectives		- 53 -
1	Sélection des sous bassins représentatifs, unités d'étude pour la modélisation hydro-sédimentaire	- 53 -
2	Finalisation et veille technologique	- 53 -
3	Conclusion générale	- 54 -

INTRODUCTION

Le projet conduit pendant ce stage consiste à mettre en place un SIG avec toutes les études préalables que cela implique, ainsi que toute la gestion et la veille venant pérenniser cet outil. Sa création vise à réaliser une analyse spatiale sur le territoire du bassin versant de l'Arc, une rivière de la Maurienne, en Savoie, afin de mettre en évidence les sous bassins les plus sensibles à l'érosion et contribuant significativement aux flux de sédiments sur le bassin versant.

Le stage effectué sur la période du 2 mars au 28 août 2009, au Cemagref, est encadré par Jérôme Le Coz, chercheur au Cemagref, spécialisé en hydraulique et géomorphologie fluviale. Flora Branger, également chercheur au Cemagref, a aussi donné son appui pour les aspects hydrologiques du projet.

Le plan de ce rapport suit les grandes phases de travail. Dans un premier temps seront détaillés les contextes du stage et du projet en lui-même. Les méthodes et les résultats de chaque phase seront ensuite présentés.

PRESENTATION

1 CONTEXTE DU STAGE

Le Cemagref est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) dépendant des ministères de la recherche et de l'agriculture. Les recherches sont orientées vers des problématiques environnementales appliquées, et sont regroupées en 9 axes thématiques.

L'établissement dans lequel le stage est effectué est le groupement de Lyon, un des 9 sites principaux employant environ 100 personnes.

Le département concerné est celui des « Ressources en eau, usages et risques » et plus particulièrement l'unité de recherche Hydrologie – Hydraulique. Cette unité mène des recherches et des activités d'appui technique sur les bassins versants, pour mieux gérer les ressources en eau et les risques liés aux inondations et aux sécheresses. Ces recherches privilégient la connaissance quantitative et qualitative des eaux superficielles à partir de la modélisation couplée des régimes hydrologiques et de l'hydraulique des écoulements en rivières, et d'études expérimentales en laboratoire et in situ¹.

2 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le stage s'inscrit dans le cadre préalable de l'étude hydro-sédimentaire sur le bassin versant de l'Arc, concrétisée par la réponse à l'appel d'offre déposée à l'Agence Nationale de la Recherche, par M. Benoît Camenen, chercheur dans l'équipe Hydrologie – Hydraulique, responsable du groupe thématique " Transports de sédiments et morphologie des rivières ". Ce projet de 36 mois ayant pour titre « Risques d'inondation et d'érosion associés aux effets des sédiments fins et de la végétation sur la morphologie d'une rivière alpine », n'a pas été retenu, mais le cœur du projet sera resoumis sous une autre forme. L'objectif global de ce projet est d'améliorer les connaissances actuelles, et de fournir de nouveaux outils de gestion des risques basés sur l'analyse intégrée du système de rivières Arc-Isère. Le projet se concentre particulièrement sur les effets prépondérants de la charge de sédiments fins, les débris organiques grossiers et les dynamiques de la végétation sur les morphodynamiques des rivières alpines, sur les interactions avec les usages sociaux et économiques, et sur les mesures de gestion des risques (SediRisk, 2009).

¹ <http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-hhly>

Dans un cadre plus global, cette étude porte sur le site – atelier Arc – Isère de la ZABR², auquel de nombreux chercheurs et groupements scientifiques de recherche s'intéressent. Un sujet de thèse portant sur les aspects sédimentaires et hydrauliques de ce site est aussi prévu dans les années à venir.

En effet, la rivière Arc, affluent majeur de l'Isère, transporte une grande quantité de sédiments fins en suspension (Marnézy, 1999), fournie par l'ensemble du bassin versant. Pour quantifier la proportion de sédiments fins charriés par l'Arc vers l'Isère, une modélisation hydrologique sera appliquée suite à l'étude préalable réalisée pendant le stage. Cette modélisation, pour être appliquée sur l'ensemble du site, devra s'appuyer sur des données terrains, et la connaissance des secteurs contributeurs en sédiments, pour le calage de certains paramètres. Le secteur d'étude choisi pour ce calage devra être représentatif de l'ensemble du bassin versant de l'Arc (presque 2000 km²).

Pour ces raisons, les tâches réalisées pendant le stage viennent en préparation des travaux de modélisation. La détermination des secteurs fournissant le plus de matières en suspension, c'est-à-dire, les sous bassins très sensibles à l'érosion dont le flux solide contribue directement à la rivière Arc, et la segmentation en différents sous bassins représentant le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de l'Arc sont les deux principaux objectifs de ce stage pour préparer au mieux les travaux de modélisation. Les échelles spatiales (sous bassin versant de petite taille), et temporelles (données pluviométriques au pas de temps journalier) qui seront vraisemblablement adoptées pour la modélisation hydro – sédimentaire sont prises en compte dans les travaux préliminaires réalisés ici.

3 JUSTIFICATION DU CHOIX DE CE STAGE

Les thèmes de ce stage sont en premier lieu les phénomènes hydrologiques se produisant dans un bassin versant, et d'autre part, les manifestations de l'érosion des sols dans ce contexte. Le stage visera donc à coupler la discipline de l'hydrologie avec la géomatique par la mise en place d'un système d'information géographique appliqué à la modélisation hydrologique, prenant en compte les matières en suspension (MES) pour l'étude des processus hydro-sédimentaires (érosion, transport, sédimentation, reprise).

D'autre part, ce qui fait l'originalité de l'étude menée pendant le stage est le contexte géomorphologique et climatique du secteur étudié. En effet, l'étude devra prendre en compte le fort relief ainsi que la présence de nombreux glaciers et d'un couvert neigeux important. Ces manifestations climatiques sont responsables de phénomènes d'érosion hydrique spécifiques à ce contexte, d'une part à cause de l'abrasion qu'elles provoquent sur les versants, et d'autre part, en raison de la fonte massive au printemps.

Les disciplines rencontrées lors de ce stage seront donc multiples, et permettront de renforcer des connaissances déjà développées au cours d'une licence de Géosciences, comme l'hydrologie, la sédimentologie et d'un master2 SIG, telles que la gestion de bases de données, la programmation informatique et la réflexion sur des problématiques spatialisées.

4 PROBLEMATIQUE

Compte tenu des objectifs fixés au début de ce stage par l'encadrant principal Jérôme Le Coz, et des observations faites par Flora Branger et Benoît Camenen chercheurs de l'unité Hydrologie Hydraulique, ainsi que Alain Poirel (EDF) au cours du premier mois de stage, une problématique générale a pu être formulée.

Comment segmenter le bassin versant de l'Arc en Maurienne, pour représenter son fonctionnement hydro-sédimentaire, à partir d'une analyse spatiale des données disponibles ?

De cette problématique découle un grand nombre de questions, et d'objectifs qui ont clairement été mis en évidence et peuvent être regroupés en quatre parties (voir pages suivantes).

² Zone Atelier Bassin du Rhône

PHASE 1 : La mise en place d'un SIG

Dans quel but ? Quelles sont les tâches effectuées à l'aide du SIG ?

Une analyse spatiale (voir le détail en phase 2)

Un découpage en sous bassins contributeurs (voir le détail en phase 3)

Quels logiciels seront utilisés, et dans quel but ? Comment sont ils choisis ?

Un outil SIG puissant et universel

Des outils spécifiques alliant SIG et hydrologie : découpage des sous bassins versants contributeurs

Quelles sont les données à disposition, celles qui seraient nécessaires ?

Inventaire des données, analyse des besoins

Créer des métadonnées, en respectant les normes ISO

Quels sont les utilisateurs ? Quel niveau de compréhension des SIG ont-ils ?

Création du modèle conceptuel de données

PHASE 2 : Analyse spatiale

Bibliographie : les processus hydro sédimentaires et les méthodes existantes pour quantifier l'érosion dans un SIG

Les processus d'érosion

Les modèles hydro-sédimentaires couplés aux SIG

Définition de la méthodologie

Quels sont les critères à prendre en compte dans le contexte de l'étude ?

Pour déterminer la sensibilité à l'érosion des sols du bassin versant

La topographie

La pédologie / géologie

L'occupation du sol et ses changements

La présence des glaciers

Pour déterminer le forçage hydro-climatique

Précipitations

Présence de glaciers et de névés

Comparaison de la répartition des classes de sensibilité pour les différents critères

Sensibilité à l'érosion

Forçage hydro-climatique

Application de la méthodologie

Résultats

Quels sont les secteurs sensibles à l'érosion d'après ces tests ?

Evaluation de la densité de drainage

Discussion : Evaluation de la qualité des résultats obtenus

Vérification de la cohérence du résultat de l'analyse spatiale avec la densité de drainage

Vérification de la cohérence du résultat de l'analyse spatiale avec la localisation des ravines et rigoles

Comparaison avec les résultats de Latulippe (1995)

Comparaison avec les résultats de Marnézy (1999)

Sensibilité à l'érosion pour la segmentation en sous bassins contributeurs

PHASE 3 : Structuration des flux

Le découpage en sous bassins contributeurs

Comparaison de différents logiciels de segmentation en sous bassins

Découpage en sous bassins directement contributeurs : les sous bassins des affluents directs

Découpage en sous bassins élémentaires

Découpage tenant compte des points d'arrêts du flux sédimentaire, et des caractéristiques de sensibilité

Evaluation de la qualité des résultats obtenus

PHASE 4 : Finalisation, veille technologique

Mise à jour de la base de métadonnées : Archivage documenté pour les reprises ultérieures

Les objectifs peuvent être résumés sur le schéma suivant (Figure 1), qui structure les différentes tâches à réaliser. La segmentation du bassin versant, en cohérence avec son fonctionnement hydro-sédimentaire, sera obtenue par le croisement des résultats de l'analyse spatiale de la sensibilité à l'érosion, et du forçage climatique, et ceux résultant de la structuration des flux (segmentation en sous bassins versants cohérente et prenant en compte la connectivité des flux sédimentaires au réseau hydrographique).

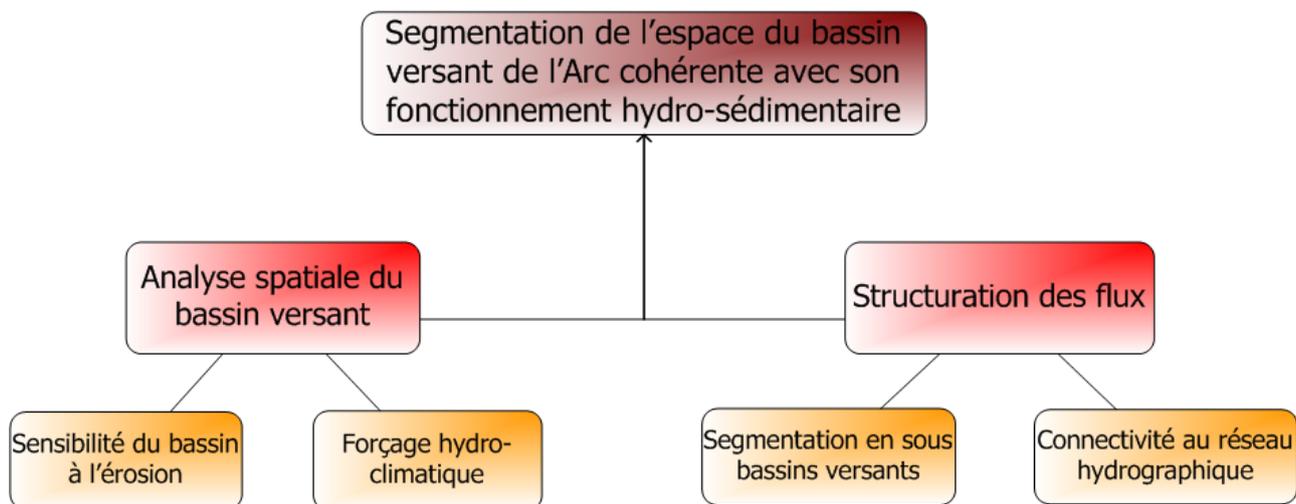


Figure 1 : Organisation de la réponse à la problématique

5 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HYDROGRAPHIQUE

Les citations entre guillemets de cette partie sont toutes issues de la thèse de A. Marnézy (1999), sauf mention contraire.

Le bassin versant de l'Arc, situé en Savoie et d'une superficie de 1957 km² (Jodeau, 2007) est le référentiel (voir l'annexe 1) dans lequel s'inscrit toute la démarche d'analyse spatiale réalisée pendant ce stage. Il s'agit de l'espace géographique sur lequel va transiter la totalité de l'eau précipitée et qui se retrouvera à l'exutoire de la rivière Arc, abstraction faite des aménagements. Le bassin versant sera considéré au sens topographique du terme, dans un premier temps, puis des modifications seront apportées à son emprise en fonction des aménagements tels que les prises d'eau, les dérivations (canaux, aqueducs) et autres réservoirs.

« Des massifs frontaliers à la Combe de Savoie, le bassin versant de l'Arc recouvre une juxtaposition de massifs contrastés dont la diversité est d'abord d'origine morphostructurale. » Les massifs encadrant le bassin sont au nord, le massif de la Vanoise, au sud-est, le piémont italien, au sud, les Hautes-Alpes et à l'ouest, le massif de Belledonne.

L'Arc, une rivière de montagne à caractère torrentiel (Jodeau, 2007), n'est pas à considérer comme une entité indépendante de son environnement, mais appartient véritablement à un réseau hydrographique plus important, qui prend sa source à l'amont « du Glacier des Sources de l'Arc, sous la crête frontière » et se poursuit « jusqu'à la confluence avec l'Isère ». « Le sillon de l'Arc dessine d'Est en Ouest, sur 120 km de longueur, un ample demi-cercle à convexité tournée vers le Sud » qui traverse toute la vallée de la Maurienne (Jodeau, 2007). « Les dénivellations entre le talweg et les lignes de crête sont toujours très fortes, proches ou supérieures à 2000m. Cette coupure franche et profonde entre les hauts massifs encadrants s'impose comme l'axe unificateur d'un ensemble topographique morcelé ». « Les affluents dessinent un réseau secondaire de disposition longitudinale, calqué sur les zones structurales, dégagant nettement les alignements méridiens des reliefs. Ils ont exploité les bandes de roches tendres (marnes, schistes, gypses), les lignes de contact entre zones (par exemple le Glandon ou le Bugeon entre socle cristallin et couverture sédimentaire) ou les inflexions tectoniques (cas de la Valloirette encaissée dans le flanc occidental d'un synclinal) ». Pour la localisation des cours d'eau du bassin, se référer à l'annexe 1bis.

Le flux de sédiments est constitué de fines et d'éléments plus grossiers, et est estimé à environ 1.5×10^6 t/an pour les sédiments fins et 4×10^5 t/an pour les sédiments grossiers (Jodeau, 2007). « Le transport par charriage est plus important à la fonte des neiges (mai-juin-juillet), les éléments les plus gros étant mobilisés uniquement pendant les crues. Une des spécificités de l'Arc est son très fort transport de sédiments fins notamment à la fonte des neiges » (Jodeau, 2007).

Des caractéristiques topographiques typiques des Alpes

« Les fortes altitudes, l'ampleur des dénivellations liée à l'encaissement des cours d'eau, les pentes soutenues et le compartimentage topographique apparaissent comme les traits majeurs du relief ». « La vallée peut être découpée en trois secteurs morphologiquement différents [...] : une partie supérieure (amont de Saint-Michel-de-Maurienne) composée d'une vallée encaissée étroite avec quelques zones d'élargissement ; une partie intermédiaire (de Saint-Michel-de-Maurienne à La Chambre) constituée d'une série de plaines alluviales séparées par des zones plus étroites avec de nombreux affluents torrentiels [...] ; une partie aval formée de grandes plaines séparées par quelques resserrements » (Jodeau, 2007). La structure de la chaîne alpine s'organise en bandes longitudinales (Marnézy, 1999).

L'étude de la topographie a permis la « [mise] en évidence [de] l'altitude moyenne élevée (une médiane de 2020 m [...]), la forte proportion des hautes surfaces (28,4% > 2500 m, dont 8,1% > 3000 m), ou encore la prépondérance écrasante (les 2/3) de la tranche 1500-3000 m. D'amont en aval, [...] la part des hauts reliefs tend à se rétrécir ».

Les pentes les plus fortes se retrouvent aux altitudes élevées (zones des cirques et des parois sommitales), et sur les flancs de la vallée principale, « tandis que les pentes plus modérées (10% à 30%) correspondent aux épaulements, aux replats intermédiaires ou aux plateaux suspendus à des altitudes moyennes ». [...] « [L]es pentes sont globalement plus raides en rive droite qu'en rive gauche. En réalité, le système des pentes crée un cloisonnement du relief en cellules élémentaires juxtaposées correspondant à autant de sous-bassins affluents ».

« Conséquence de cette géométrie, l'orientation des versants est très diverse : le versant rive droite de l'Arc est un endroit pour l'essentiel ; le franc adret va des sources de l'Arc jusque vers St-Jean. Au-delà, l'orientation de la vallée en direction du Nord donne à la rive droite une exposition Ouest. L'envers de la rive gauche n'est vraiment caractéristique qu'en amont de St-Jean-de-Maurienne. Dans le détail, la juxtaposition des bassins affluents modifie amplement ces règles. L'importance des hautes surfaces des massifs frontaliers et de la Vanoise a permis le maintien d'une glaciation encore imposante » qui se traduit par une concentration des glaciers actuels sur les deux ensembles hauts maurienais. « Le versant envers de la crête frontière entre les sources de l'Arc et le Mont-Cenis conserve les glaciers les plus développés dont plusieurs dépassent les 300 ha : les Sources de l'Arc, les Evettes, le Mulinet, le Baounet, le glacier de Rochemelon. Ils forment une nappe glaciaire presque continue entre les Levanna et l'Albaron. Le second ensemble correspond à la retombée méridionale de la Vanoise, avec ses trois langues glaciaires imposantes (la Mahure, l'Arpont, le Pelve), exutoires de la calotte des Dômes ».

Hormis cet englacement actuel important, le bassin de l'Arc concentre sur sa partie orientale de nombreux glaciers rocheux (Monnier, 2006).

6 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les différentes lithologies rencontrées dans le bassin de l'Arc peuvent être regroupées au sein d'unités qui présentent les mêmes caractéristiques pétrographiques et structurales. La représentation de la géologie structurale (Voir annexe 2) est tirée de la carte géologique de la France à 1/250000 – Annecy – réalisée par le bureau de recherches géologiques et minières. Les zones structurales rencontrées sont d'ouest en est (Notice de la carte géologique de la France à 1/250000– Annecy – BRGM) :

- La couverture de la zone externe alpine
- Les massifs cristallins externes
- La zone Valaisane (ou zone des brèches de Tarentaise)
- Les gypses de base des schistes lustrés piémontais
- Les schistes lustrés piémontais
- La zone subbriançonnaise
- La zone briançonnaise externe
- La zone briançonnaise interne ou zone Vanoise Ambin
- Les massifs cristallins internes

« [L]e recouplement des unités géologiques par le drain principal entraîne des variations rapides du contexte structural, sur de courts tronçons : contrastes de résistance des matériaux, diversité dans la disposition des masses rocheuses, multiplication et variété des accidents tectoniques. Ces conditions ont fortement pesé sur l'élaboration des profils de la vallée» (Marnézy, 1999).

Ces différentes unités ne présentent donc pas toutes les mêmes séries, et n'ont pas subi les contraintes tectoniques de la même manière. Ainsi le métamorphisme n'est pas uniforme sur l'ensemble du bassin versant. Les unités les plus internes ont subi un métamorphisme plus important en pression et en température que les unités de la bordure ouest. Les différents degrés de métamorphisme des roches du bassin sont présentés sur la cartographie en annexe 3, issue de la notice de la carte géologique de la France à 1/250000– Annecy – BRGM.

Plusieurs niveaux d'importance du métamorphisme peuvent être dégagés :

- Un premier niveau où le métamorphisme est absent à faible
- Un second niveau où le métamorphisme est relativement faible, et où le faciès des roches passe aux schistes verts
- Un troisième niveau où le faciès passe aux schistes verts reprenant un faciès de haute pression.
- Un métamorphisme ante alpin indifférencié affecte l'ensemble des unités.

Les lithologies rencontrées sur le bassin versant ont subi différentes transformations, de plus en plus intenses avec l'apparition de nouveaux minéraux du métamorphisme sur la bordure est.

Les hautes pressions et températures, combinées avec des contraintes tectoniques ont pu fragiliser certaines des lithologies. Nous verrons par la suite que ces conditions permettent différents degrés d'érosion des sols.

7 CONTEXTE CLIMATIQUE

Toutes les citations entre guillemets de cette partie sont là encore issues de la thèse de A. Marnézy (1999), sauf mention contraire.

« Le climat est l'une des variables clefs de l'hydrosystème : il conditionne directement les apports liquides, les régimes hydrologiques ou la charge sédimentaire ».

« Par sa situation, sa disposition transversale dans la chaîne alpine, sa longueur et le développement de ses versants, la vallée de la Maurienne propose une variété de caractères thermiques et pluviométriques qui se traduit directement dans les rythmes de la rétention et de la fusion nivale ». La Maurienne bénéficie d'un « climat d'abri d'un secteur protégé des flux océaniques par les chaînons occidentaux ». Les températures augmentent d'est en ouest et sont accompagnées d'une diminution de l'amplitude thermique. Les hivers y sont longs, et la saison chaude d'une durée variable, en lien avec l'altitude. « En même temps que les hauteurs de chutes cumulées mensuelles, la durée de la période neigeuse augmente rapidement avec l'altitude. »

Au regard des précipitations, les totaux annuels sont modérés et contrastés, et permettent un découpage du bassin versant en trois secteurs :

- « la basse Maurienne, [...] est la zone la plus arrosée, avec des valeurs comparables à celles des Préalpes [...]
- Les quantités diminuent ensuite fortement en moyenne Maurienne [...]; le déficit pluviométrique s'accompagne d'une diminution du nombre de jours de précipitations [...]
- Dans la partie amont de la vallée, les totaux se redressent [...] ».

« La chaîne des massifs cristallins (Belledonne, Grand Arc-Lauzière), élevée et de direction méridienne, bien exposée au flux d'Ouest, est directement soumise aux perturbations d'origine océanique ; tandis que l'effet d'abri se fait fortement sentir en moyenne et haute Maurienne ». « A l'Est des massifs cristallins externes, la partie du bassin versant située en rive droite semble globalement plus arrosée par unité de surface que la rive gauche ».

« Les moyennes mensuelles montrent une relative régularité des précipitations au long des mois. Les contrastes ne sont guère marqués, les régimes sont modérés : le rapport entre les mois extrêmes reste inférieur à 2. La répartition est plus régulière encore dans la moyenne et haute vallée [...]. [Elles se distinguent] par un hiver plus humide, qui traduit un « régime de marge océanique » ». Marnézy parle donc « d'un régime particulier, « alpin », aux saisons peu différenciées » (1999).

« Dans presque toute la vallée, la variabilité de la saison froide (Septembre à Mars) est plus marquée que celle des mois d'été. Ce qui signifie en particulier que l'importance des précipitations neigeuses est très variable d'une année à l'autre ».

8 CONTEXTE HYDRO ELECTRIQUE

Depuis le début du vingtième siècle, de nombreux aménagements ont vu le jour le long de l'Arc. Celui-ci offre des caractéristiques particulièrement adaptées pour la mise en place d'ouvrages hydro-électriques, telles que la morphologie de son lit, son régime régulier au cours de l'année, et une bonne accessibilité (Marnézy, 1999).

Le développement d'aménagements pour domestiquer le cours de l'Arc et capter les torrents a été de plus en plus important après la seconde guerre mondiale.

« Depuis les premiers endiguements mis en place au XIXe siècle (Marnézy, 1999), le lit de la rivière a été souvent recalibré et endigué pour protéger à la fois les voies de communication vers l'Italie mais aussi les zones habitées. [...] En particulier, la construction de l'autoroute A43 a nécessité des aménagements sur les torrents (cônes de déjection), mais aussi la mise en place de nombreux endiguements calibrés en principe pour le passage de la crue centennale » (Jodeau, 2007).

La Maurienne est une vallée à très fort aménagement hydroélectrique (7 barrages, 3 liaisons avec les bassins versants voisins, 7 prises d'eau, 4 grands barrages d'altitude...). Du fait des prises d'eau et restitutions, les débits sont segmentés avec une alternance de longs tronçons en débit réservé (80% du cours de l'Arc) et de courtes sections à fort écoulement turbiné. (Jodeau, 2007)

PHASE 1 : LA MISE EN PLACE D'UN SIG

La mise en place du SIG est un fil conducteur tout au long de ce stage. L'intérêt de déployer un tel dispositif, et le cahier des charges seront développés dans cette partie.

1 DANS QUEL BUT ? QUELLES SONT LES TACHES EFFECTUEES A L'AIDE DU SIG ?

La mise en place de ce SIG est l'objectif premier de ce stage, et vise en plus des fonctionnalités principales qu'apporte ce dispositif, des analyses spatiales sur le territoire du bassin versant de l'Arc.

Le SIG permet un regroupement et une structuration des données. Au delà des objectifs qui seront atteints à la fin de ce stage, ce SIG pourra devenir un support de travail collaboratif et une plate-forme d'échange entre les différents acteurs et chercheurs travaillant sur ce site atelier. Ainsi la base de métadonnées créé et régulièrement enrichie au cours du stage viendra faciliter ces échanges.

1.1 UNE ANALYSE SPATIALE (VOIR LE DETAIL EN PHASE 2)

Une fois que les données seront récupérées et structurées à l'aide du dispositif, la première des tâches à réaliser est l'analyse de la sensibilité du bassin à l'érosion. Grâce au format matriciel des données, il sera possible d'effectuer tout type de croisement.

Les critères pris en compte seront sélectionnés à partir d'une synthèse bibliographique. Les méthodes pour obtenir les données correspondant à chaque critère à partir des données brutes seront détaillées dans la Phase 2, ainsi que la méthodologie d'analyse spatiale employée.

1.2 UN DECOUPAGE EN SOUS BASSINS CONTRIBUTEURS (VOIR LE DETAIL EN PHASE 3)

En fonction des objectifs et de l'échelle de travail, différents découpages seront réalisés à l'aide d'outils complémentaires aux logiciels SIG, et en utilisant les résultats des analyses spatiales effectuées et certaines données.

2 QUELS LOGICIELS SERONT UTILISES, ET DANS QUEL BUT ?

Les différents objectifs de ce stage requièrent des logiciels différents, mais une seule base de données. Un logiciel SIG sera nécessaire pour la création de cette base de données (le formatage des fichiers souhaité, et leur organisation, plus qu'une vraie base), ainsi que pour l'analyse spatiale ; un outil spécifique au domaine de l'hydrologie sera nécessaire pour générer les différents découpages en sous bassins contributeurs.

2.1 UN OUTIL SIG PUISSANT ET UNIVERSEL

Le bassin versant de l'Arc ayant déjà fait l'objet d'une thèse, des données sur ce territoire avaient déjà été récoltées et regroupées au sein du logiciel ArcView (logiciel le plus basique de la gamme ArcGIS actuelle). Cependant, ces données n'étaient pas stockées et structurées dans une base, mais étaient présentes sous forme de fichiers au format propriétaire d'ArcGIS.

Pour de nombreuses raisons qui vont être évoquées par la suite, le choix le plus judicieux pour la création de la base de données et les analyses spatiales est de reprendre la suite logicielle ArcGIS et ces formats de fichiers :

- La société ESRI productrice de ce logiciel est présente sur le marché depuis une vingtaine d'années. Ceci assure de la pérennité de ses solutions.
- Ses nombreux produits sont présents dans la majorité des structures de recherche mais aussi chez de nombreux acteurs du territoire.
- Les formats propriétaires issus de ce logiciel sont les plus répandus et sont lisibles par une très grande majorité d'autres logiciels SIG.

- ArcView (le logiciel SIG bureautique de la gamme ArcGIS) est aussi un des logiciels les plus puissants du marché, permettant de très nombreux géotraitements, par le biais de boîtes à outils et de scripts développés par une communauté d'utilisateurs très importante et internationale, et la gestion de gros volumes de données (en particulier pour les versions de la gamme advanced d'ArcGIS).
- Le Cemagref dispose d'une dizaine de licences réseau de la suite ArcGIS, avec des extensions indispensables pour les géotraitements effectués dans la phase d'analyse spatiale.

L'objectif ici n'est pas de faire l'apologie de cette solution, mais de démontrer par toutes les réflexions faites précédemment que cette solution semble la plus adaptée à la situation.

Les données récoltées et produites pendant le stage ne seront pas regroupées dans une base de données, à la demande de mes responsables, ceci afin de ne pas être dépendant d'un logiciel, mais aussi car la structuration des données qu'ils souhaitent n'a pas encore été fixée. Ces données seront utilisées par la suite pour une modélisation hydrologique, et doivent nécessairement être interopérables avec le plus grand nombre de logiciels. Elles seront donc stockées au format GRID (format propriétaire ArcGIS) ou ASCII pour les rasters et Shapefile pour les vecteurs, au sein de dossiers.

Le choix de ce logiciel complet n'a cependant pas dispensé du recours ponctuel à d'autres logiciels pour des tâches d'analyses spécifiques, telle que l'analyse hydrologique. Les logiciels utilisés dans ce cas sont détaillés dans la partie 1.1 de la phase 3.

Le modèle conceptuel de données créé sera détaillé par la suite. Le catalogue de données sera enrichi progressivement avec les résultats des analyses spatiales.

Pour la gestion des métadonnées, le logiciel Excel a été choisi avant le début du stage, reprenant les spécifications de la norme NF EN ISO 19115 (AFNOR, 2005). Le format de ces métadonnées peut être lu non seulement par le logiciel propriétaire de Microsoft mais également par des logiciels libres, ce qui ne rend pas l'utilisateur dépendant d'une solution logicielle en particulier.

Une autre solution aurait été d'exploiter la fonctionnalité de stockage des métadonnées du logiciel ArcCatalog, qui permet la gestion (création, mise à jour, visualisation, recherche) de chaque source de données (pour tous les formats vectoriels et rasters). Ces métadonnées peuvent être gérées selon deux normes : FGDC (Norme nationale américaine de métadonnées) ou ISO 19115³ et sont associées aux données, et stockées au format type XML (eXtensible Markup Language). Ce format universel est lisible directement par un navigateur, mais également par un grand nombre de solutions de gestion de métadonnées. Le formatage du document XML peut varier d'une solution de gestion de métadonnées à une autre, la modification de l'entête de ce document serait alors nécessaire. Pour des raisons d'accessibilité aux utilisateurs futurs, ce n'est pas cette solution qui a été choisie.

2.2 DES OUTILS SPECIFIQUES ALLIANT SIG ET HYDROLOGIE : DECOUPAGE DES SOUS BASSINS VERSANTS

Malgré tous les avantages que présente le logiciel ArcView, les outils internes permettant l'analyse d'un MNT⁴ pour l'hydrologie ne sont pas beaucoup développés, mais surtout il n'est pas possible de connaître leurs algorithmes de façon absolue. Ainsi, plusieurs logiciels permettant le découpage en sous bassins ont été comparés afin de déterminer quel est le plus précis et performant. Ont donc été testées les fonctionnalités des logiciels ArcView⁵, SAGA⁶, Hydrodem⁷

3 Réponse donnée par G. Lavenu dans un forum dédié à ArcGIS, sur le site Georezo <http://georezo.net/forum/>

4 Modèle Numérique de Terrain

5 Pour la documentation et l'acquisition : <http://www.esrifrance.fr/ArcView.asp>

6 Site officiel et téléchargement : <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>

7 Documentation et acquisition : contacter E.Leblois, Chercheur unité Hydrologie / Hydraulique

et Taudem⁸ (standalone et plug-in ArcView). L'étude comparative des résultats obtenus avec tous ces logiciels sera présentée dans la phase 3.

3 QUELLES SONT LES DONNEES ?

3.1 INVENTAIRE DES DONNEES, ANALYSE DES BESOINS

Les formats des données et leurs sources sont très nombreux et sont regroupés dans le tableau en Annexe 4.

Les données brutes disponibles au début du stage sont :

- Villes principales, M. Jodeau
- Les orthophotographies, BD Ortho, IGN, 0.5m
- Le SCAN 25 de l'IGN, 2.5 m
- BD Carthage, IGN, construite au 1/50000
- La base de données SAFRAN, météo France, 8km
- Géologie vecteur, modifiée par A. Chandesris⁹, BRGM, 1/1 000 000
- La cartographie Corine Land Cover, au 1/100 000, vecteur, Agence Européenne pour l'Environnement
- MNT 50m France raster ASCII, BD Alti

Les données créées ou acquises pour les besoins du stage sont :

- Départements, Régions, GEOFLA¹⁰ (issu de BD Topo, IGN), précision décamétrique de la donnée originale, avec des décalages pouvant atteindre 500 mètres.
- Les stations de mesure de turbidité et de débit, Cemagref, DIREN, EDF (localisation seulement)
- Réseau hydrographique corrigé
- Base de données de F. Gottardi, réestimation des données de la base de données SAFRAN, au km²
- Géologie 1/250000, vecteur, géologie structurale et métamorphisme
- La sensibilité du bassin à l'érosion liée au facteur géologie
- Les formations susceptibles de témoigner de la présence d'un pergélisol (S. Monnier)
- Cartographie des glaciers du bassin
- Cartographie Corine Land Cover, enrichie de la cartographie précise des glaciers.
- Sensibilité à l'érosion liée à la couverture du sol et ses changements
- Les pentes
- Sensibilité à l'érosion liée au degré de pente
- Les orientations des versants
- Concavités et convexités dans les plans verticaux et horizontaux
- Sensibilité à l'érosion liée aux concavités et convexités des versants
- Différentes segmentations en sous bassins
- Les points d'arrêts du flux sédimentaire, connexion des sous bassins
- La densité de drainage

⁸ Site officiel : <http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/>

⁹ Chercheur au Cemagref de Lyon, dans l'unité « Biologie des écosystèmes aquatiques »

¹⁰ Description de l'ensemble des unités administratives de France métropolitaine et DOM et Mayotte : communes, cantons, arrondissements, départements, régions : <http://professionnels.ign.fr/ficheProduitCMS.do?idDoc=5323861>

- Les cartographies d'érodabilité des sous bassins du bassin versant de l'Arc, établies par Marnézy (1999) et Latulippe (1995)

L'ensemble de ces données n'est pas utile pour chaque phase de travail. Pour la phase d'analyse spatiale, ce sont tout d'abord les données nécessaires à la détermination de la sensibilité du bassin à l'érosion :

- Les données relatives aux facteurs géologie, présence de glacier, pente, occupation du sol
- La densité de drainage
- Les données permettant une évaluation de la qualité des résultats : les orthophotographies, les pentes à partir desquelles sont repérées les griffes d'érosion, et les cartographies de Marnézy (1999) et Latulippe (1995). Des retours d'expérience du RTM11 auraient eux aussi permis de valider les résultats. Cependant, ces données n'ont pas pu être récupérées

Pour prendre en compte le forçage climatique :

- La base SAFRAN,
- La réanalyse de la base SAFRAN par Frédéric Gottardi (2009) au 1 km
- La présence de glaciers et névés (sous bassins secteurs de fonte)

Pour la phase de segmentation en sous bassins contributeurs :

- Le MNT, BD Alti
- Le réseau hydrographique corrigé
- La connectivité des sous bassins (vis-à-vis des aménagements hydro-électriques)
- La densité de drainage

Pour la segmentation du bassin pour la représentation de son fonctionnement hydro-sédimentaire :

- Le découpage en sous bassins contributeurs en sédiments à l'Arc, en tenant compte de la connectivité au réseau hydrographique
- La carte de sensibilité à l'érosion tenant compte du forçage climatique

3.2 CREER DES METADONNEES, EN RESPECTANT LES NORMES ISO

Dans le contexte actuel, la création des métadonnées est de plus en plus réglementée. Bien souvent, les métadonnées sont oubliées ; travail de création et de gestion (mise à jour) trop fastidieux, logiciels pour la saisie trop complexes, ou encore de trop nombreux champs dont on ne saisit pas au premier abord la subtilité. Elles sont pourtant indispensables quelles que soient la structure et l'ampleur du SIG que l'on met en place.

La norme EN NF ISO 19115 (AFNOR, 2005) est une référence pour les métadonnées d'informations géographiques, et a été régulièrement enrichie depuis sa création en 2003.

Lors d'un stage précédent, une étudiante du Master professionnel SIG et Gestion de l'Espace de l'Université de Saint Etienne (Spatola, 2005) avait déjà constitué une base de métadonnées dans le logiciel Excel, reprenant quelques thèmes définis par la norme ISO 19115 de 2005.

Voici d'après cette norme la liste des thèmes devant être obligatoirement présents dans les métadonnées :

- Informations générales sur la métadonnée
- Identification du jeu de données
- Références spatiales
- Représentation spatiale du jeu de données

¹¹ Restauration des Terrains en Montagne

- Distribution de la donnée
- Information Qualité
- Contraintes
- Traitements opérés sur les données

L'ensemble des champs de cette base de métadonnées est présenté en annexe 5.

Choix du système de gestion de base de métadonnées :

Pour plusieurs raisons, le travail de création de métadonnées s'appuie sur le document Excel existant :

- La mise en place du SIG a pour objectif le traitement des données dans un but d'analyse des caractéristiques hydro sédimentaires du bassin versant. Le partage des données entre les différents chercheurs n'est pas encore envisagé. Ainsi les métadonnées ne seront utiles à court terme que pour faire un inventaire de l'ensemble des données, et à plus long terme, elles serviront à faciliter la recherche et l'échange entre les différents chercheurs. Ainsi l'utilisation d'un logiciel spécifique permettant l'échange de bases de métadonnées n'est pas nécessaire.
- Les logiciels de gestion de bases de métadonnées sont très souvent trop complexes : le nombre de champs que l'on souhaite voir apparaître dans la base pour chaque donnée est trop important, on ne sait pas forcément à quoi correspond chacun des champs. Pour un simple inventaire descriptif des données, un système comme ceux-là n'est pas requis.

A plus long terme, l'utilisation de ce type de logiciel pourrait s'avérer bénéfique. Dans les projets interdisciplinaires la quantité de données à référencer est beaucoup plus importante et celles-ci sont partagées entre les différents acteurs et les chercheurs. Une base de métadonnées serait mieux gérée par ce type de logiciel dans ce cas. D'autre part, le versionnement des données de la base serait possible, autorisant la récupération de l'historique des modifications de chacune. Enfin ces logiciels sont constitués sur la base des normes existantes en termes de gestion des métadonnées, et permettent une meilleure interopérabilité des données, au niveau européen.

Dans le cadre de cette étude, la structure de cette base existante a été reprise et enrichie à l'aide du texte de la norme ISO 19115, en particulier en ce qui concerne les références spatiales. Ce texte a aussi été très utile afin de comprendre les subtilités des informations demandées.

Chaque champ des différents thèmes des métadonnées a été complété (voir l'annexe 5).

4 QUELS SONT LES UTILISATEURS ?

A ce stade du projet, le SIG n'a pas vocation à être un outil partagé parmi divers acteurs. Je serai l'unique utilisatrice. A l'avenir, le SIG et les données issues des analyses spatiales pourront être partagés avec différents partenaires (parfois sous réserve pour certaines données, voir l'annexe 5, thème Contraintes). Les métadonnées correctement complétées permettront justement aux partenaires de mieux repérer et récupérer les données qui auront été produites pendant le stage.

5 CREATION DU MODELE CONCEPTUEL DE DONNEES

Le SIG étant initialement créé pour les besoins de l'analyse spatiale effectuée pendant ce stage, la structuration des données dans la base sera simple. Celles-ci seront uniquement groupées par thème, et aucune modélisation complexe UML ou Merise ne sera réalisée. Un schéma clair de la structuration choisie permettra cependant de pouvoir les hiérarchiser dans différents thèmes. Cette structuration pourra éventuellement être reprise par la suite, notamment pour des travaux de thèse.

L'inventaire des données aura donc permis de les grouper dans un dossier pour chaque thème, associé à un dictionnaire de fichier permettant la correspondance entre le nom du fichier et son contenu. La structuration est présentée sous forme d'un schéma en annexe 6.

PHASE 2 : ANALYSE SPATIALE

A partir de la base de données créée et des outils SIG choisis, l'objectif principal est de répondre à la problématique posée. Plusieurs possibilités sont envisageables. Pour structurer le travail et comprendre les phénomènes en jeux, un retour sur l'existant est nécessaire. Une synthèse des processus hydro-sédimentaires ayant lieu sur le bassin versant et des méthodes déjà utilisées couplant modélisation hydrologique et SIG est donc indispensable. La méthodologie finalement utilisée pour déterminer la sensibilité des versants à l'érosion en tenant compte du forçage climatique est ensuite détaillée.

1 BIBLIOGRAPHIE : LES PROCESSUS HYDRO SEDIMENTAIRES ET LES METHODES EXISTANTES POUR QUANTIFIER L'EROSION DANS UN SIG

1.1 LES PROCESSUS D'EROSION

L'érosion est « l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient ainsi le relief. On distingue deux grands types de phénomènes dont, le plus souvent, les effets s'additionnent : - 1. les processus chimiques avec altération et dissolution par les eaux plus ou moins chargées de gaz carbonique. - 2. les processus physiques ou mécaniques avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide, d'où les distinctions entre les érosions éolienne, fluviale, glaciaire, marine. » (Foucault, A. and Raoult, J.-F., 2005)

Le processus d'érosion s'effectue en trois temps (Soutter, *et al.*, 2007) :

- Détachement des particules par météorisation des roches
- Transport
- Dépôt

Les particules peuvent être déposées puis reprises dans le flux solide.

Détachement des particules par météorisation des roches

L'érosion par l'eau est chimique et mécanique et peut se faire sous différentes formes :

- « Détachement et transport par impact des gouttes de pluie
- Détachement par les gouttes de pluie et transport par l'écoulement induit par les gouttes
- Détachement par l'impact des gouttes de pluie et transport par l'écoulement
- Arrachement par l'écoulement et transport par l'écoulement » (Mano, 2008)
- L'abrasion par la présence de glaciers et l'écoulement lié à la fonte, et transport par l'écoulement lié à la fonte

Transport

Deux grands types de transport solide co-existent : le transport des matières fines en suspension et le charriage. D'après Marnézy (1999), pour l'Arc, c'est le transport en suspension qui prédomine à près de 79%. Il est nécessaire, dans le cadre de ce projet de connaître l'origine de cette quantité considérable de fines.

Différents critères viennent influencer sur la quantité de sédiment pouvant être arrachée :

- L'intensité et la durée des précipitations / le climat
- La topographie / pente
- L'usage/ occupation du sol et ses changements (densité de la couverture végétale, anthropisation)
- La pédologie / géologie : la dureté, la cohésion et la fracturation des roches

Un critère spécifique vient se rajouter aux précédents dans le contexte de cette étude : la présence de glaciers influe directement sur la proportion de fines qui se retrouve dans l'Arc à la fonte par l'action des processus d'érosion glaciaire et périglaciaire. Le phénomène de fonte des glaciers et des névés entraîne aussi des quantités considérables de sédiments fins.

Les laves torrentielles

Elles se présentent comme une masse boueuse composée d'une matrice argileuse transportant des blocs de toutes tailles. Eau et sédiments ne sont plus dissociables. Ils constituent un fluide monophasique visqueux pour lequel la granulométrie semble répondre à une répartition particulière (imbrication des éléments). Ce phénomène stochastique très intense et ponctuel, est difficile à appréhender par l'analyse spatiale, et est encore assez mal connu sur le bassin versant de l'Arc. En effet, toutes les laves ne parviennent pas directement dans le lit de l'Arc. Il arrive qu'elles soient bloquées dans leur parcours sur le cône de déjection et qu'elles se déversent latéralement, ou qu'elles s'arrêtent à mi-pente contre un pont ou un obstacle. L'abrasion et le transport sédimentaire dans ce cas ne seront pas étudiés, étant très localisés temporellement et spatialement.

1.2 LES MODELES HYDRO-SEDIMENTAIRES COUPLES AUX SIG

De nombreux modèles ont été développés afin de modéliser les phénomènes d'érosion des sols. Les premiers sont apparus aux Etats Unis au milieu du siècle dernier afin d'évaluer l'impact érosif des différentes pratiques agricoles (Wischmeier et Smith, 1958).

Qu'est ce qu'un modèle d'érosion ?

Un modèle est une abstraction de la réalité qui décrit un processus, et permet de représenter un système complexe. Les facteurs contrôlant ce processus sont dépendants de l'objectif original du modèle.

Pour un modèle d'érosion, le processus concerné est l'érosion hydrique. Les modèles d'érosion furent d'abord empiriques, s'appuyant sur un nombre important d'observations pour l'élaboration d'équations quantifiant la perte en sol. Par la suite, il fut nécessaire de créer et utiliser des modèles à base physique ou basés sur les processus, afin de mieux comprendre les processus d'érosion et de pouvoir les quantifier. Ces modèles sont constitués d'équations basées sur des mesures et observations du terrain, qui décrivent les processus d'érosion. Ils nécessitent un calage à l'aide de données terrain.

Ces différents modèles ont été adaptés depuis ces 20 dernières années pour être appliqués dans des SIG afin de pouvoir spatialiser les phénomènes d'érosion.

Etude bibliographique des modèles d'érosion couplés au SIG

Les différents modèles, pour lesquels une référence bibliographique a été étudiée, sont présentés dans le tableau de l'annexe 7 ont été regroupés en deux classes : les modèles empiriques et les modèles à base physique.

Les modèles empiriques

Ce sont les modèles les plus simples, et ils nécessitent peu de données. La majorité de ces modèles sont calqués sur l'équation universelle de perte de sols (USLE : Universal Soil Loss Equation) définie par Wischmeier et Smith (1958).

Cette équation a été très couramment utilisée pour quantifier l'érosion des sols de parcelles agricoles et a été de très nombreuses fois associée au SIG. C'est une multiplication d'indices associés à divers facteurs :

- L'érosivité des pluies
- La sensibilité du sol à l'érosion
- La pente
- La longueur de la parcelle
- La couverture végétale
- Les aménagements anti érosifs (facteur anthropique)

Ce modèle est très facilement adaptable pour être appliqué dans un logiciel SIG avec lequel il est courant de faire de l'algèbre de cartes. Chaque paramètre correspond à une donnée raster, il suffit ensuite de les multiplier entre eux.

Ce type de modèle utilise des échelles spatiales de l'ordre de la taille d'une parcelle cadastrale, ou d'un petit bassin versant, et donne une estimation annuelle sur la perte en sol. Des modifications et améliorations ont été apportées afin de prédire l'érosion à l'échelle d'un bassin versant, et sur de plus courtes périodes. Ces méthodes ont aussi permis de déterminer le ratio d'érosion de sédiment comme une fonction de la taille du bassin versant.

L'inconvénient de ces modèles est que leurs résultats sont rarement validés par manque de mesures à cette échelle spatiale et temporelle.

Les modèles basés sur les processus, ou modèle à base physique

Ils visent à représenter les principaux mécanismes de contrôle des processus d'érosion par la résolution d'équations. Ces modèles sont la synthèse de chacun des composants qui influent sur le processus d'érosion. Ils sont très puissants pour l'évaluation de la variabilité spatiale et temporelle des processus d'érosion naturelle. Certains de ces modèles ont toujours une base empirique : ce sont les modèles basés sur les processus.

Ces modèles peuvent donner soit une simulation continue de l'érosion, soit l'érosion induite par un événement climatique. Le pas de temps pour une simulation continue peut varier d'une heure à un jour, et le résultat final d'un tel modèle est soit une moyenne annuelle, soit une fréquence de distribution d'événements individuels, soit une série temporelle.

Ces modèles présentent l'inconvénient de nécessiter de nombreux paramètres liés à chaque processus, car ils ont une organisation en différents sous modèles relatifs à l'hydrologie, l'hydraulique, la météorologie et la mécanique des sols.

Les modèles travaillant à partir d'événements requièrent moins de données que les modèles à simulation continue.

Les analyses spatiales

Certains auteurs ont fait le choix de réaliser une analyse spatiale plutôt que d'appliquer des modèles d'érosion. C'est le cas par exemple de C. Latulippe, R. Bou Kheir, ou encore S. Brochot (Latulippe, 1995, Bou Kheir *et al.*, 2008, Brochot, 2000).

L'avantage de cette méthode est qu'il est possible de faire une analyse à toutes les échelles temporelles et spatiales, en fonction des données disponibles. Les fonctionnalités des logiciels SIG ne sont pas spécifiquement conçues pour modéliser les processus d'érosion, mais s'y prêtent très bien, en particulier les outils de superposition, d'extraction, de calculs de paramètres morphométriques ou encore l'algèbre spatiale. D'autre part, le résultat de ce type d'analyse peut être directement visualisé sous forme de cartographie.

Les analyses réalisées dans les références bibliographiques étudiées utilisent ces outils ainsi que des statistiques pour évaluer l'érosion des sols, notamment, des analyses de corrélation, analyses en composantes principales ou encore des méthodes statistiques de pondération des critères. Leurs démarches ne diffèrent pas, seuls les outils et les données utilisés sont différents.

Les paramètres des modèles et des analyses spatiales

Dans le Tableau 1, les paramètres les plus couramment utilisés pour les modèles d'érosion (exemple ici des modèles USLE, PESERA et AVSWAT) ont été représentés.

	USLE	PESERA	AVSWAT
Pluie	X	X	X
Erodibilité des sols	X	X	X

Critères morphométriques	X	X	
Systèmes culturaux	X		X
Mesures de conservation	X		
Usage du sol	X	X	X
Evapotranspiration		X	X
Conductivité hydraulique des sols			X
Températures		X	
Capacité de stockage en eau des sols		X	

Tableau 1 : Exemples de critères pris en compte dans les modèles USLE, PESERA, AVSWAT ¹²

Certains de ces critères se retrouvent dans les méthodes d'analyse spatiale présentées ci-dessous. D'autres tels que l'évapotranspiration, et la conductivité hydraulique des sols sont des paramètres pour lesquels il est difficile d'obtenir des données. D'autre part, certains paramètres nécessitent un calage, alors que d'autres tels ceux qui sont présentés dans le tableau suivant n'en nécessitent pas.

	Brochot, 2000	Torkashvand, 2008	Soti, 2002	Latulippe, Peiry, 1996	Bou Kheir, et al., 2008
Topographie	X	X	X	X	X
Couverture végétale	X	X	X	X	
Lithologies et formations superficielles	X	X	X	X	
Occupation du sol		X	X		X
Critères morphométriques (densité de drainage, et ratio de relief)				X	
Sensibilité à l'érosion des roches		X			
Présence de glissement de terrains	X				
Erosivité des pluies					X
Infiltration					X
Erodibilité des sols					X

Tableau 2 : Exemple de critères pris en compte dans les analyses spatiales des travaux de Brochot, 2000, Torkashvand, 2008, Soti, 2002, Latulippe, Peiry, 1996, Bou Kheir et al., 2008 ¹³

Le choix des critères pris en compte est détaillé dans la partie 3 de la phase 2.

1.3 CONCLUSION

L'objectif de ce stage n'est pas l'application d'un modèle hydrologique. L'étude bibliographique réalisée permet de parcourir les critères et les méthodes pris en compte pour établir un bilan de perte en sol.

D'autre part, l'objectif n'est pas ici de quantifier mais plutôt de hiérarchiser au sein du bassin versant de l'Arc les sous bassins contributeurs soit déterminer de façon qualitative la sensibilité à l'érosion des sols sur le bassin versant, et de proposer un découpage en sous bassins versants, pertinent pour la modélisation hydro-sédimentaire. C'est une autre alternative s'appuyant sur une méthodologie d'analyse spatiale, mise au point par divers auteurs qui est choisie. Celle-ci ne nécessite en ressources que les données permettant de déterminer la sensibilité des sols à l'érosion dans des logiciels SIG. (Bou Kheir, 2008, Latulippe, 1995).

¹² La liste des paramètres pour chaque modèle n'est pas exhaustive, et les objectifs et buts de ces modèles diffèrent légèrement (voir la synthèse des modèles d'érosion en annexe 7).

¹³ La liste des paramètres pour chaque étude n'est pas exhaustive, et les objectifs de ces analyses spatiales diffèrent légèrement (voir la synthèse des modèles d'érosion en annexe 7).

2 DEFINITION DE LA METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée reprendra la structuration de la réponse à la problématique présentée dans la Figure 1.

Deux thèmes principaux reviennent dans cette problématique : la sensibilité à l'érosion du bassin versant tenant compte du forçage hydro-climatique, et la structuration des flux.

Le premier thème, présenté dans cette partie, sera abordé par une analyse spatiale :

- La sensibilité du bassin sera évaluée par une analyse multicritère couplant les critères couramment utilisés dans les différents modèles présentés précédemment, mais aussi dans les méthodes de Bou Kheir (2008) et de Latulippe (1995). La pondération des différents critères entre eux sera effectuée par une méthode statistique.
- Les caractéristiques hydro-climatiques inhérentes au bassin versant ne seront pas étudiées dans le détail. Une interprétation des cumuls de précipitation mensuelle sera donnée pour une année moyenne, à partir d'une analyse thématique. Les sites préférentiels de fonte seront localisés, ainsi l'analyse pourra prendre en compte la saisonnalité des phénomènes hydro-climatiques. L'interprétation sera ensuite validée par une synthèse bibliographique.

Le deuxième thème nécessitera en plus d'une analyse spatiale, l'utilisation de logiciels spécialisés dans la segmentation en sous bassin versant à partir d'un modèle numérique de terrain. Les différents découpages réalisés seront présentés dans la phase 3.

Enfin le couplage des deux thèmes permettra de répondre à la problématique, qui est de segmenter le bassin versant de l'arc en cohérence avec son fonctionnement hydro-sédimentaire. Le résultat, présenté sous forme cartographique en annexes 43 et 44 , montrera un ensemble de bassins dont les caractéristiques de sensibilité à l'érosion, de forçage hydro - climatique, et de contribution sédimentaire seront homogènes.

Comme ceci a été mentionné plus haut, la méthodologie développée est une analyse spatiale qui permet de caractériser le bassin versant par l'étude de la sensibilité à l'érosion et du forçage hydro-climatique.

2.1 METHODOLOGIE DEVELOPPEE POUR L'ETUDE DE LA SENSIBILITE A L'EROSION DU BASSIN DE L'ARC EN TENANT COMPTE DU FORÇAGE HYDRO-CLIMATIQUE

L'accent est mis ici sur l'importance de la pondération des critères qui seront pris en compte pour cette étude. Une simple superposition des critères donnerait déjà une hiérarchie dans la sensibilité des versants, mais l'importance de chacun serait identique. En raison du caractère particulier du bassin versant, et d'après les études déjà menées (Marnézy, 1999 ; Latulippe, 1995) il semble que l'importance donnée aux différents critères ne peut être la même. Ainsi une pondération de chacun des critères adaptée au contexte de cette étude semble appropriée.

La première étape qui permet la réalisation de l'analyse spatiale est la standardisation des résolutions spatiales des différents jeux de données. Une résolution assez fine semble la meilleure option : les jeux de données sont donc rééchantillonnés avec une résolution de 10 mètres.

Chacun des critères est ensuite considéré indépendamment, sous forme d'un jeu de données raster, et pour chaque critère les pixels sont hiérarchisés en fonction de leur sensibilité potentielle. Les méthodes spécifiques à chaque jeu de données seront détaillées par la suite. Une fois que des classes de sensibilité sont définies pour chaque jeu de données, il faut fixer un poids à chacun des critères, et à chaque classe de sensibilité.

Une méthode statistique est ici utilisée pour évaluer l'importance de chaque facteur dans l'explication du potentiel de sensibilité globale pour chaque pixel (son poids). Pour chacune l'application spatialisée se fait à l'aide d'une somme pondérée, c'est-à-dire que pour chaque pixel de l'image se fait le calcul suivant :

$$S = \sum_{i=1}^{i=N} W_i.K_i$$

Où

S est la valeur finale du pixel ;

N est le nombre de critères pris en compte dans l'établissement de la valeur finale du pixel ;

W est le poids de chaque critère ;

K est la valeur de la classe, donc la valeur initiale du pixel pour chaque critère ;

La méthode choisie pour évaluer le poids de chaque critère est celle de Saaty ou Analytic Hierarchy Process (AHP).

Pour l'évaluation de la sensibilité du bassin à l'érosion, et celle du forçage hydro-climatique, la méthodologie utilisée pour la pondération sera la même.

Méthode de Saaty

Il s'agit d'une méthode d'analyse multicritère hiérarchique (Saaty, *et al.*, 1984 ; support de cours Joliveau), qui permet de pondérer les différents critères (détaillés par la suite) dans leur importance pour d'une part la détermination des potentiels de sensibilité des sols et de forçage hydro-climatique. Ces deux potentiels seront eux mêmes pondérés pour effectuer leur croisement.

La méthode repose sur la séparation des critères et leur hiérarchisation pour évaluer leur poids respectif, tout en gardant une cohérence logique. Les critères et les sous critères peuvent être modélisés sous forme d'un arbre, où un poids sera accordé à chaque branche, rameau et feuille (voir en annexe 8).

Les critères sont comparés deux à deux pour évaluer la dominance de chacun par rapport aux autres. Cette dominance est déterminée par une échelle allant de 1 à 9.

Echelle numérique	Echelle verbale
1	Importance égale des deux éléments
3	Un élément est un peu plus important que l'autre
5	Un élément est plus important que l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9	Un élément est absolument plus important que l'autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Tableau 3: Echelle numérique pour évaluer la dominance d'un critère par rapport à un autre

Les calculs des poids se font à tous les niveaux de l'arbre. Ici (voir l'annexe 8), les branches principales correspondent aux critères de sensibilité potentielle à l'érosion. On évalue donc la dominance de chaque critère de sensibilité potentielle à l'érosion sur un autre par le biais d'un indice sur l'échelle numérique qui permet de calculer ensuite leur poids relatif.

L'opération est répétée pour chaque sous critère déterminant la sensibilité potentielle à l'érosion. Leur somme doit être équivalente au poids du critère ou sous critère d'ordre supérieur. Les sous critères à prendre en compte seront présentés par la suite.

Etant donné que les poids attribués résultent de jugements, le choix des valeurs d'indice de dominance devra être justifié. Différentes combinaisons permettront d'analyser l'impact de la variation des poids sur le résultat final. L'affectation des valeurs de dominance la plus juste sera celle qui permet la meilleure corrélation avec le résultat du calcul de la densité de drainage du bassin. Celle-ci sera comparée à chaque critère pour observer d'éventuelles corrélations et permettra de mettre en évidence la variabilité spatiale de la production de sédiments fins.

L'application spatialisée dans le logiciel SIG ArcView sera facilement réalisable, en passant l'ensemble des jeux de données en mode raster, et en utilisant l'algèbre de cartes.

Les étapes de la méthode :

- Décomposition du problème en une structure hiérarchique. T. Saaty recommande de limiter le nombre de critères à 7 au plus. Ici il existe trois niveaux : les branches principales correspondent à l'analyse de la sensibilité à l'érosion et au forçage hydro-climatique ; le second niveau correspond aux sous critères déterminant la sensibilité des sols à l'érosion; le troisième, enfin, représente les différentes classes de sensibilité à l'érosion pour chaque sous critère.
- Effectuer les combinaisons binaires pour évaluer la dominance d'un critère par rapport à un autre. L'opération sera réitérée autant de fois qu'il y a de critères et de sous critères
- Déterminer les priorités : calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente. La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propres. Les valeurs du vecteur propre sont normalisées à 1.
- Cohérence des jugements :
 - calcul d'un indice de cohérence IC par la formule suivante :

$$IC = (\lambda_{\max} - K) / (K - 1)$$

Où :

K est le nombre d'éléments comparés

λ_{\max} est la somme des valeurs des vecteurs propres de la matrice normalisée sur le nombre de critères

Remarque : Plus IC est important, moins les jugements sont cohérents (une dominance trop importante a été accordée à un critère par rapport à un autre). Cet indice peut ensuite être comparé à des valeurs critiques obtenues par simulation, correspondant à l'indice aléatoire d'une matrice de même dimension (voir le Tableau suivant).

Nombre de critères	2	3	4	5	6	7
IA	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

Tableau 4 : Indice aléatoire pour des matrices de dimension 2 à 7

Cette comparaison est effectuée par le calcul du ratio de cohérence.

- calcul du ratio de cohérence par la formule suivante :

$$RC = IC / IA$$

Où :

RC : Ratio de cohérence

IA : indice aléatoire

IC : indice de cohérence

Ce ratio peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée de manière aléatoire. Selon Saaty, sa valeur doit être inférieure à 10%. Si ce n'est pas le cas, certains jugements devront être révisés.

Si la cohérence des jugements est bonne, les poids définis sont corrects et peuvent être appliqués aux jeux de données raster. Les différents critères seront combinés par une somme pondérée, grâce à l'outil algèbre spatiale de la toolbox Spatial Analyst d'ArcView.

Le choix de cette méthodologie permet de réduire considérablement les besoins en données, logiciels et personnels. En effet, l'application ne nécessite qu'un seul logiciel, ArcView qui permet le regroupement, la structuration des données, les géotraitements et enfin la représentation cartographique des résultats.

La pondération des critères se fera de manière statistique, ainsi seul le logiciel Excel sera nécessaire pour le calcul des poids des différents facteurs.

Les besoins en données dépendent directement des facteurs que l'on souhaite prendre en compte dans l'estimation de la sensibilité des sols et du forçage hydro-climatique. Ils seront détaillés dans la partie suivante.

Enfin, comme précisé dans la phase 1, je serai l'unique utilisatrice du SIG. L'application de cette méthodologie ne nécessitera pas l'intervention d'un autre personnel, même si les résultats produits seront réutilisés dans le cadre d'autres applications.

3 QUELS SONT LES CRITERES A PRENDRE EN COMPTE ?

Comme dans la majorité des modèles couplés aux SIG, les critères généralement pris en compte pour déterminer la sensibilité globale sont ceux qui influent directement sur la quantité de sédiment pouvant être arrachée :

- Le climat (intensité et la durée des précipitations, ensoleillement, température)
- La topographie / la pente / la géomorphologie
- La pédologie / géologie : la dureté, la cohésion et la fracturation des roches
- L'usage/occupation du sol et ses changements (densité de la couverture végétale, anthropisation)

L'analyse spatiale que l'on souhaite réaliser doit prendre en compte uniquement les critères pour lesquels les données sont disponibles. Les plus fréquemment utilisés aussi bien dans les modèles que dans les méthodes présentées dans le Tableau 1 et Tableau 2, sont ceux liés à la topographie, à l'occupation du sol, en particulier la couverture végétale, à la géologie, et au forçage climatique. Comme cela a été présenté dans la première partie, les données brutes permettant d'obtenir ces critères sont disponibles.

En plus de ces facteurs, le bassin de l'Arc montre un nombre très important de glaciers qu'il est nécessaire de prendre en compte étant donné leur rôle prépondérant dans l'érosion des sols en haute montagne. Un autre point soulevé par Marnézy dans sa thèse (1999), est la présence de nombreux aménagements sur la rivière, constituant des points d'arrêts du flux sédimentaire, comme les barrages ou les prises d'eau. Ils seront pris en compte lors du découpage en sous bassins contributeurs dans la partie 1.4 de la phase 3.

En conclusion, les critères à prendre en compte dans cette analyse spatiale sont d'une part nécessaires à la détermination de la sensibilité à l'érosion des sols :

- Critères topographiques
 - La pente
 - Les formes des versants
- Critères géologiques
 - La lithologie
 - Les formations superficielles
 - L'usure des roches (en lien avec la géologie structurale, et le degré de métamorphisme)
- Critères d'occupation du sol
 - Les types d'occupation du sol
 - Les changements de type d'occupation du sol (entre 1990 et 2006)
 - La présence de glaciers

D'autre part, les critères finalement considérés pour l'évaluation du forçage hydro-climatique résultent de l'interprétation des cumuls saisonniers d'une année dans la moyenne, de la localisation des sites de fonte, et de la

densité de drainage, confortée par une synthèse bibliographique. Celle-ci permettra de définir globalement les secteurs les plus affectés par la fonte au printemps, et les plus sensibles aux événements intenses de l'été.

3.1 POUR DETERMINER LA SENSIBILITE A L'EROSION DES SOLS DU BASSIN VERSANT

La topographie

Acquisition des données relatives à chaque critère

Le bassin de l'Arc présente de très fortes variations d'altitude entre les crêtes et le talweg principal. Ceci induit localement de très fortes pentes, pouvant atteindre 79°, lorsqu'elles sont calculées après le rééchantillonnage du MNT à 20 mètres (voir la cartographie en annexe 9).

La donnée brute à disposition pour représenter les critères topographiques est un modèle numérique de terrain, fourni par l'IGN au format ASCII sous forme d'un maillage carré de 50m de coté, appelé BD Alti.

Pour obtenir à partir de cette donnée, la pente et les formes des versants, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes développés dans des logiciels SIG.

La pente

Il existe une corrélation entre le degré de pente et la sensibilité à l'érosion des versants du bassin de l'Arc, que l'on va essayer de mettre en évidence par la suite.

Les données brutes sont importées dans le logiciel ArcView, et la pente est calculée grâce à l'outil Slope du jeu d'outils Surface de la boîte à outils Spatial Analyst. Les valeurs de pente en sortie sont des réels allant de 0° à environ 80° (voir la cartographie en annexe 9). L'algorithme de calcul est le suivant :

Pour chaque cellule, le taux maximum de variation de la valeur de cette cellule (selon la plus grande pente) à ces voisines est calculé par la formule :

$$\text{slope_degrees} = \text{ATAN} \left(\sqrt{ [dz/dx]^2 + [dz/dy]^2 } \right) * 57.29578$$

La dispersion des valeurs étant très grande, il est nécessaire, pour définir un degré de sensibilité à l'érosion, de les discrétiser de manière pertinente.

Les possibilités de reclassement sont nombreuses. D'après l'étude bibliographique réalisée, le nombre de classes et leur étendue varient en fonction du contexte topographique. Certaines classifications telles que celle de Rodda (2001) qui s'applique sur un bassin de Nouvelle Zélande, plutôt agricole et au relief modéré (3-8% 8-25%) ; ou celle de Torkashvand (2008), basée sur la classification de Mahler, appliquée à un sous bassin iranien dont les pentes sont relativement faible, et le climat sub – humide à aride (0-2%, 2-5%, 5-8%, 8-12%, 12-20%, 20-40%, 40-70% et >70%) ; ne semblent pas adaptées au bassin de l'Arc.

D'autres études, notamment celles de Soti (2002), et de Bou Kheir (2008) semblent mieux correspondre avec les caractéristiques topographiques du bassin. D'un point de vue climatique et géologique les bassins étudiés dans ces publications sont tout à fait différents de celui de l'Arc, mais ils présentent des reliefs accentués. La classification établie par Soti (2002) est définie de la manière suivante : formation de 4 classes dont les valeurs sont 0° – 10°, 10° - 20°, 20°-30°, > 30°. Celle de Bou Kheir (2008) est légèrement différente : formation de 5 classes de valeurs 0° – 5°, 5° - 10°, 10°-20°, 20°-25°, > 25°.

Pour les besoins de notre étude, le nombre de classes en sortie doit être le plus faible possible. La méthode d'analyse spatiale appliquée par la suite pondérera l'ensemble des critères et des classes pour réaliser la somme de ceux-ci. Plus le nombre de classes et de critères est réduit en entrée, plus l'interprétation de la somme pondérée sera facilitée.

A ce stade de l'analyse, la relation entre la pente et la sensibilité à l'érosion n'est pas entièrement connue. Il semble plus pertinent de seuiliser la classe des pentes les plus fortes avec une valeur suffisamment importante pour ne pas laisser de côté d'une partie de l'interprétation de la corrélation entre les valeurs de pentes et la sensibilité à l'érosion des versants. Pour les valeurs les plus faibles, leur représentation sur le bassin étant peu importante, leur regroupement au sein d'une même classe allant de 0° à 10° semble plus pertinent, qu'une segmentation en deux classes.

Les valeurs de pentes sont donc regroupées selon la classification établie par Soti (2002) grâce à l'outil Reclassification de la boîte à outils Spatial Analyst d'ArcView et le résultat de cette reclassification est présenté en annexe 10.

Les formes du relief (concavités et convexités dans le plan vertical)

L'étude des formes des versants permet de mettre en évidence les secteurs les plus sensibles à l'érosion, où le flux de sédiment sera accéléré (convexité), et les secteurs où ce flux aura tendance à ralentir ou s'arrêter (concavité).

Le calcul des concavités et convexités dans le plan vertical est réalisé dans le logiciel LandSerf¹⁴ à partir du MNT, grâce au module Analyse > Surface Parameter > Profile curvature. Il permet de calculer le taux de variation verticale de la pente. Plus les valeurs en sortie sont faibles, plus les versants sont convexes, et inversement plus elles sont fortes, plus les versants sont concaves, les valeurs nulles correspondant aux secteurs plans. Le résultat de ce calcul est présenté en annexe 11.

Ces valeurs sont ensuite discrétisées afin d'obtenir des classes de sensibilité à l'érosion, les secteurs les plus sensibles présentant les valeurs les plus fortes (les formes concaves). Les valeurs s'échelonnant de -4.06945 à 4.47364, les trois classes formées sont donc : de -4.06945 à -1 pour les secteurs convexes, de -1 à 1 pour les secteurs plans, et de 1 à 4.47364 pour les secteurs concaves et sont représentées sur la cartographie en annexe 12.

La pédologie / géologie

Les données sur la géologie du bassin versant à l'échelle souhaitée n'étaient pas initialement disponibles au format numérique. En raison de leur coût très important, une méthode d'acquisition a donc été développée.

Le choix de l'échelle des données utilisées résulte d'une concertation avec A. Poirel (EDF). Les données initialement disponibles étaient la carte géologique au 1/1000000 digitalisée par le BRGM, associée à une table attributaire enrichie, par un chercheur du Cemagref, A.Chandesris, de champs concernant la fracturation des roches, leur chimisme, et leur potentialité à être plus ou moins facilement érodées. Cette cartographie n'est cependant pas suffisante, en particulier car les différentes lithologies de l'amont du bassin versant ne sont pas dissociées (regroupement sous le terme schiste assez vague). La discussion autour du choix de l'échelle a permis d'écarter le 1/50000 qui aurait donné beaucoup trop de détails pour l'objectif poursuivi (définir des classes de sensibilité en fonction de la géologie) et pour la taille du bassin. C'est donc la carte géologique au 1/250 000 qui a été choisie.

Les données de géologie ont donc été construites à partir de la cartographie papier au 1/250000 réalisée par le BRGM. Il s'agit de la carte d'Annecy publiée en 1980 dont les dernières modifications ont été apportées en 1977.

Méthode de cartographie

Après le scannage de la carte papier, il a été nécessaire de la géoréférencer, afin d'obtenir la superposition avec la zone d'étude.

La carte géologique est constituée d'une multitude d'aplats de couleurs vives dont les teintes sont bien distinctes, séparés par des traits noirs épais. Ainsi, un algorithme de classification automatique a été appliqué dans le logiciel ArcView et a permis d'identifier très rapidement les différentes lithologies dans des classes distinctes.

¹⁴ Documentation et téléchargement : <http://www.landserf.org>

Plusieurs essais ont été réalisés : le nombre de classes en sortie finalement choisi est de 23 à l'issue de la première classification automatique. Les lithologies rencontrées dans chacune des classes ont été déterminées grâce à la superposition avec la carte géologique scannée. Les classes présentant de nombreuses unités non différenciées ont été reclassées par la même méthode. L'opération a été répétée plusieurs fois pour obtenir le résultat le plus précis possible. Au final, 20 classes ont été isolées. Ce chiffre montre que certaines lithologies représentées par des couleurs assez proches n'ont pas pu être différenciées par cette méthode, car le nombre final de lithologies présentes est de 45. D'autre part, de nombreux pixels se sont trouvés mal classés.

Pour éliminer ce « bruit », un filtre majoritaire puis une érosion et une dilatation ont été effectuées. Le filtre majoritaire permet d'affecter un pixel isolé à une autre classe, dont le nombre de pixel est plus important (Figure 2).

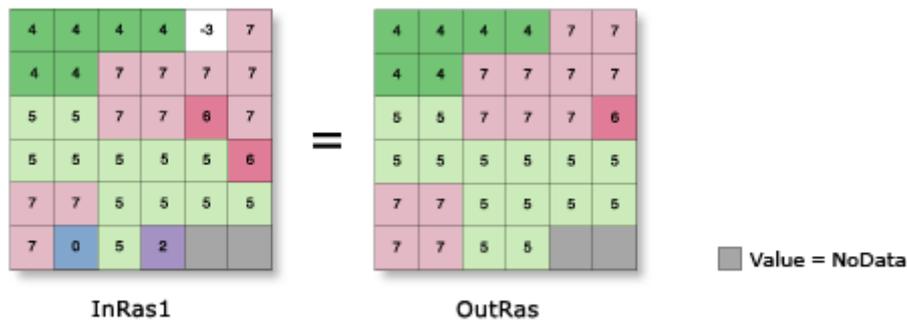


Figure 2 : Filtre majoritaire, d'après l'aide d'ArcView 9.3

Définition de l'érosion¹⁵

Soit une image binaire X et un élément structurant M. L'érosion de X par M est une image binaire définie par

$$Ero_M(X) = \{(x,y) \mid M_{(x,y)} \subset X\}$$

Définition de la dilatation

Soit une image binaire X et un élément structurant M. La dilatation de X par M est une image binaire définie par

$$Dil_M(X) = \{(x,y) \mid M(x,y) \cap X \neq \emptyset\}$$

Les pixels de classes sous représentées ont donc été agglomérés avec ceux d'une classe plus importante. L'érosion est effectuée en premier afin d'éliminer les pixels isolés, puis la dilatation permet de combler des « trous » (comme les yeux, sur la figure suivante). Ces opérations sont duales mais ne sont pas l'inverse l'une de l'autre. Elles ne sont donc pas réversibles et entraînent une perte d'information sur l'image.

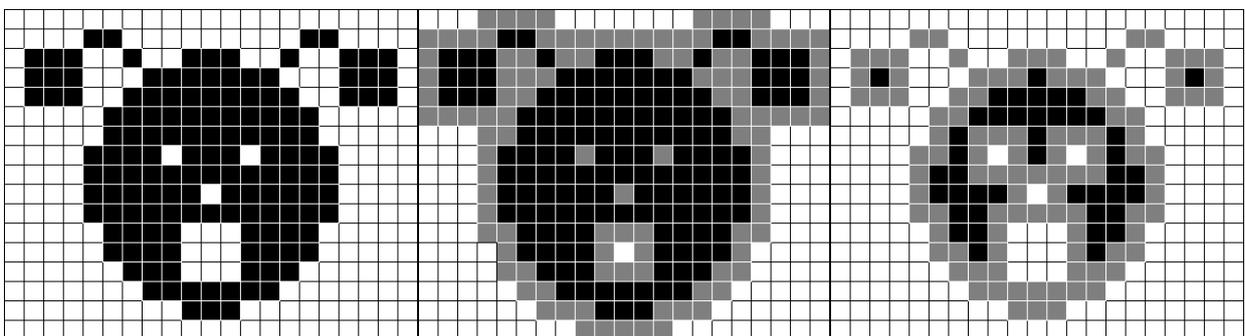


Figure 3 : Illustration des opérations de dilatation (2e figure) et d'érosion (3e figure)¹⁶

Le résultat a ensuite été vectorisé. Les polygones de la taille de 2 ou 3 pixels représentant encore des erreurs de classification ont été éliminés et les polygones restant ont été retravaillés manuellement et individuellement afin de

¹⁵ D'après : Ingold, R., Opérateurs morphologiques, 2006, sur http://diuf.unifr.ch/courses/05-06/improc/slides/handouts/11_MorphOp.pdf

¹⁶ D'après : Decenciere, E., 1997, sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Morphologie_mathématique

correspondre au mieux à l'interprétation de la carte papier. Malgré cela, les contours de certains polygones peuvent, à cause de cette méthode, être pixellisés. Les lithologies ont ensuite été associées aux polygones grâce au numéro de classe du précédent raster, et ont été affinées pour les polygones de petite taille qui n'avaient pas été détectés automatiquement.

Au final, la cartographie est de très bonne précision par rapport au format papier et va permettre une étude plus précise du potentiel d'érosion associé à chaque lithologie, que la cartographie au 1/1 000 000 déjà à disposition au format vecteur. Celle-ci est présentée en annexe 13.

Les données de pédologie ne sont pas disponibles pour l'analyse spatiale. Cependant, une cartographie des formations superficielles (annexe 14) susceptibles de témoigner de l'existence d'un pergélisol sous-jacent a été fournie par S. Monnier¹⁷. Ces formations sont des glaciers rocheux et des formes connexes telles que les éboulis fluants, ou protalus lobés, des « ice-cored moraines » ou « push moraines ». Leurs implications en termes morphodynamiques ne seront pas considérées ici. Ces formations sont liées en profondeur par de la glace et sont constituées de blocs (Valadas, 1984 in Bertrand, 2008) à structure openwork¹⁸ en surface et d'une grande quantité de matériaux fins en profondeur. Elles sont donc susceptibles de fournir lors d'événements pluvieux ou lors de la fonte de la glace les constituant, des sédiments fins, qui, s'ils sont connectés au réseau hydrographique, iront alimenter l'Arc.

Sensibilité à l'érosion

Des lithologies présentes sur la cartographie au 1/250 000

Un niveau de résistance à l'érosion des matériaux est associé à chacune des lithologies sur la base du travail effectué par A. Chandesris qui s'est appuyé sur les compétences de chercheurs en géosciences au BRGM pour définir ce paramètre pour les lithologies de la carte au 1/1 000 000, mais aussi d'après le rapport technique rédigé conjointement par l'INRA, l'IFEN, et le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, « Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France » (Tableau 2 page 20). La notice de la carte au 1/250 000, complétée par le dictionnaire de géologie (Raoult et Foucault, 2005) permettent d'affiner ce travail.

Les différentes publications ayant servi à évaluer le degré de sensibilité de chacune des lithologies sont les suivantes :

- Classification de Chandesris établie à partir de Derruau, 1974, Rogers et Wasson, 1995
- Étude « Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France », réalisée par C. Montier, J. Daroussin, D. King du Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France, à l'INRA, 1998
- « Contribution à l'étude sur le transport solide en suspension dans les cours d'eau et sur la dégradation du sol dans le bassin du Pô », L. Canali, G. Allodi, 1967
- « The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250m DEM » A. Kühni, O.A. Pfiffner, 2001

La thèse de A. Marnézy (1999) et le rapport sur l'étude hydraulique de l'Arc en Maurienne, de S. Brochot (1998) sont venus enrichir les informations données par les références citées précédemment.

En annexe 15 se trouve l'ensemble des tableaux présentés dans les références précédentes.

5 niveaux de sensibilité des lithologies ont été dégagés (très faible, faible, moyenne, forte, très forte). Les glaciers ne devraient pas être pris en compte ici, puisqu'ils ne correspondent pas à une roche. Cependant, les processus d'érosion sous-jacents (par la circulation de fluides) sont très importants, et puisqu'ils sont classés comme très sensibles à l'érosion dans le critère occupation du sol, il en sera de même ici, afin que leur sensibilité soit homogène quel que soit

¹⁷ ATER, Département de Géographie, Université Paris 12-Val de Marne

¹⁸ Blocs de dimensions importantes, séparés par des vides.

le critère considéré. Ils seront toutefois notés ND (non définie), ne représentant pas une roche, dans les tableaux récapitulant la classification établie en annexe 15.

Dans ce contexte géologique, la géologie structurale et le métamorphisme jouent un rôle très important sur le degré d'usure des roches, donc sur leur sensibilité. Les cartes du métamorphisme et de la géologie structurale (annexes 2 et 3), sont issues de la carte géologique de la France au 1/250 000, Annecy, BRGM, obtenues selon la même méthode que la carte géologique numérique.

Ainsi pour prendre en compte ces éléments, la donnée vectorielle de géologie a été enrichie en superposant les cartes de géologie structurale et de métamorphisme issues de la cartographie papier (annexes 2 et 3). Furent ainsi ajoutés les champs récapitulant l'ensemble structural auquel appartient chaque polygone, le métamorphisme ayant affecté la lithologie, et enfin un champ pour affiner les informations précédentes, synthétisant la notice de la carte papier.

En fonction de l'importance des contraintes qu'a subies la roche et du métamorphisme, la sensibilité à l'érosion liée à certaines lithologies a été modifiée. Le choix de ces modifications résulte de l'application d'un cheminement dans un arbre de décision (placé en annexe 16). Lorsque les conditions tectoniques passées et le degré de métamorphisme atteint sont tels qu'ils entraînent une fragilisation de la roche, le degré de sensibilité pour les lithologies les plus affectées a été augmenté d'une classe. Les degrés de sensibilité vont dans ce cas de très faible à maximal (soit une classe de plus que dans la classification précédente).

Comme pour le critère des pentes, le nombre de classes utilisé pour l'analyse spatiale doit être faible afin que les résultats soient facilement interprétables. Latulippe (1995) utilise pour le facteur géologie seulement 2 classes. Ici le choix est fait de conserver 3 classes (notées 1, 2 et 3 dans les arbres de décision en annexe 16) correspondant à une géologie pas ou peu favorable, moyennement favorable et très favorable à l'érosion.

Le reclassement est fait de telle sorte que l'écart des surfaces de chaque classe ne soit pas trop important, et puisse être comparé à la cartographie réalisée par Latulippe :

Degré de sensibilité	Echelle numérique finale
ND	3
très faible	1
faible	1
moyenne	2
forte	2
très forte	3
maximale	3

Figure 4 : Tableau récapitulant la reclassification du degré de sensibilité à l'érosion des différentes lithologies

La classe 1 représente les lithologies très peu voire non sensibles à l'érosion. La classe 2 correspond aux sensibilités moyennes à fortes, et enfin la classe 3, représente les lithologies les plus favorables à l'érosion.

La carte représentant la sensibilité à l'érosion en fonction des lithologies qui reprend ce classement est présentée en annexe 17.

Des formations de type glacier rocheux

L'ensemble des formations superficielles dont les données sont disponibles sont directement classées comme étant très sensibles à l'érosion, en raison de leur important potentiel à fournir des sédiments fins. La distinction de sensibilité entre les différentes manifestations de formations témoignant de la présence d'un pergélisol ne peut se faire à l'échelle de temps pour laquelle l'analyse spatiale est faite. Deux classes caractériseront donc ces formations, l'une les représentant, et l'autre englobant tout le reste.

L'occupation du sol et ses changements

Occupation du sol

L'occupation du sol est un critère important à prendre en compte pour évaluer la sensibilité à l'érosion. Les différents types d'occupation ont des réponses variables au phénomène d'érosion. Ainsi les secteurs les plus sensibles sont repérés par l'absence de la couverture végétale, la présence de glaciers, les roches à nu et les sites d'extractions de matériaux qui fournissent des quantités importantes de sédiments fins, et qui peuvent entraîner un ruissellement important favorisant l'érosion. Les secteurs les moins sensibles sont ceux où la végétation arbustive est très représentée car sa capacité de stabilisation des sols est importante (Montier, Daroussin, King, 1998) et ceux où l'urbanisation est très développée car elle entraîne une imperméabilisation des surfaces.

Les données disponibles sont fournies par le programme européen Corine Land Cover. La cartographie de cette occupation du sol est basée sur la version 2006 de ces données et est représentée en annexe 18. A chacun des types d'occupation du sol, correspond une classe de sensibilité à l'érosion. Ces classes sont définies sur la base de l'étude ayant déjà servi pour hiérarchiser la sensibilité à l'érosion potentielle des différentes lithologies : Étude « Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France », réalisée par Montier, Daroussin, et King du Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France, à l'INRA (1998).

La donnée initiale présente une classe glacier et neiges éternelles, dont la localisation des éléments est imprécise. Parce que ce critère est très important sur le bassin de l'Arc, une nouvelle cartographie sera réalisée, et la méthode développée dans ce but sera explicitée dans la partie suivante. La nouvelle donnée créée est par la suite intégrée à la cartographie d'occupation du sol.

Un premier reclassement sur la donnée brute est réalisé :

Type d'occupation du sol	Sensibilité
Cours et voies d'eau	Nulle
Plans d'eau	Nulle
Tissu urbain discontinu	Très faible
Zones industrielles ou commerciales	Très faible
Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	Très faible
Forêts de feuillus	Faible
Forêts de conifères	Faible
Forêts mélangées	Faible
Prairies	Moyenne
Pelouses et pâturages naturels	Moyenne
Landes et broussailles	Forte
Forêt et végétation arbustive en mutation	Forte
Végétation clairsemée	Forte
Terres arables hors périmètres d'irrigation	Très forte
Systèmes culturaux et parcellaires complexes	Très forte
Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels	Très forte
Extraction de matériaux	Maximale
Glaciers et neiges éternelles	Maximale

Plages, dunes et sable	Maximale
Roches nues	Maximale

Figure 5 : Tableau récapitulatif de la reclassification du degré de sensibilité à l'érosion des différents types d'occupation du sol

Cas particulier des glaciers

Si l'on se place à l'échelle pluri-décennale, le rôle des glaciers dans les processus d'érosion des sols est complexe. En dehors des processus de l'érosion glaciaire classiques (qui seront détaillés dans la partie suivante), le rôle de protection des versants par la présence d'un glacier peut être mis en évidence, en raison de l'importance de l'érosion des matériaux sous-jacents lorsqu'ils sont découverts par le recul lié au réchauffement climatique (on ne parle pas ici de simples variations saisonnières, ni journalières, mais bien d'un réchauffement global ; Marnézy, 1999). Ce phénomène, ne peut être pris en compte pour l'étude réalisée en raison de l'échelle temporelle choisie. L'érosion liée à la présence de glacier sera donc considérée comme maximale.

Pour les mêmes raisons que celles évoquées lors des reclassifications des degrés de sensibilité à l'érosion liés aux facteurs topographiques et géologiques, le nombre de classes en sortie doit être suffisamment faible pour permettre une interprétation du résultat de l'analyse spatiale.

Le reclassement proposé et adopté pour l'application de l'analyse spatiale est le suivant :

Degré de sensibilité	Echelle numérique finale
nulle	0
très faible	1
faible	1
moyenne	2
forte	2
très forte	3
maximale	4

Figure 6 : Tableau représentant la reclassification finale des sensibilités à l'érosion liées aux différents types d'occupation du sol

Il permet de réduire le nombre de classes à 5, en gardant des surfaces de taille homogène. La cartographie représentant la sensibilité à l'érosion du bassin en fonction de ces types d'occupation du sol est présentée en annexe 19.

Les changements de type d'occupation du sol

Les secteurs où l'occupation du sol a changé depuis la version de 1990 sont aussi classés selon leur potentiel à fournir des matériaux fins. Les zones où la végétation a régressé, ou les changements de type d'occupation du sol qui sont plus favorables à la production de sédiments, sont classées comme des « ouvertures du paysage ».

Entre 1990 et 2000 et entre 2000 et 2006, seules deux zones sont concernées pour chaque période.

A l'inverse les zones où la végétation s'est répandue, et où l'urbanisation a progressé sont plus nombreuses, et ont un effet de stabilisation des sols. Cette évolution sera prise en compte dans l'analyse spatiale comme facteur limitant de l'érosion. Le poids de ce critère ne sera pas ajouté lors de la somme pondérée, mais soustrait.

Les variations ayant eu lieu entre 1990 et 2006 sont présentées dans le tableau en annexe 20.

La présence des glaciers

Dans le cadre de cette étude, la présence de glaciers est considérée comme un type d'occupation du sol particulier, mais également comme agent du forçage hydro-climatique. Leur cartographie est intégrée à celle de l'occupation du sol dans cette partie.

Pourquoi prendre en compte le critère présence de glaciers ?

- Ils sont responsables de l'érosion glaciaire, et leur forte présence sur le bassin joue un rôle important dans la production de fines.

- La modélisation hydro-sédimentaire réalisée à la suite de ce stage prendra en compte leur potentiel d'érosion, en particulier lors des périodes de fonte.

Les processus d'érosion en contexte glaciaire

La présence de nombreux glaciers est directement liée au climat particulier du bassin et à la topographie.

Ces glaciers sont responsables de modelés d'érosion caractéristiques. Cette érosion glaciaire peut être provoquée par le poids des glaciers, les eaux de fonte qu'ils produisent, les roches qu'ils contiennent, ou encore par leur déplacement.

L'érosion glaciaire s'articule autour de « trois processus fondamentaux [...] :

- Les eaux sous glaciaires constituent, surtout pour les grands glaciers de vallée, un des facteurs principaux de l'érosion. [...] Les arêtes vives des grains rongent les roches d'autant plus facilement qu'elles sont projetées avec violence. [...] Ce mitraillage intense explique les érosions très vives. « Les vitesses du flot sous glaciaire sont [...] notablement plus faibles [...] que la vitesse des torrents qui dévalent des pentes de même pourcentage en dehors du domaine englacé. Mais sur de très courts tronçons, à la suite des mises en charge fréquentes, les vitesses instantanées peuvent avoisiner 30 mètres/seconde, ce qui confère aux eaux sous-glaciaires chargées de sable une puissance d'érosion très supérieure à celle des écoulements torrentiels ordinaires. »
- L'abrasion, quant à elle peut être considérée comme le processus essentiel de l'érosion par le seul déplacement du glacier.[...] Il en résulte une érosion aboutissant à un élargissement de la vallée particulièrement marqué à la base des versants. Cette forme d'érosion latérale est la plus efficace en début ou en fin de glaciation.
- Le défonçage proglaciaire est le troisième processus par lequel le glacier exerce ses effets d'érosion. [...] La puissance de l'érosion par les eaux glaciaires qui peuvent en des périodes très courtes entailler des encoches profondes dans le lit rocheux » (Vivian, 1975).

Les effets d'abrasion et de polissage sont dus aux débris rocheux que renferme la glace. Plus ces débris sont de taille importante (blocs) plus la pression due à leur présence dans la glace sera forte et exercera une contrainte importante pour attaquer la roche du socle.¹⁹ Ces actions sur le socle ne sont pas observables à l'échelle journalière mais saisonnière, et doivent être prises en compte dans cette étude, étant responsables des modelés glaciaires rencontrés dans ce bassin versant.

En plus de l'érosion glaciaire, le contexte périglaciaire peut provoquer une forte érosion. L'alternance des cycles gel / dégel entraîne l'apparition de nombreuses manifestations d'un modelé périglaciaire : les sols polygonaux, les lentilles de glaces, ou toute autre manifestation caractéristique entraînant la gélifraction des sols.

Les eaux glaciaires, que ce soit l'eau stockée sous forme de glaces dans les glaciers ou en contexte périglaciaire et l'eau des névés, ou les eaux météoriques (pluie et neige) ou encore l'eau de fonte due au mouvement du glacier et au flux géothermique, sont responsables d'une érosion hydrique importante. Cette érosion est mécanique, grâce aux éléments transportés (charriés ou en suspension), hydraulique (cavitation), et chimique.

Toutes les manifestations de l'érosion que l'on trouve en contexte glaciaire ou périglaciaire sont fondamentales pour évaluer l'importance de l'érosion sur le bassin versant. Ainsi pour déterminer la part d'érosion due à la présence des glaciers, il est nécessaire d'en avoir une localisation très précise.

Cartographie des glaciers

A l'heure actuelle, il n'existe pas de base de données permettant de localiser leurs contours avec précision. L'ouvrage écrit par R. Vivian (Vivian, 1975), et l'atlas des glaciers à risques des Alpes françaises (Buisson, A. *et al.*, 1999), donnent des informations sur les processus de formations de ces glaciers et leur localisation approximative. Le deuxième ouvrage donne des informations très précises sur les risques liés à la présence de glacier, en particulier ceux qui sont en relation avec la production de fines. Ils ne permettent pas de représenter graphiquement l'ensemble des

¹⁹ http://paysagesglaciaires.net/site_source/Pages_2/4_Modes_erosion.html

glaciers. Seul l'IGN les a représentés sur les cartes topographiques, et met à jour leur localisation et leur étendue (dernière mise à jour en 2008). Ces données ne sont cependant pas disponibles pour cette étude. La définition d'une méthodologie pour cartographier les glaciers à partir des différentes sources de données à disposition est donc nécessaire.

Les données brutes utilisables pour réaliser cette cartographie sont :

- Le SCAN 25 (scan des feuilles des cartes topographiques au 1/25 000, IGN), date des cartes originales inconnue, antérieure à 1990
- L'orthophotographie (issue de la BD Ortho, de résolution 0.5m, IGN), 2006 (été)
- La carte géologique (scan de la feuille d'Annecy au 1/250000, BRGM), 1982
- Les photographies satellites Landsat (28,5m, NASA), 2001 (été)
- La cartographie Corine Land Cover (construite au 1/100 000, European Environmental Agency), 2006

Parmi ces cinq sources de données, certaines sont trop anciennes pour pouvoir déterminer précisément la localisation actuelle des glaciers. La carte géologique a été numérisée à partir de la carte papier au 1/250 000 d'Annecy de 1982. Cette donnée ne pourra donc pas être utilisée, non seulement à cause de son ancienneté mais aussi en raison de sa faible précision.

La localisation des glaciers sur les cartes topographiques est très précise à l'échelle du 1/25 000. Cependant, là encore, l'ancienneté de ces cartes ne permet pas d'avoir une localisation actuelle des glaciers. Les données à disposition datent pour la plupart de 1984. Seule une carte au 1/25 000 date de 2008 et présente les mises à jour nécessaires pour la localisation des glaciers.

La cartographie Corine Land Cover est trop imprécise, car construite au 1/100 000, et référence les glaciers avec les neiges éternelles. Elle ne peut venir qu'en critique du résultat qui sera obtenu par la méthodologie détaillée par la suite.

Ainsi ne restent que les orthophotographies et les données satellitaires Landsat.

Cartographie à partir des données satellites

Les photographies satellites Landsat ETM+ sont à une résolution de 28.5m mais sont suffisamment récentes pour pouvoir établir une cartographie précise. Par la segmentation d'une image constituée du ratio TM4 / TM5 (infrarouge proche / infrarouge moyen) les glaciers peuvent être mis en évidence (Paul, 2003).

Après le seuillage du résultat et l'application d'un filtre médian, les glaciers présents dans le bassin sont extraits. Cette cartographie rapide est moins précise que la solution qui sera présentée ci-après, mais permettra de valider les résultats obtenus.

Cartographie à partir des orthophotographies

A partir de la localisation approximative mais exhaustive des glaciers donnée par les cartes topographiques anciennes, et la cartographie Corine Land Cover 2006, un découpage des orthophotographies²⁰ dans une emprise légèrement plus large que celle des glaciers (100m) est effectué²¹. Ceci permet de ne travailler que sur les secteurs dont on est sûr qu'ils correspondent bien à des glaciers, ou, des névés, et non pas à des sols nus ou des zones urbanisées. Bien que les orthophotographies aient été prises en été, il peut localement subsister de la neige, en particulier sur les versants ubacs. La distinction entre ces deux formes ne pourra cependant pas être réalisée étant donné qu'elles présentent la même gamme de valeur vert, bleu et rouge. Une certaine proportion de la cartographie finale ne correspondra donc pas à des glaciers, mais à de la neige. Celle-ci devrait rester raisonnablement faible grâce à la méthodologie développée.

²⁰ Créer un jeu de données raster qui stockera l'ensemble des dalles correspondant uniquement aux glaciers (outil mosaïque d'ArcGIS).

²¹ Création d'une zone tampon de 100m autour des entités glaciers grossièrement cartographiées, puis l'extraction se fait par l'outil Extraction par masque du jeu d'outils Extraction de la boîte à outils Spatial Analyst.

D'autre part, les algorithmes, appliqués par la suite pour isoler les glaciers, sont beaucoup moins efficaces sur une image où le nombre de pixels est important, et où les couleurs varient beaucoup (plus que sur une surface censée représenter un glacier et une bordure qui l'entoure). Leur application sur des zones réduites permettra d'améliorer leurs performances et d'obtenir des contours plus précis.

Sur les orthophotographies découpées, une classification automatique²² des pixels avec 10 classes en sortie permet de distinguer précisément le contour des glaciers dans une à quatre classes (l'une d'elle pouvant représenter les glaciers situés dans l'ombre). Le contenu de chaque classe est interprété, et les classes représentant les glaciers sont ensuite regroupées. Un lissage de l'image est enfin effectué afin de se débarrasser du bruit provoqué par le mauvais classement de certains pixels (application de deux filtres majoritaires, puis une érosion / dilatation²³).

Enfin, l'image est vectorisée et corrigée manuellement pour les glaciers qui n'auraient pas été cartographiés correctement (trous, ombres non pris en compte).

Comparaison des cartographies issues des orthophotographies et des images satellites

La localisation des glaciers est globalement la même dans les résultats des deux méthodes (voir les résultats en annexe 21). Elle peut différer localement jusqu'à quelques dizaines de mètres. Les glaciers se trouvent en majorité sur la bordure orientale du bassin versant, où les altitudes sont les plus élevées.

Les contours sont cependant très différents. Avec la cartographie issue des orthophotographies, le contour est très précis puisque la donnée de base offre une meilleure résolution (0.5 mètres). Les entités représentent à la fois des glaciers et des névés, malgré la pré-sélection des sites de glacier, puisque leurs couleurs en rouge vert bleu sont très proches sur les orthophotographies. D'autre part, les rectifications manuelles des contours sont soumises à la manière de digitaliser de l'opérateur, ainsi qu'à son interprétation. Ainsi de légères imprécisions peuvent se retrouver sur cette cartographie.

Ce type d'erreur n'est pas rencontré avec la cartographie issue des données satellites puisque c'est le seuillage des bandes proche infrarouge et moyen infrarouge qui donnent de manière certaine les éléments de type glacier. Cependant, à cause d'une résolution beaucoup plus importante (28.5 mètres), les contours se trouvent pixellisés, et sont de ce fait moins précis.

Finalement, la méthode de cartographie par les orthophotographies est beaucoup plus précise et est donc celle qui est adoptée pour cartographier les glaciers qui sont intégrés dans la cartographie d'occupation du sol Corine Land Cover 2006.

La méthode de cartographie par les images satellites est toutefois beaucoup plus rapide (la réalisation des cartes, depuis le traitement des données brute jusqu'à la visualisation du résultat de l'application prend cinq minutes, contre 1 mois environ pour l'autre méthode), et peut suffire pour une cartographie à petite échelle (telle que la France, ou l'Europe).

Intégration de la cartographie des glaciers à la carte d'occupation du sol

Les deux cartes sont d'abord superposées, et combinées pour identifier les entités correspondant à chaque source, et celles qui sont communes aux deux. Les éléments correspondant aux glaciers dans les cartes sont identifiés comme des glaciers et neiges éternelles. Les entités représentant des glaciers et neiges éternelles dans la carte Corine Land Cover originale sont tous convertis en éléments de roches nues, ceci car ils sont tous « inclus » (au moins fortement entourés) dans ce type d'occupation du sol.

²² Spatial Analyst > Multivariés > IsoData : Détermine les caractéristiques d'un regroupement naturel de cellules, puis Spatial Analyst > Multivariés > Classification de vraisemblance maximale : Regroupe les pixels en fonction de leur signature selon la méthode de vraisemblance maximale.

²³ Spatial Analyst > Généralisation > Filtre majoritaire : sur un kernel de 3*3, remplace la valeur de la cellule centrale en fonction des valeurs des 8 voisines, ici, 5 sur 8 doivent être connectées et avoir la même valeur. Spatial Analyst > Généralisation > Expansion et > Contraction : permettent de faire une érosion et une dilatation (voir l'explication dans critère Géologie p25)

C'est à partir du résultat de cette intégration que sont reclassés l'ensemble des types d'occupation du sol, afin de leur attribuer un degré de sensibilité à l'érosion (voir la partie L'occupation du sol et ses changements).

3.2 POUR DETERMINER LE FORÇAGE HYDRO-CLIMATIQUE

Précipitations

La distribution de l'intensité des pluies est un paramètre important à prendre en compte pour l'évaluation du forçage climatique, et a été repris dans tous les modèles hydrologiques liés aux SIG, comme l'USLE (Pahari, *et al.*, 1996, Mati, *et al.*, 2000, Lee, 2004), MMF (Morgan, 2001), ou encore CSEP (Kirkby, Cox, 1995).

Le facteur climatique est très souvent résumé dans les modèles d'érosion à l'intensité des pluies sur un événement. Sur un territoire tel que le bassin versant de l'Arc, ce type de donnée est très peu significatif.

Le Cemagref a à sa disposition des données, fournies par Météo France, de précipitations sous forme de pluie, de neige et un cumul des deux pour chaque jour des années 1971 à 2005 (plus les années 1970 et 2006 incomplètes). Les valeurs de précipitations sont données pour chaque couple de coordonnées, représentant le centre d'une maille de 8 km par 8 km, mais les valeurs en chaque point sont une moyenne sur la maille. Une interpolation des valeurs entre chaque point sera nécessaire afin d'obtenir des valeurs continues sur l'ensemble du bassin. Une autre source de données est la base de données météorologique de F. Gottardi (2009) établie lors de sa thèse par rééchantillonnage des valeurs de la base de données SAFRAN, qui donne les précipitations totales journalières pour les années 1953 à 2005, à une résolution 1 km par 1 km (Voir le Tableau 5).

Dans le cadre de ce stage, il ne sera pas possible de donner des caractéristiques hydrologiques très précises du bassin versant, car leur mise en évidence demanderait un stage en soi. Afin d'appréhender les grands traits climatiques du bassin versant différents calculs seront effectués sur les données disponibles présentées dans la partie 3 (phase 1).

Comparaison des sources de données

	Base de données SAFRAN	Base de données F. Gottardi
Sources / organisme producteur de la donnée	Météo France	F. Gottardi, travail de thèse réalisé à partir des données de la base SAFRAN
Champs présents	Précipitations totales journalières Précipitations de pluies journalières Précipitations de neige journalières	Précipitations totales journalières Températures maximales journalières Températures minimales journalières
Résolutions spatiales	8km	1km
Années disponibles	de 1971 à 2005	de 1953 à 2005

Tableau 5 : Comparaison des données issues des bases de données SAFRAN et F. Gottardi

Le détail des calculs effectués par F. Gottardi pour ré-échantillonner les données de la base SAFRAN à l'échelle du kilomètre est présenté dans sa thèse (Gottardi, 2009). Pour déterminer si les précipitations se font sous forme solide ou liquide, MétéoFrance utilise des abaques, et les données de température. Les niveaux de neige et de pluie ne peuvent être vérifiés car les données ne sont pas disponibles pour cette étude (bien qu'il existe des pluviomètres et des nivomètres à diverses altitudes sur l'ensemble du bassin versant).

L'analyse du forçage hydro-climatique passe par une interprétation des résultats de calculs des cumuls annuels moyens, et des cumuls saisonniers pour une année hydrologique dans la moyenne, et à partir des deux sources de données. Ne disposant pas des abaques utilisés par F. Gottardi dans sa thèse (2009) pour définir si les précipitations se font sous forme solide ou liquide, ce sont les précipitations journalières totales qui seront prises en considération.

Calcul des cumuls de précipitations totales

D'après les deux sources de données disponibles, les cumuls annuels moyennés spatialement sur le bassin ont été calculés pour toutes les années disponibles. Les tableaux résultats de ces calculs sont présentés en annexe 22, et leur représentation graphique en annexe 23.

Pour une année qui se trouve dans la moyenne, et après avoir défini les périodes des saisons, un calcul de cumul par saison, par pixel est réalisé pour les deux sources de données. Le choix de l'année hydrologique s'est porté sur les années 2000 et 2001, puisqu'elles présentent des valeurs de cumuls annuels moyens de 1511 mm et 1467 mm dans la base de données de F. Gottardi, et de 1343 mm et 1509 mm dans la base de données SAFRAN ; pour un cumul moyen interannuel de 1423 mm et 1252 mm.

Les dates de début et fin de saison sont celles qui ont été utilisées dans la thèse de A. Marnézy (1999), c'est-à-dire pour l'été du 01/04/00 au 30/09/00 et pour l'hiver du 01/10/00 au 31/03/01.

Définition de classes

Les valeurs de cumul saisonnier de précipitations totales pour l'hiver 2000 – 2001 s'échelonnent de 337 mm à 2009 mm selon les résultats de calcul à partir de la base de données de F. Gottardi, et de 575 mm à 1530 mm d'après la base de données SAFRAN.

Pour l'été 2000, elles varient de 177 mm à 1413 mm selon la base de données de F. Gottardi et de 418 mm à 920 mm d'après la base de données SAFRAN.

Il est donc possible de réaliser des classes reprenant les mêmes seuils pour l'été et l'hiver et pour les deux sources de données, afin de pouvoir les comparer entre elles.

Les classes définies sont les suivantes : <500 mm, entre 500 mm et 642 mm, 642 mm et 797 mm, 797 mm et 988 mm, 988 mm et 1350 mm, et > 1350 mm.

Les seuils de ces classes sont été définis après la visualisation de l'étendue des valeurs des deux sources de données, et afin qu'aucune de ces classes ne soit trop représentée. Parfois, certaines de ces classes ne sont pas du tout représentées. Ceci sera explicité au moment de l'interprétation.

Interprétation des résultats

Cumuls annuels moyens

Tout d'abord, il est remarquable que les quantités de précipitations qui tombent sur le bassin versant de l'Arc sont très importantes. D'après les données de Météo France, les cumuls annuels de précipitations de la France entière sont de l'ordre de 400 mm pour le bassin parisien, et de 900 mm pour les zones de moyenne montagne. Les cumuls annuels moyennés spatialement sur le bassin issus des deux sources de données ont une moyenne interannuelle et un écart type pratiquement identiques (cumul moyen interannuel de 1423 mm et 1252 mm et écart type interannuel 237 et 273 pour les bases de données de F. Gottardi et SAFRAN respectivement).

Les différences observées viennent tout d'abord de la méthode utilisée par F. Gottardi (2009) pour rééchantillonner la base de données SAFRAN, qui tend à corriger à la hausse les précipitations totales. En effet, l'interpolation des données qu'il a faite à partir de données complémentaires a permis de mettre en évidence les effets orographiques, qui n'étaient pas pris en compte dans la base de données SAFRAN, à cause en partie du manque de données en altitude. D'autre part, l'étendue géographique des données sources est légèrement différente à cause de la résolution spatiale, et les cumuls de certaines cellules situées sur la bordure du bassin versant ont pu être pris en compte pour le calcul dans une seule des sources de données.

L'observation du graphique en annexe 23 permet d'affirmer que la source des différences observées est la première évoquée précédemment. En effet, pour les 35 années de données complètes dans chaque base, la correction à la hausse des valeurs de la base de données de F. Gottardi intervient 32 fois et varie de 25 mm à 325 mm et la baisse seulement 3 fois avec des différences observées variant de 32 mm à 42 mm.

Années	1977	1978	1979	1981	1986	1992	1995	1999
Maxima BD Gottardi	1894	1810	1653	2072	1608	1649	1615	1656
Maxima BD SAFRAN	1592	1486	1479	1832	1398	1508	1512	1605

Tableau 6 : Maxima des cumuls annuels moyens issus des bases de données de F. Gottardi et SAFRAN

L'année 1989 est particulièrement remarquable (Tableau 6) par sa faible valeur de cumul de précipitations, qui atteint à peine 857 mm selon la base de données de F. Gottardi.

Cumuls saisonniers spatialisés de l'année hydrologique 2000 – 2001

Hiver

Les différences observées entre les résultats des calculs depuis les deux sources de données sont relativement faibles. Elles concernent surtout la partie amont du bassin versant de l'Arc. La base de données SAFRAN donne des valeurs beaucoup plus faibles sur les cumuls de précipitation pour les secteurs situés sur le tiers amont du bassin, en particulier sur la rive gauche, à partir du bassin du ruisseau du Nart, se situant à l'aval du Mont Cenis. D'après la base de données SAFRAN, les valeurs des cumuls s'étalent de 575mm à 1530mm, et pour la base de F. Gottardi, de 337 mm à 2008 mm. Les amplitudes sont donc relativement fortes. Les secteurs les plus secs sont les fonds de vallées et les plus arrosés correspondent à la bordure du bassin versant, située en rive gauche de l'Arc, en particulier, le bassin du Glandon, les têtes des bassins de l'Arvan, et celles de l'ensemble des bassins entre le torrent de la Valloirette, et du ruisseau d'Ambin.

Si l'on fait l'hypothèse qu'en hiver l'ensemble des précipitations se fait sous forme de neige, sauf en fond de vallée, où elles sont très faibles, les secteurs où l'enneigement sera maximal (énoncés précédemment) correspondront au moment de la fonte, aux secteurs qui contribuent le plus à l'érosion.

Eté

D'après la base de données SAFRAN, les valeurs des cumuls s'étalent de 418 mm à 920 mm, et pour la base de F. Gottardi, de 177 mm à 1412 mm. Les cumuls de précipitations les plus faibles se trouvent en fond de vallée d'après les deux sources de données. La répartition des forts cumuls n'est cependant pas identique dans les deux cas. La base de données de F. Gottardi donne des cumuls plus importants sur le massif de Belledonne, sur la bordure ouest du bassin versant, ainsi que sur le tiers amont, particulièrement en rive gauche de l'Arc. La base de données SAFRAN donne dans l'ensemble des valeurs plus faibles de cumuls sur l'ensemble du bassin, mais des valeurs plus fortes sur le tiers aval, surtout en rive droite de l'Arc, après l'exutoire du Glandon. La différence majeure entre les deux sources de données s'observe au niveau des sous bassins des sources de l'Arc, et plus généralement sur le tiers amont du bassin versant, où la base de données SAFRAN donne des cumuls beaucoup plus faibles, entre 500 et 797 mm, contre 797 à 1412 mm pour les données de F. Gottardi.

Les écarts observés ici sont liés à la résolution des deux sources de données, ainsi qu'à la méthode utilisée par F. Gottardi pour rééchantillonner les données de la base SAFRAN. Malgré cela, la répartition des classes reste similaire, avec les secteurs les plus arrosés sur le massif de Belledonne jusqu'au bassin du Glandon, et sur le tiers amont du bassin versant.

En faisant l'hypothèse qu'en été les précipitations se font majoritairement sous forme de pluies de fortes intensités dues à des orages, les secteurs les plus susceptibles d'être érodés sont donc ceux qui ont été cités précédemment, et leur contribution au flux de sédiments bien qu'événementielle sera très importante.

En hiver et en été les secteurs où les précipitations sont les plus fortes ne sont pas strictement identiques ; le fond de vallée est toujours peu arrosé, mais le massif de Belledonne, et les bassins situés en aval du Mont Cenis récoltent, eux, le plus de précipitations. En été, les précipitations sont également importantes sur la bordure est du bassin versant, alors qu'en hiver, elles dominent sur la rive gauche de la partie médiane de l'Arc.

D'autre part, les processus d'érosion en hiver et en été sont différents d'après les hypothèses énoncées précédemment. En hiver, l'érosion est faible puisque les précipitations tombent sous forme de neige, mais les quantités de neige importantes qui tombent sur les versants s'accumulent pour produire au printemps de l'eau de fonte, responsable d'une érosion massive presque continue sur la période de fonte (avec de petites variations journalières, dues aux températures). En été, l'érosion est liée à des événements de forte intensité tels que des orages, où les processus liés à la pluie et au ruissellement jouent un rôle majeur. L'érosion dans ce cas n'est pas continue mais consécutive à ces événements.

Etant données ces deux manifestations de l'érosion très différentes, l'analyse spatiale réalisée doit se faire de façon saisonnière et globale, car de simples observations sur une année hydrologique ne suffisent pas à tirer des conclusions sur le comportement du bassin versant à l'érosion en fonction du climat.

Généralisation des conclusions, synthèse bibliographique

Selon les totaux annuels, A. Marnézy (1999) découpe le bassin en trois secteurs (voir la partie 7 de la Présentation) qui semblent correspondre aux limites qui ont pu être globalement repérées grâce à l'analyse de cumuls saisonniers :

- Une partie aval, « la basse Maurienne » qui s'arrête au bassin du Glandon, où les précipitations sont les plus importantes en été comme en hiver.
- Une partie médiane, « la moyenne Maurienne » où les précipitations sont plus faibles. L'année hydrologique étudiée a montré que les précipitations y sont plus faibles en été qu'en hiver, ainsi la limite supérieure de cette zone peut varier selon la saison afin que les cumuls soient homogènes.
- Enfin, la partie amont de la vallée, plus arrosée que la moyenne Maurienne, mais moins que la basse Maurienne, où les précipitations sont légèrement plus importantes en hiver qu'en été.

L'interprétation donnée à cette répartition est que « [l]a chaîne des massifs cristallins (Belledonne, Grand Arc-Lauzière), élevée et de direction méridienne, bien exposée aux flux d'Ouest, est directement soumise aux effets des perturbations d'origine océanique ; tandis que l'effet d'abri se fait fortement sentir en moyenne et haute Maurienne. [...] Lorsque l'on se rapproche de la crête frontalière orientale, l'influence de la « Lombarde », qui apporte les pluies padanes sur la haute Maurienne, se fait progressivement ressentir ; c'est elle qui est à l'origine des pluies de forte intensité sur la ligne de faîte. »

Les secteurs les plus arrosés repérés pour l'année hydrologique étudiée, c'est-à-dire à l'aval de Saint-Jean de Maurienne et au Mont-Cenis, le sont également dans la thèse de A. Marnézy (1999).

Concernant la répartition des précipitations au long de l'année hydrologique, Marnézy dit que « [l]es moyennes mensuelles montrent une relative régularité des précipitations au long des mois. Les saisons sont ainsi dans l'ensemble peu différenciées [...]. [Les régimes océaniques] apportent de fortes et fréquentes précipitations dans l'ouest du bassin versant, sur les massifs cristallins externes, la basse Maurienne comme la basse Tarentaise. L'obstacle des Préalpes et de l'axe cristallin provoque par effet orographique une forte augmentation pluviométrique « au vent » des reliefs. Tandis que d'une manière générale, le secteur intra-alpin, en situation « sous le vent », bénéficie d'un effet d'abri efficace [...] » (1999).

« La Lombarde désigne les vents de sud-est qui affectent la haute Maurienne par les échancures de la crête frontalière. [...] [E]lle est surtout remarquable quand elle apporte des précipitations très abondantes sur la haute Maurienne, pouvant engendrer des crues exceptionnelles sur l'Arc et ses affluents de rive gauche. [...] L'intensité des précipitations de Lombarde est supérieure à celle de toutes les autres situations météorologiques. Son influence décroît très vite vers l'ouest et le nord-ouest. [...] Certaines fortes précipitations peuvent aussi avoir pour origine des situations orageuses, fréquentes en été et au début de l'automne. » (Marnézy, 1999)

Les observations faites par A. Marnézy sur la répartition des précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles, correspondent à celles faites pour l'année hydrologique étudiée. Il est alors possible de définir des secteurs où les caractéristiques climatiques sont homogènes. Le découpage est réalisé en seillant les valeurs de précipitations saisonnières, et reprend celui établi par A. Marnézy dans sa thèse selon les totaux de précipitations annuelles :

- Un secteur aval qui va de Sainte Marie de Cuines, à l'amont du bassin du Glandon, jusqu'à l'exutoire, où les précipitations sont très importantes,
- Un secteur médian, qui va d'Avrieux (le point le plus sec du bassin versant (Marnézy, 1999)) à Sainte Marie de Cuines, à l'abri des précipitations venant d'un flux sud-ouest nord-est,
- Un secteur amont, des sources de l'Arc à Avrieux, où les précipitations se font surtout sous forme de neige, et qui subit l'influence de la Lombarde apportant de très fortes précipitations par un flux sud-est.

Ce découpage en trois secteurs est réalisé en agglomérant les sous bassins directement contributeurs à l'Arc (définis dans la partie 1.2 de la phase 3), et est présenté en annexe 24.

Il sera utilisé pour nuancer l'étude de la sensibilité à l'érosion du bassin versant.

Présence de glaciers et de névés

« Etant donné la part des fortes altitudes dans le bassin versant de l'Arc, la neige est un paramètre climatique clef de l'hydrosystème. Rétention hivernale et fusion printanière rythment le régime hydrologique. » (Marnézy, 1999).

Les fortes quantités de neige qui tombent tout au long de l'année sur le bassin versant de l'Arc libèrent au printemps l'eau de fonte, apport majeur des torrents affluents de l'Arc. La fonte est rapide en altitude et commence autour du mois de février pour les secteurs situés au-dessous de 1000 m, et mars pour les secteurs autour de 2000 m. Elle se généralise sur tous les versants et à toute altitude à partir d'avril. (Marnézy, 1999).

La localisation des sites de fontes, donc les secteurs enneigés ou englacés en hiver, permet de prédire quels sont les secteurs qui subiront l'érosion due au ruissellement de l'eau de fonte.

Pour ce faire la cartographie des glaciers réalisée permet de localiser les sites de fontes liés à ceux-ci. La localisation des secteurs enneigés une grande partie de l'année, correspondant à des névés, est réalisée grâce aux images satellites Landsat (été), par la multiplication des bandes vertes et rouges (Paul, 2003) donnant une plus grande luminosité aux secteurs enneigés, qu'il est possible de seuiller pour les cartographier et par la division de la bande bleue par verte, pour localiser les secteurs enneigés et ombragés.

Les talwegs, dans lesquels de la neige a été mise en évidence, et les secteurs de glaciers seront classés comme des secteurs à forte sensibilité à l'érosion. Les sous bassins élémentaires contenant des zones enneigées ou englacées sont sélectionnés, et représentent les secteurs où la fonte est importante. La localisation de ceux-ci est présentée en annexe 24. Elle permettra, comme la classification des précipitations, de préciser le comportement à l'érosion des versants à l'échelle de la saison. Ceci sera utile pour nuancer les résultats de la carte de sensibilité à l'érosion.

4 COMPARAISON DE LA REPARTITION DES CLASSES DE SENSIBILITE POUR LES DIFFERENTS CRITERES

4.1 SENSIBILITE A L'EROSION

Lorsque l'on combine les classes représentant les secteurs les plus sensibles de chaque critère (voir en annexe 25), pratiquement l'ensemble du bassin versant est représenté, hormis la rive gauche de l'Arc en aval de sa confluence avec le Glandon, et les secteurs proches des brins de rivière de certains sous bassins. Cependant, il n'existe pas sur le bassin un point où la sensibilité de l'ensemble de ces critères soit maximale.

En chaque point du bassin versant, on peut calculer le nombre de critères très favorables à l'érosion qui se superposent, et savoir ce qu'ils représentent. Si l'on fait l'hypothèse que lorsqu'au moins deux critères très favorables se superposent, la sensibilité à l'érosion est accrue, on s'aperçoit que cela représente 35% du bassin versant. Ce nombre inclut les 27% liés à la superposition de 2 critères, et les 8% pour 3 critères. Il est donc très rare sur ce bassin que 4 classes très favorables ou plus issues des critères se superposent.

En considérant que même lorsqu'un seul critère est présent la sensibilité à l'érosion est importante, on couvre alors 84 % du bassin.

Sur la majorité des secteurs couverts par 3 critères, ceux-ci correspondent à 96% à la superposition des pentes, occupation du sol et géologie très favorables, et 3% à l'occupation du sol, géologie et formations superficielles.

Pour les secteurs couverts par 2 critères, 47% des surfaces représentent la superposition des critères de pentes et géologie très favorables, 32 % celle de l'occupation du sol et de la géologie et 18% celle de l'occupation du sol et de la pente.

Les critères les plus favorables les plus souvent représentés sont la géologie, la pente et l'occupation du sol, seuls ou superposés avec d'autres. Ceci est cohérent avec le fait que les classes de sensibilités très fortes de ces critères sont les plus représentées, par rapport aux versants concaves, aux changements d'occupation du sol et enfin aux formations superficielles.

Les secteurs où se superposent les classes de sensibilités très fortes de 2 critères ou plus sont en majorité situés sur les 2/3 amont du bassin versant. Au niveau des sources de l'Arc, et à l'amont du bassin, ils sont situés sur les contours des sous bassins des affluents de l'Arc. Sur la partie médiane de l'Arc, certains sous bassins ne sont presque pas superposés à ces critères, tels que ceux des ruisseaux de Saint-Benoît, de Povaret, et de Saint-Bernard sur la rive droite.

Vers l'aval, sur la partie la plus étroite du bassin de l'Arc, la concentration de ces critères est très importante. Le secteur juste à l'aval, et en amont de la confluence de l'Arvan, ne montre de nouveau presque plus de superposition. En deçà, les têtes des sous bassins montrent encore la juxtaposition de deux critères favorables, mais elle tend à diminuer en descendant vers l'Isère. A l'aval des confluences du Bugeon et du Glandon, elle est pratiquement inexistante.

Pour chaque critère, les classes les moins favorables à l'érosion sont situées de part et d'autre du lit mineur de l'Arc, ainsi que le long des brins de réseau hydrographique affluents de l'Arc, où se superposent 2 à 4 critères. L'érosion dans les chenaux principaux est cependant importante. Pratiquement l'ensemble du tiers aval du bassin versant est aussi représenté comme peu sensible à l'érosion. Quelques secteurs en altitude qui correspondent à des forêts cumulent 1 à 2 critères. Dans l'ensemble les classes les moins favorables à l'érosion pour chaque critère se situent à proximité du réseau hydrographique.

4.2 FORÇAGE HYDRO-CLIMATIQUE

Comme cela a déjà été dit précédemment, le bassin versant est segmenté en 3 parties ayant des caractéristiques hydroclimatiques distinctes. C'est sur la partie amont que se trouve la majorité des secteurs enneigés qui fournissent l'eau de fonte au printemps, avec une couverture enneigée de 206 km², et 126 km² pour la zone médiane, alors que dans la zone aval, les zones enneigées ne représentent que 40 km². Les caractéristiques hydroclimatiques de chaque zone ont déjà été détaillées dans la partie Précipitations.

5 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

Plusieurs tests sont réalisés, avec des pondérations différentes pour chaque critère. Chaque test fait prédominer la sensibilité liée à un critère dominant (repéré d'après l'analyse de leur répartition).

5.1 TEST 1 : DOMINANCE DU CRITERE TOPOGRAPHIE

	Poids des critères
Topographie	63%
Géologie	11%
Occupation du sol et ses changements	26%

Tableau 7 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, en faisant dominer le critère topographie

5.2 TEST 2 : DOMINANCE DU CRITERE GEOLOGIE

	Poids des critères
Topographie	19%
Géologie	68%
Occupation du sol et ses changements	13%

Tableau 8 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, en faisant dominer le critère géologie

5.3 TEST 3 : DOMINANCE DU CRITERE OCCUPATION DU SOL

	Poids des critères
Topographie	9%
Géologie	35%
Occupation du sol et ses changements	56%

Tableau 9 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, en faisant dominer le critère occupation du sol

Une fois ces tests réalisés les résultats ont été comparés avec la densité de drainage. Il apparaît (voir la partie 7.1 de la phase 3) que la meilleure combinaison est celle qui fait prédominer le critère géologie, mais les secteurs où l'occupation du sol est favorable ne sont pas suffisamment représentés. Donc, un dernier test est réalisé, pour faire dominer les critères géologie puis occupation du sol.

5.4 TEST 4 : DOMINANCE DU CRITERE GEOLOGIE PUIS OCCUPATION DU SOL

	Poids des critères
Topographie	10%
Géologie	67%
Occupation du sol et ses changements	23%

Tableau 10 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, en faisant dominer le critère géologie puis occupation du sol

Pour chaque test, les poids des sous critères ont été calculés de la même manière que ceux des critères, par les jugements de dominance. Ces différents poids sont représentés pour chaque test, sous formes d'arbre de pondération, en annexe 26 pour les tests 1 à 4. Les cartographies résultant de ces tests sont présentées en annexes 27 à 30.

6 RESULTATS

6.1 QUELS SONT LES SECTEURS SENSIBLES A L'EROSION D'APRES CES TESTS ?

A chaque test réalisé, un critère prédomine sur les autres. Les valeurs les plus fortes de chaque résultat correspondent à la superposition des classes de sensibilité la plus forte.

Test 1 : Dominance du critère topographie (annexe 27)

Les secteurs les plus sensibles ne sont pas très localisés, mais sont présents sur tout le bassin versant, sur les talwegs à fortes pentes. Seuls quelques secteurs présentent une concentration de pixels aux valeurs importantes :

- sur l'aval du bassin de l'Arc, l'amont des bassins situés en rive droite (du ruisseau du Dréron, au ruisseau de Basmont), l'amont des bassins situés en rive gauche (du Glandon, au ruisseau du Goujon)
- Sur la partie médiane de l'Arc, une partie des bassins du ruisseau d'Hermillion, et du ruisseau de Saint-Julien (rive gauche), le bassin du torrent Le Bonnant, l'amont du bassin du torrent du Rieu Sec, l'amont du torrent de l'Arvan, au niveau du torrent l'Arvette
- Sur la partie amont du bassin de l'Arc, le bassin du ruisseau d'Ambin la rive droite du bassin du torrent de la Lesse, les bassins des torrents du Ribon et d'Avérole.

Le critère dominant étant la topographie, les fonds de talweg à faible pente sont considérés comme faiblement sensibles, alors que les processus d'érosion (dépôt / reprise) y sont importants.

Test 2 : Dominance du critère géologie (annexe 28)

Les secteurs les plus sensibles sont bien individualisés et correspondent :

- Au talweg de l'Arc
- A l'aval du bassin de l'Arc, les bassins qui correspondent :
 - Au ruisseau Nant Richard

- Au Bugeon, et au Merderel
- Au Glandon (à l'amont, uniquement la rive droite)
- Dans la partie médiane du bassin de l'Arc, à pratiquement l'ensemble des bassins des torrents et ruisseaux, à l'exception des ruisseaux de Povaret et Noir, ainsi que des secteurs, locaux, dans des bandes transversales, au niveau de la Valloirette, et de l'Arvan
- A l'amont du bassin de l'Arc, pratiquement l'ensemble des bassins des torrents et ruisseaux, exception faite :
 - Du ruisseau de Saint-Benoît
 - Du ruisseau d'Ambin et de ses affluents
 - Du Doron de Termignon et de ses affluents (Le torrent de La Leisse l'est un peu plus)
 - Du talweg du ruisseau du Ribon
 - Des quelques ruisseaux vers les sources de l'Arc
 - Enfin d'un tronçon de l'Arc entre le ruisseau de la Grande Combe, et celui de l'Arseis,

Qui correspondent à des secteurs peu sensibles.

Test 3 : Dominance du critère occupation du sol (annexe 29)

Les secteurs les plus sensibles sont là encore bien individualisés et correspondent pratiquement à ceux mis en évidence lors du test précédent, aux différences près suivantes :

- A l'aval du bassin de l'Arc, le talweg principal est moins sensible, mais les versants situés de part et d'autre le sont comparativement plus. Les têtes des bassins situés en rive droite, du ruisseau de la Perrière au ruisseau des Moulins, et en rive gauche, du torrent de la Vallette au ruisseau du Goujon, ainsi que celles des affluents du Glandon et du Bugeon sont plus sensibles.
- Sur la partie médiane du bassin de l'Arc, les secteurs les plus sensibles sont les mêmes, mais localement, certaines parties de sous bassins le sont encore plus : l'amont de certains bassins d'affluents de l'Arvan, tels que le Rieu Froid, l'Arvette et ses affluents amont, le ruisseau d'Hermillon, le ravin Saint-Julien, l'amont de tous les bassins des affluents de la Valloirette, et dans la partie supérieure de la partie médiane, l'amont de l'ensemble des sous bassins des cours d'eau situés entre la Neuvache et le ruisseau de Saint-Joseph.
- A l'amont, les secteurs sensibles sont encore plus nombreux. Ils correspondent à l'ensemble des parties amont des sous bassins des affluents de l'Arc, avec une sensibilité qui décroît en descendant dans les talwegs principaux.

Test 4 : Dominance des critères géologie puis occupation du sol (annexe 30)

Les secteurs les plus sensibles à l'érosion rassemblent ceux qui l'étaient lors des tests 2 et 3, et sont les suivants :

- Les berges de l'Arc, sauf localement dans les parties médianes et amont
- Dans la partie aval :
 - Vers l'exutoire de l'arc, la bande de dolomies, cargneules et gypses du Trias qui recoupe transversalement le bassin
 - Les parties amont et 2/3 aval du bassin du Bugeon
 - Le bassin du Glandon (rive droite uniquement sauf sur les quarts amont et aval)
- Dans la partie médiane :
 - Une bonne partie du bassin de l'Arvan
 - Le bassin de la Valloirette excepté l'amont et le fond du talweg
 - Pratiquement l'ensemble des bassins des cours d'eau entre la Valloirette et le ruisseau du Charmaix, à l'exception de l'amont du ruisseau de la Grollaz, de la moitié aval et du quart amont de la Neuvache, d'une partie à l'amont du lac de Bissorte, de l'amont du torrent

Bonrieu et de son affluent le ruisseau du Bouchet, de l'amont du ruisseau du Charmaix et de son affluent, le ruisseau du Fréjus.

- Les bassins des ruisseaux de Saint-Joseph et de Saint-Antoine
- Dans la partie amont : Pratiquement l'ensemble du secteur amont à l'exception des bassins des ruisseaux d'Ambin, de Saint-Benoît, du fond de talweg du Doron de Termignon et de son affluent le torrent de la Leisse, du fond de talweg de l'Arc entre les sous bassins des ruisseaux de la Grande Combe et de la Refouderaz, du fond de talweg du torrent du Ribon, des bassins des ruisseaux d'entre deux Ris, du Rébruyant et des Follières, d'une partie du bassin du ruisseau du Vallon, et enfin sur les versants de part et d'autre de tous les cours d'eau amont de l'Arc.

6.2 EVALUATION DE LA DENSITE DE DRAINAGE

La densité de drainage correspond à la longueur totale des segments de cours d'eau d'un bassin hydrographique, divisée par la surface du bassin. C'est un paramètre morphométrique qui renseigne sur la capacité de concentration, de stockage et d'évacuation des flux sédimentaires sur le bassin versant. Elle varie généralement en fonction de la nature de la roche et des dépôts superficiels mais également de la pente. Plus elle est élevée, plus la capacité des bassins versants à évacuer les sédiments fins est grande (Latulippe, 1995). Une grande sensibilité à l'érosion corrélée avec une forte densité de drainage met en évidence des secteurs qui seront très fortement contributeurs au flux de sédiment.

Les densités de drainage ont été calculées pour les sous bassins directs et les sous bassins élémentaires, en tenant compte dans un premier temps des brins de réseau hydrographique permanents, puis de l'ensemble du réseau hydrographique.

La densité de drainage globale en considérant l'ensemble des cours d'eau épisodiques est d'environ 3km/km², et seulement de 0.92km/km² avec uniquement les brins permanents. Celle qui a été calculée par Marnézy (1999) dans sa thèse est de 0.84km/km², en considérant l'ensemble du réseau hydrographique présent sur une carte topographique au 1/100 000. L'écart observé est lié à la précision de la cartographie à partir de laquelle a été digitalisé le réseau hydrographique (1/25 000) de l'IGN, mais aussi à la présence de nombreux brins de réseau ajoutés à celui-ci, pendant la correction géométrique.

Les densités de drainage des sous bassins des affluents directs permettent de visualiser les secteurs qui sont le plus drainés. Au dessus de 3 km/km², la densité de drainage sera considérée comme forte (puisque supérieure à la moyenne qui prend en compte l'ensemble du réseau).

Si l'on ne tient pas compte des sous bassins de très petite taille le long de l'Arc, et qui correspondent aux surfaces drainées entre deux affluents, les sous bassins dont les densités de drainage sont très élevées sont :

- Dans la partie aval du bassin de l'Arc, en majorité situés en rive droite. Les sous bassins ayant les surfaces les plus importantes correspondent au Bugeon (rive droite) et au Glandon (rive gauche).
- Dans la partie médiane, situés vers l'aval, de la Neuvache au ruisseau du Nantuet (hormis le sous bassin qui correspond au ruisseau des Moulins), et quelques uns vers l'amont. Les sous bassins ayant les surfaces et les densités de drainage les plus importantes correspondent à l'Arvan et à la Valloirette.
- Dans la partie amont, ce sont les sous bassins de petites tailles. Les bassins du torrent d'Avérole, du Doron de Termignon, du ruisseau de Saint-Benoît et du ruisseau d'Ambin ont des densités plus faibles.

Comme certains sous bassins directs ont des tailles très importantes (comme l'Arvan, le Glandon, le Bugeon, le Doron de Termignon, ou encore les torrents d'Avérole et du Ribon) ils ne présentent pas obligatoirement les mêmes caractéristiques sur l'ensemble de leur surface, et en particulier leur sensibilité à l'érosion et le forçage hydroclimatique peuvent varier. Les densités de drainage calculées pour les sous bassins élémentaires, permettent de localiser plus précisément les bassins fortement drainés, où le flux de sédiment est important (voir annexe 31). En considérant l'ensemble du réseau hydrographique pour le calcul des densités de drainage des sous bassins élémentaires, quatre secteurs concentrant des bassins à forte densité peuvent être mis en évidence.

- A l'aval du bassin de l'Arc, le bassin du Glandon et quelques sous bassins de la rive droite présentent des valeurs de densité allant jusqu'à 15km/km², et 10km/km² respectivement.
- Dans la partie médiane les plus fortes densités s'observent sur le bassin de l'Arvan (et sur l'autre rive, au niveau du ravin Saint-Julien) au niveau de l'Arvette, du ruisseau de Pradin, du torrent du Merderel, et aussi au niveau de quelques autres petits ruisseaux affluents de l'Arvan, avec des valeurs pouvant aller jusqu'à 15km/km².
- Pratiquement la moitié amont de la partie supérieure du bassin de l'Arc concentre des sous bassins dont les densités sont importantes (jusqu'à 13 environ). Pour les bassins de taille importante (Doron de Termignon) qui présentaient des densités plus faibles en considérant les bassins des affluents directs, certains sous bassins élémentaires sont mis en évidence par le calcul des fortes densités de drainage. Ceci permettra d'affiner la comparaison des tests réalisés précédemment avec le calcul de la densité de drainage.

Les critères utilisés pour l'analyse spatiale de la sensibilité à l'érosion ne sont pas totalement indépendants les uns des autres. Il existe des corrélations entre l'occupation du sol, la topographie et la géologie. Par exemple, les secteurs de pente forte correspondent fréquemment à des zones de sols nus. Bien que le poids du critère topographie soit plus faible que ceux de la géologie et de l'occupation du sol dans le dernier croisement, celui-ci joue aussi un rôle dans l'évaluation de la sensibilité à l'érosion.

7 DISCUSSION : EVALUATION DE LA QUALITE DES RESULTATS OBTENUS

Afin de vérifier la cohérence du résultat de l'analyse spatiale, plusieurs indicateurs de l'érosion ont été choisis. Il s'agit de la densité de drainage et la localisation des ravines. Les cartes d'érodabilités réalisées par Latulippe (1995) et Marnézy (1999) seront aussi comparées aux résultats de l'analyse de la sensibilité.

Ces indicateurs ne sont pas des équivalents parfaits de la sensibilité à l'érosion, telle que définie dans ce stage (voir partie Méthodologie développée pour l'étude de la sensibilité à l'érosion du bassin de l'Arc en tenant compte du forçage hydro-climatique). La densité de drainage, marqueur de la morphologie du bassin versant peut être vue comme la résultante de la sensibilité et du forçage climatique. Il en est de même pour les ravines, lieux d'érosion avérés. Les analyses d'érodabilité de Latulippe (1995) et Marnézy (1999) ne s'appuient pas tout à fait sur les mêmes critères. Par exemple, la densité de drainage est intégrée comme critère d'analyse dans les travaux réalisés par Latulippe (1995) alors qu'elle est ici un critère de vérification. Ces indicateurs permettent malgré tout d'appréhender la cohérence du croisement réalisé.

7.1 VERIFICATION DE LA COHERENCE DU RESULTAT DE L'ANALYSE SPATIALE AVEC LA DENSITE DE DRAINAGE

La donnée utilisée pour la comparaison des résultats des tests avec la densité de drainage est le calcul de la densité totale de drainage des sous bassins élémentaires (voir annexe 31), permettant de comparer les résultats avec une résolution assez fine (la surface moyenne d'un sous bassin élémentaire est de 1.4 km²).

D'après le test 1 (dominance du critère topographie), les secteurs situés en rive droite de l'Arc sur sa partie aval, ainsi que les versants très pentus du bassin du Glandon sont très sensibles à l'érosion. Ceci est corrélé avec de fortes valeurs de densité de drainage. Sur la partie médiane en revanche, le test réalisé donne des valeurs de sensibilité plus importante vers l'amont, globalement dans la partie supérieure de chaque sous-bassin, alors que leurs densités de drainage sont relativement moyennes (entre 0 et 3km/km²). Les bassins dont la forte densité de drainage a été remarquée plus haut (l'Arvette, le ravin Saint-Julien) sont cependant bien mis en évidence par le test comme étant des secteurs très sensibles. Enfin à l'amont, la correspondance entre forte sensibilité à l'érosion et forte densité de drainage est vérifiée. Seuls quelques secteurs présentent des différences, comme par exemple, au niveau des affluents à l'amont du ruisseau d'Ambin, où la sensibilité est jugée grande alors que la densité de drainage est plutôt modérée. Il en est de même au niveau de certains affluents du Doron de Termignon ou du torrent d'Avérole.

Le test 2 qui fait prédominer le critère géologie semble être mieux corrélé dans l'ensemble avec la densité de drainage. En effet, les secteurs les plus sensibles correspondent en priorité aux secteurs dont la géologie est la plus

favorable. Celle-ci est organisée en bandes transversales (sud-ouest nord-est) qui recoupent le bassin versant, au niveau de sous bassins dont la densité de drainage est forte. Certains secteurs où la densité est forte ne sont pourtant pas représentés comme étant très sensibles à l'érosion. Dans la partie aval, cela concerne un certain nombre de sous bassins situés en rive droite de l'Arc. On observe le phénomène inverse dans la partie médiane : les secteurs situés en amont de la confluence avec la Neuvache sont ici considérés comme très sensibles, alors que la densité des sous bassins est plutôt faible (comparativement avec celle des sous bassins situés plus en aval). Dans la partie amont, les secteurs sensibles coïncident avec les sous bassins dont la densité de drainage est forte, à l'exception de certains d'entre eux, affluents du Doron de Termignon.

Le test 3 tend à donner une sensibilité plus grande aux secteurs situés en bordure du bassin de l'Arc, soit à l'amont des sous bassins élémentaires des affluents des cours d'eau principaux. Dans la partie aval, on peut faire globalement les mêmes observations que lors du test précédent : les sous bassins situés en rive droite de l'Arc ne correspondent pas à des secteurs fortement sensibles. Cependant, ici, la sensibilité en bordure est plus importante. Dans la partie médiane, là encore on peut faire les mêmes remarques que pour le test 2 : vers l'aval la sensibilité des bassins situés en dessous de la confluence avec la Neuvache est très importante et coïncide avec une forte densité de drainage ; et vers l'amont la sensibilité des sous bassins est très importante comparativement à leur densité de drainage, bien que les secteurs sensibles soient moins étendus et surtout situés plus haut que ceux définis par le test 2. Ils correspondent à des sous bassins dont la densité n'est pas maximale mais encore relativement forte. Enfin pour la partie amont, la correspondance est encore bonne, voire meilleure pour les sous bassins du Doron de Termignon. Cependant, les secteurs situés à l'extrémité est du bassin versant ont une sensibilité très importante par rapport à leur densité de drainage. Globalement, les secteurs où sont localisés les glaciers étant considérés comme très sensibles à l'érosion ont des densités de drainage plutôt faibles, ceci en particulier à cause du manque de connaissance des circulations des eaux sous glaciaires. Les densités de drainage devraient être ici beaucoup plus importantes, en particulier pendant les périodes de fonte.

Ces différents tests ont permis de mettre en évidence la dominance des critères géologie et occupation du sol dans l'explication de la sensibilité à l'érosion du bassin versant. Un dernier test a été réalisé, et fait dominer le critère géologie puis le critère occupation du sol.

Ce test (4) permet la meilleure superposition des secteurs sensibles et des fortes densités de drainage, exception faite de quelques sous bassins élémentaires dans la partie aval de la rive droite de l'Arc (les plus proches de l'Arc), et dans la partie médiane à l'amont de la confluence de la Neuvache et de l'Arc (où la sensibilité des sous bassins est très importante en comparaison de leur densité de drainage). Vers l'aval la sensibilité des bassins situés en dessous de la confluence avec la Neuvache coïncide avec une forte densité de drainage comme pour les tests 2 et 3.

La densité de drainage, qui peut être vue comme un indicateur de l'érosion des bassins versants, résulte de la sensibilité à l'érosion des sols mais aussi des effets climatiques. Les différences observées entre la localisation des secteurs les plus sensibles à l'érosion, et les densités de drainage les plus fortes peuvent donc être liées au forçage hydro-climatique. En effet, si le forçage est faible mais la sensibilité forte, l'érosion sera plus faible que si le forçage est important ; et inversement si le forçage est fort et la sensibilité faible, l'érosion sera plus forte que si le forçage est faible.

7.2 VERIFICATION DE LA COHERENCE DU RESULTAT DE L'ANALYSE SPATIALE AVEC LA LOCALISATION DES RAVINES ET RIGOLES

Les ravines ou rigoles sont des indicateurs de l'érosion. Elles sont caractérisées par l'action de filets d'eau creusant des rigoles parallèles, ou par des ruisseaux, formes d'érosion linéaire, pouvant entraîner une érosion régressive lorsque l'approfondissement remonte du bas vers le haut de la pente (Foucalt, Raoult, 2005). Leur formation peut résulter d'une forte sensibilité à l'érosion et / ou d'un forçage hydro-climatique intense. Leur localisation sur le bassin versant permet là aussi de vérifier la cohérence de l'analyse spatiale réalisée, bien que cette dernière ne prenne pas en compte le forçage hydro-climatique.

Trois méthodes ont été développées pour obtenir la localisation de ces ravines (ou rigoles).

La première est basée sur le modèle numérique de terrain : les ravines sont des objets géographiques dont la pente est très forte. Par un seuillage des pentes précis, il est possible d'isoler les secteurs qui subissent l'érosion en ravines. Après plusieurs essais, le seuil inférieur fixé est de 28.72°. Le critère de pente a dans le croisement réalisé un poids relativement faible, mais ceci ne laisse présager en rien de son rôle dans les processus physiques d'érosion.

La seconde méthode s'appuie sur la détection des sols nus sur une image composite constituée des bandes spectrales du vert, rouge et proche infrarouge. Le calcul de l'indice de végétation NDVI puis le seuillage à 0.1 de la valeur maximale permettent d'isoler les secteurs érodés, où il n'y a pas de végétation. L'indice est calculé par²⁴:

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Enfin la dernière méthode est basée sur la classification automatique des pixels des orthophotographies. Etant donné que les ravines sont des secteurs où la pente est forte et où les roches sont à nu, elles ressortent en sombre sur les images (effet d'ombre), la majeure partie du temps elles ont les mêmes caractéristiques (les mêmes valeurs RVB) et sont classées dans une même classe. Seuls quelques exemples ont pu être réalisés avec cette méthode compte tenu du temps d'exécution très long (semblable à celui de la méthode de cartographie des glaciers par les orthophotographies).

Les résultats de ces trois méthodes sont présents en annexes 32 et 33.

La première méthode donne de bons résultats (après comparaison avec les orthophotographies) sur l'ensemble du bassin. Les zones de ravines correspondent bien à celles mises en évidence par la 3^e méthode (la plus précise). La détection par les images satellites donne l'ensemble des secteurs à nu, et non uniquement les ravines. Elles sont aussi de moins bonne précision. Etant donné que les résultats obtenus par les orthophotographies et le MNT concordent, et que l'ensemble des ravines n'a pas pu être mis en évidence par la détection sur les orthophotographies (temps nécessaire important), la cartographie des ravines considérée pour vérifier la cohérence de la sensibilité à l'érosion mise en évidence par le test 4 sera celle réalisée d'après le MNT.

Dans l'ensemble, les zones d'érosion, matérialisées par les ravines, coïncident bien avec les secteurs les plus sensibles à l'érosion mis en évidence par l'analyse spatiale. Sur pratiquement l'ensemble du bassin, le fond du talweg de l'Arc est très sensible à l'érosion, mais ne correspond pas à une ravine : il représente le lit de l'Arc dans lequel les processus d'érosion sont différents de ceux des versants. Sur la partie amont du bassin, les secteurs les plus sensibles mis en évidence correspondent bien aux griffes d'érosion ; certains secteurs où la sensibilité est moyenne correspondent aussi à des ravines. Les secteurs des sources de l'Arc mais aussi du torrent de la Leisse, du Doron de Termignon, et du ruisseau d'Ambin et de ses affluents en sont des exemples.

Dans la partie médiane, les différences sont légèrement plus marquées : certains secteurs avec une sensibilité modérée présentent des griffes d'érosion, comme les bassins de certains affluents de l'Arvan, mais de manière générale elles sont plutôt localisées sur les secteurs à sensibilité moyenne à forte, suivant la disposition des couches géologiques. A l'amont de la Neuvache, les secteurs à sensibilité forte qui correspondaient à des densités de drainage relativement modérées se superposent bien avec les zones d'érosion. Ceci vient confirmer que le calcul des densités de drainage est faussé par le manque de données sur la localisation des ruisseaux formés à la fonte.

Enfin dans la partie aval du bassin, les ravines semblent plutôt correspondre aux secteurs à sensibilité moyenne. Ceux-ci prédominent sur ceux à sensibilité forte dans cette partie du bassin. La sensibilité moyenne semble plutôt liée dans ce secteur au facteur topographie, ayant un poids plus faible que la géologie et l'occupation du sol. Etant donné que les secteurs à sensibilité moyenne correspondent bien aux ravines, on peut en conclure que dans cette partie aval, le facteur topographie joue un rôle plus important que les autres facteurs pris en compte dans l'analyse spatiale. Ceci est aussi vérifié par les résultats du test 1.

²⁴ NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, PIR : Proche Infrarouge (0.78µm à 1.4µm), R : Rouge (630nm à 780nm)

En conclusion, les résultats de la combinaison du test 4 sont cohérents avec la localisation des ravines. Les différences observées peuvent là encore être dues au forçage hydro-climatique qui varie spatialement sur le bassin versant.

7.3 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE LATULIPPE (1995)

Les degrés d'érodabilité (annexe 34) sont définis par le croisement de critères de sensibilité (géologie, topographie, sols dénudés) et de forçage hydro-climatique (densité de drainage, taux d'englacement, réseau de drainage) par le biais de deux méthodes.

Pour la première méthode de Latulippe (Analyse factorielle des correspondances), la localisation des secteurs où l'érodabilité est forte semble assez correspondre à une forte sensibilité à l'érosion des sous bassins, mais aussi moyenne voire faible localement. L'érodabilité moyenne correspond bien à la sensibilité moyenne, excepté pour l'amont du bassin de l'Arvan. Enfin l'érodabilité faible coïncide avec la sensibilité faible, sauf dans quelques bassins à l'aval de l'Arc, où la sensibilité est parfois moyenne.

La deuxième méthode de Latulippe (Classification ascendante hiérarchique) donne cinq degrés d'érodabilité. Dans l'ensemble, les classes de sensibilité sont plus cohérentes avec les différents degrés d'érodabilité.

Les différences majeures concernent :

- Le Doron de Termignon
- Le ruisseau du Charmaix
- La partie est du bassin de la Valloirette
- La Lescherette et la Frèche (petits ruisseaux en rive gauche de l'Arc entre la partie aval et médiane)

Où les degrés de sensibilité sont plus variés que ceux d'érodabilité.

La deuxième méthode est jugée meilleure dans le rapport de Latulippe, compte tenu des vérifications qu'il a pu faire. Elle correspond mieux aussi avec le résultat du test 4. Les différences observées peuvent provenir de la prise en compte du forçage hydro-climatique, par le biais de la densité de drainage.

7.4 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE MARNEZY (1999)

Dans l'ensemble, les degrés d'érodabilité définis dans la cartographie pour les sous bassins torrentiels de l'Arc (annexe 34), semblent correspondre aux degrés de sensibilité issus du test 4. L'échelle de travail de ces deux sources de données est différente : dans le croisement réalisé ici la sensibilité à l'érosion est évaluée pour l'ensemble du bassin de l'Arc, avec une résolution de 10 mètres, pouvant donc varier au sein d'un même sous bassin, alors que la cartographie de l'érodabilité de Marnézy est établie pour les sous bassins torrentiels. Ainsi notre cartographie montre plus de détails à l'intérieur des sous bassins.

Certains sous bassins torrentiels ont un degré d'érodabilité faible, alors qu'ils correspondent sur le test 4 à des secteurs moyennement à fortement sensibles. C'est le cas pour le fond de talweg de la partie aval de l'Arc, pour la majorité des sous bassins de la partie médiane, et pour ceux de la partie amont. Il en va de même pour les sous bassins qui ont un degré de sensibilité moyen. D'après le test 4, pratiquement l'ensemble de l'amont du bassin de l'Arc est moyennement à fortement sensible, alors que le degré d'érodabilité des sous bassins torrentiels est moyen d'après Marnézy. De même les sous bassins de l'aval de la partie médiane et de la partie aval de l'Arc ont des sensibilités partagées entre moyenne et forte, avec même localement une sensibilité faible. Enfin, la grande majorité des sous bassins qui ont une érodabilité forte ou très forte correspondent bien dans le test 4 à des secteurs très sensibles à l'érosion, bien que sur les sous bassins de taille importante comme le Glandon, l'Arvan et le Doron de Termignon, le degré de sensibilité varie entre moyen et fort.

Là encore, la hiérarchisation des bassins torrentiels selon leur production de fine prend en compte les effets climatiques notamment par les phénomènes de laves torrentielles mais aussi par la prise en considération

d'événements climatiques intenses. Les différences observées, en particulier sur la partie amont du bassin versant où la sensibilité à l'érosion a été jugée forte d'après le test 4, peuvent être liées à la prise en compte du forçage hydro-climatique. Elles peuvent aussi être expliquées par l'échelle de travail et la méthode d'analyse. Dans l'ensemble, les résultats de Marnézy sont en cohérence avec le résultat de l'analyse.

7.5 PRISE EN COMPTE DU FORÇAGE HYDRO-CLIMATIQUE

Les caractéristiques hydro-climatiques jouent un rôle sur la quantité de sédiments pouvant être arrachée à un bassin, par l'intensité des précipitations, ainsi que par le ruissellement dû à la fonte. Les formes d'érosion seront différentes selon le signal considéré.

D'après les conclusions établies dans la partie Précipitations, les variables climatiques ne s'expriment pas de la même manière sur tout le bassin versant.

Les précipitations totales annuelles semblent les plus importantes sur le secteur aval (de Sainte Marie de Cuines, jusqu'à l'exutoire). Les sous bassins dans lesquels la neige perdure, pouvant permettre au printemps la libération d'eaux de fonte en quantité importante, sont localisés sur les hauteurs, en particulier sur le bassin du Glandon, et de part et d'autre de l'Arc, à partir d'une altitude d'environ 1300 mètres.

Les quelques exemples suivant mettent en relation les indicateurs de l'érosion avec les résultats du test 4, pour illustrer les effets du forçage hydro-climatique.

Sur la partie aval, les versants situés en rive gauche du Glandon montrent une sensibilité à l'érosion faible à moyenne. Les ravines sont pourtant dans ce secteur fortement concentrées, et la densité de drainage relativement forte. Les différences observées peuvent ici s'expliquer par les effets climatiques. En effet, les fortes précipitations d'origine océanique couplées à une fonte importante, font que les processus d'érosion sont très actifs dans ce secteur. Cette constatation peut également être faite en rive droite de l'Arc, sur les surfaces en altitude.

Dans la partie médiane, sur les versants situés à proximité du lit de l'Arvan, dans sa partie médiane, et de son affluent l'Arvette, la sensibilité à l'érosion est moyenne, alors qu'elle est forte sur pratiquement tout le reste du bassin de l'Arvan. On observe une distribution inverse des ravines : elles sont plutôt présentes à proximité du lit de l'Arvan, et également en bordure du sous bassin, et moins ailleurs. Les densités de drainage les plus fortes coïncident avec les secteurs de ravines. Là encore, on peut expliquer les différences par les effets climatiques : le secteur médian de l'Arvan montre un effet d'abri important, où les précipitations sont plus modérées que vers l'aval, mais où le phénomène de fonte est très important, par exemple sur les Aiguilles d'Arve. La production d'eau est alors au printemps très conséquente, pouvant certainement entraîner une érosion dans le cours d'eau.

Autres exemples de la partie médiane, les versants à proximité du lit de l'Arc, présentent une fonte plus faible que sur les secteurs en altitude et les précipitations y sont modérées (en comparaison du secteur aval). La sensibilité à l'érosion est très forte pour la quasi-totalité des sous bassins du fond de la vallée. Pourtant, les densités de drainage sont là les plus faibles du bassin de l'Arc, et la concentration des ravines, moins importante également. Cette différence peut être due en particulier à la fonte moins importante qu'en altitude.

Enfin, dans la partie amont, on observe une sensibilité faible à moyenne pour les bassins du torrent de La Leisse, du ruisseau d'Ambin, et du torrent du Ribon. Dans ces sous bassins se concentrent énormément de ravines et de rigoles, et les densités de drainage y sont particulièrement importantes. Se trouvant en altitude, ces sous bassins subissent une forte fonte depuis les glaciers et les névés, en plus de l'influence du régime de la Lombarde, qui apporte des précipitations intenses. Ceci peut expliquer, malgré une sensibilité modérée, que l'érosion y soit relativement importante. On note également la présence de nombreuses formations susceptibles de témoigner de l'existence d'un pergélisol, où les processus d'érosion périglaciaires sont intenses.

Si une analyse hydrologique était faite sur le bassin versant de l'Arc, et que l'intensité des pluies, la fonte, et les événements intenses étaient pris en compte dans une analyse spatiale telle que celle que j'ai pu réaliser, on pourrait s'attendre (grâce à la vérification avec les indicateurs d'érosion) à ce que l'amont du bassin versant soit fortement

érodé, de par la forte sensibilité à l'érosion (nature des sols, la présence de nombreux glaciers, neiges éternelles, glaciers rocheux et roches nues, les très fortes pentes), mais aussi par l'intensité des précipitations et l'importance de la fonte. L'érosion dans la partie médiane serait légèrement plus faible (en raison d'un forçage modéré), et dans la partie aval, l'érosion serait plus importante, combinant en plus des facteurs de sensibilité favorables, une très forte intensité des précipitations et une fonte modérée.

Les données sur le forçage hydro - climatique créées ici auront servi à présenter les résultats pour chaque zone de mêmes caractéristiques, mais aussi à nuancer le résultat de l'analyse spatiale. Elles ne permettent pas ici, étant donnée leur précision, d'apporter suffisamment d'informations supplémentaires sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de l'Arc, pour être prises en compte comme un véritable critère d'analyse. C'est uniquement à l'issue d'une véritable analyse hydrologique, où les caractéristiques du bassin auraient pu être mises en évidence, que ce critère pourrait être exploité dans une analyse spatiale pour évaluer l'érosion.

8 SENSIBILITE A L'EROSION POUR LA SEGMENTATION EN SOUS BASSINS CONTRIBUTEURS

Afin de pouvoir définir des sous bassins de l'Arc qui représentent le fonctionnement hydro-sédimentaire, c'est-à-dire dont les caractéristiques de sensibilité à l'érosion sont homogènes, il est nécessaire d'avoir peu de classes de sensibilités différentes, ceci pour que les unités homogènes aient des surfaces suffisantes si une modélisation est appliquée (en particulier pour avoir un résultat dans une échelle exploitable pour la modélisation hydro sédimentaire).

Les valeurs du résultat du croisement du test 4 sont donc reclassées en 3 degrés de sensibilités : faible, moyen, fort, dont les seuils sont définis pour que les observations faites en comparant le résultat à la densité de drainage et aux ravines coïncident au mieux. La classe de sensibilité forte est donc volontairement la plus représentée.

Ce reclassement (annexe 35) va ensuite être superposé à la segmentation en sous bassins afin de définir des unités d'études (voir la partie Le découpage en sous bassins contributeurs de la phase 3).

PHASE 3 : STRUCTURATION DES FLUX

1 LE DECOUPAGE EN SOUS BASSINS CONTRIBUTEURS

Quatre segmentations du bassin versant sont réalisées :

- Sous bassins des affluents directs de l’Arc
- Sous bassins élémentaires (à partir de la BD Carthage corrigée)
- Agglomération avec prise en compte de la connectivité du réseau et des caractéristiques de sensibilité à l’érosion

Ces différents découpages n’ont pas les mêmes objectifs ni les mêmes échelles :

	Objectifs	Echelles de travail
Sous bassins des affluents directs de l’Arc	Repérer les affluents directs et l’importance de leurs sous bassins respectifs par rapport au bassin de l’Arc	Bassin versant de l’Arc
Sous bassins élémentaires	Repérer l’ensemble des sous bassins élémentaires, leur découpage représentant un système d’unités élémentaires servant aux segmentations suivantes	Bassin versant de l’Arc
Agglomération avec prise en compte de la connectivité et de la sensibilité à l’érosion	Repérer les sous bassins de mêmes caractéristiques pour les agglomérer afin de représenter le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l’Arc	Bassin versant de l’Arc, sous bassins élémentaires

Tableau 11: Echelles de travail et objectifs des différentes segmentations du bassin versant de l’Arc

Pour réaliser ces segmentations, les données nécessaires sont tout d’abord le réseau hydrographique, et le modèle numérique de terrain. Celles-ci permettront avec un logiciel adéquat d’obtenir les deux premiers découpages. Le second, croisé avec le résultat de l’analyse spatiale et la connexion du flux sédimentaire au réseau hydrographique permettra d’obtenir la dernière segmentation. Dans ce but, la connectivité devra être étudiée.

1.1 COMPARAISON DE DIFFERENTS LOGICIELS DE SEGMENTATION EN SOUS BASSINS

Afin d’obtenir les deux premiers découpages différents logiciels (SAGA, HydroDEM, ArcView, Taudem) ont été testés afin qu’ils correspondent au mieux avec le réseau hydrographique. Ces logiciels diffèrent par les méthodes de calcul des sous bassins à partir du modèle numérique de terrain. Les algorithmes seront brièvement présentés ici pour justifier le choix final du logiciel.

Dans chacun des logiciels la méthode pour délimiter les sous bassins à partir du MNT reprend les étapes suivantes :

1. Comblement des « puits » ou irrégularités du modèle numérique de terrain

Un puits est une cellule ou un groupe de cellules (voir Figure 7) spatialement connectées dont il n’est pas possible de définir la direction d’écoulement, car les huit pixels qui l’entourent ont des valeurs d’altitude plus élevées.

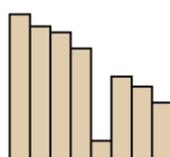


Figure 7: Vue de profil d’un puits (d’après l’aide d’ArcGIS 9.3)

Ces puits sont supprimés du modèle numérique de terrain.

2. Calcul des directions d’écoulement selon les méthodes D4, D8, et Dinf

Selon les logiciels différentes méthodes de calcul de direction d'écoulement sont possibles. A chaque pixel de l'image, les méthodes D4 et D8 n'autorisent que 4 ou 8 directions cardinales d'écoulement. La méthode Dinf seulement présente dans le logiciel Taudem et donne la direction d'écoulement en radians depuis l'est dans le sens trigonométrique. Cette méthode donne donc une multitude de directions.

3. Calcul des pentes selon les directions d'écoulement

4. Calcul des surfaces drainées

Il donne la surface contributrice évaluée par la surface chargeant la pente supérieure en chaque point, mesurée comme un nombre de pixels. Celle-ci est calculée d'après les directions d'écoulement des méthodes D4, D8 et Dinf.

5. Calcul du réseau de la rivière (plusieurs méthodes possibles)

Le fichier résultant est un raster binaire (1 : la rivière, 0 : le reste).

En utilisant une rivière préexistante (uniquement dans Taudem) :

La rivière utilisée (par exemple issue de la BD Carthage) doit être un fichier raster dont les puits sont comblés et ou chaque pixel de la rivière se voit attribuer une direction d'écoulement selon la méthode D8. Cette rivière est ensuite binarisée pour obtenir le réseau et vectorisée. Elle se superpose pratiquement exactement à la rivière utilisée en input.

Basé sur le MNT (uniquement dans Taudem)

Le MNT est lissé par un kernel de 3 par 3 dont les poids sont spécifiés. La méthode de Peucker et Douglas (1975, voir l'aide de Taudem) est ensuite utilisée pour identifier les cellules convexes. Cette méthode parcourt la grille et examine chaque quadrant de 4 cellules et repère la plus haute. Les autres cellules sont considérées comme convexes et connectées au réseau en considérant la surface drainée des cellules convexes en amont. Un seuil d'accumulation sur le nombre de ces cellules est utilisé pour cartographier le réseau.

Seuil de la surface drainée (tous les logiciels) :

La définition de ce seuil permet d'obtenir un réseau plus ou moins ramifié. Si le seuil est la valeur la plus faible de surface drainée, l'ensemble des pixels appartient au réseau.

Seuil de l'ordre des brins de réseau (Taudem) :

Les brins de réseau dont les directions d'écoulement sont calculées par la méthode D8 peuvent être ordonnés selon la méthode de Strahler. L'ensemble des cellules appartient au réseau et le seuil permet de ne récupérer que les brins les plus importants qui existent réellement.

D'autres méthodes existent encore dans Taudem et sont basées sur le seuillage des aires de drainage et de la pente calculées par la méthode Dinf, ou encore par la surface drainée (méthode D8) et la longueur de la pente. Elles ne seront pas présentées ici, n'ayant pas été testées.

6. Calcul des sous bassins

Enfin, à partir de tous les calculs effectués précédemment, les sous bassins sont cartographiés.

Comparaison des résultats issus de SAGA, ArcGIS, Taudem, et HydroDEM

Réseaux hydrographiques :

Les algorithmes implémentés dans ces quatre logiciels ont été testés avec les mêmes données, c'est-à-dire, le modèle numérique de terrain de la BD Alti de l'IGN.

En ce qui concerne le calcul du réseau hydrographique, les logiciels SAGA, ArcGIS et Taudem donnent des résultats semblables avec le seuillage de la surface drainée (voir annexe 36). Le logiciel HydroDEM donne des résultats

légèrement moins bons, c'est-à-dire, plus éloignés du réseau officiel de la BD Carthage. Ceci tient au fait que les directions d'écoulement sont au nombre de 4 au lieu de 8 dans les autres logiciels.

Cependant, le réseau de la BD Carthage n'est pas forcément de bonne qualité. La définition des brins n'est pas rigoureuse au point de vue topologique : un tronçon doit se terminer à chaque extrémité par un nœud, et l'intersection de deux tronçons doit se faire au niveau d'un nœud également. Certains brins ne sont pas connectés au réseau, d'autres ne sont pas représentés, en particulier les brins intermittents. Un gros travail de correction sur ces données a été effectué, grâce au logiciel OpenJump (voir l'annexe 37), afin de les rendre exploitables et homogènes sur l'ensemble du bassin versant. Ce travail permet de forcer le découpage de l'espace en sous bassins grâce à un réseau existant correct dans le logiciel Taudem.

Découpage en sous bassins :

A partir des réseaux hydrographiques calculés dans chaque logiciel, et du réseau corrigé de la BD Carthage, les différentes méthodes de découpage ont été testées.

Dans le logiciel HydroDEM, le découpage a été réalisé par E. Leblois²⁵, développeur du logiciel. Les sous bassins sont calculés à partir du seuillage de la surface drainée pour l'acquisition du réseau hydrographique principal. Dans les logiciels ArcGIS et SAGA, le découpage est obtenu après calcul des directions d'écoulement par la méthode D8, et seuillage de la surface drainée. Enfin, les logiciels Taudem et SAGA donnant des résultats très proches pour ce qui est du calcul du réseau hydrographique par la méthode D8 et seuillage de la surface drainée, le découpage réalisé sous Taudem ne suivra pas la même méthode que ceux réalisés dans ArcGIS et SAGA, mais sera forcé par le réseau hydrographique permanent, issu de la BD Carthage modifiée.

Les différents résultats sont présentés en annexe 38.

Les résultats issus des logiciels SAGA et ArcGIS sont très proches étant donné qu'ils utilisent les mêmes algorithmes de calcul. Des différences s'observent au niveau des exutoires de certains ruisseaux ou torrents. Les réseaux hydrographiques sont légèrement différents, ainsi certains brins n'existent que dans un des réseaux. Les sous bassins qui leur correspondent n'existent pas dans l'autre découpage.

Quand on regarde de façon très locale la superposition du réseau hydrographique issu de la correction de la BD Carthage avec ces deux découpages, l'aval de certains sous bassins ne correspond pas avec l'exutoire des ruisseaux ou torrents sur l'Arc. Le seuillage de la surface drainée réalisé au préalable n'est pas parfait puisque certains brins de réseaux n'ont pas été repérés ; ainsi certains sous bassins sont complètement absents.

Les résultats que donne HydroDEM sont relativement bons par rapport à ceux donnés par SAGA ou ArcGIS. Les méthodes de calcul sont moins performantes (4 directions d'écoulement) ce qui donne aux limites de sous bassins un léger effet « marches d'escalier ». Cependant, la superposition du réseau hydrographique corrigé avec ce découpage ne donne pas autant d'imprécisions au niveau des exutoires de certains affluents de l'Arc que pour les logiciels SAGA et ArcGIS.

Les résultats donnés par Taudem sont les plus précis étant donné que le découpage est forcé par le réseau hydrographique corrigé. Ici, ne se retrouvent donc pas les erreurs de superposition de la limite aval des sous bassins, avec les exutoires des affluents de l'Arc. A chaque brin de réseau hydrographique passé comme input correspond un sous bassin. Il est ensuite possible de regrouper les sous bassins aux caractéristiques identiques.

D'après ces résultats le choix de logiciel le plus judicieux, c'est-à-dire celui qui donnera le plus de précision et qui permettra rapidement d'obtenir un sous bassin par brin de réseau, est donc Taudem.

25 Chercheur au Cemagref de Lyon, unité « Hydrologie / Hydraulique »

1.2 *DECOUPAGE EN SOUS BASSINS DIRECTEMENT CONTRIBUTEURS : LES SOUS BASSINS DES AFFLUENTS DIRECTS*

Les sous bassins des affluents directs correspondent aux surfaces drainées par les réseaux affluents de l'Arc, tels que les torrents de l'Arvan, du Glandon, ou du Ribon. Ils sont obtenus dans le logiciel Tudem, par les étapes présentées précédemment. Le découpage est forcé par le réseau hydrographique de la BD Carthage corrigée, et les sous bassins en résultant sont agglomérés grâce à la surface de drainage. Il existe au final 283 affluents directs à l'Arc, donc le résultat du découpage présente autant de sous bassins directement contributeurs. La cartographie de ces sous bassins est présentée en annexe 39.

Ce découpage permet de constater que les surfaces des sous bassins des différents torrents et ruisseaux qui affluent à l'Arc sont très différentes (elles varient de $1.5 \cdot 10^{-3}$ km² à 225 km²). Les densités de drainage de ces sous bassins seront par conséquent très variables. Ce découpage a aussi été utile lors du zonage des caractéristiques climatiques du bassin versant. Enfin, il a permis d'identifier les secteurs dans lesquels les sous bassins élémentaires peuvent être agglomérés.

1.3 *DECOUPAGE EN SOUS BASSINS ELEMENTAIRES*

Le découpage en sous bassins élémentaires et celui qui est fourni directement par le logiciel Tudem. En raison du nombre très important de brins considérés, le nombre de sous bassins l'est également. La résolution initiale du modèle numérique de terrain utilisé pour ce découpage étant de 50 mètres, la forme à l'aval des sous bassins était fortement pixellisées. Afin d'obtenir des formes aux contours « lisses », la résolution du MNT a été abaissée à 20 mètres par un rééchantillage par la méthode d'interpolation bilinéaire.

Le nombre de sous bassins élémentaires est très conséquent, cependant, certains d'entre eux n'ont pas pu être détectés, en particulier sur des brins de très petite taille. Les sous bassins sont voués à être ensuite agglomérés afin de représenter correctement le fonctionnement hydro-sédimentaire. Les caractéristiques de sensibilité à l'érosion des sous bassins en question sont relativement homogènes. Le fait qu'un seul sous bassin les représente permet de rester cohérent dans cette analyse spatiale. Dans le cas où les sous bassins non détectés ne présentent pas les mêmes caractéristiques de sensibilité ou de connectivité, le découpage réalisé avec le MNT à 50m pourra être réutilisé.

La cartographie des sous bassins élémentaires est présentée en annexe 40. Elle représente 1471 entités.

1.4 *DECOUPAGE TENANT COMPTE DES POINTS D'ARRETS DU FLUX SEDIMENTAIRE, ET DES CARACTERISTIQUES DE SENSIBILITE*

Ce découpage est réalisé par agglomération des sous bassins précédents, qui offrent des caractéristiques homogènes. Les caractéristiques de sensibilité à l'érosion ont été définies dans la partie Sensibilité à l'érosion pour la segmentation en sous bassins contributeurs.

La connectivité du flux sédimentaire au réseau hydrographique est perturbée par la présence de très nombreux ouvrages sur l'Arc. Les points d'arrêt du flux sédimentaire peuvent correspondre à des barrages, ou des prises d'eau. Le flux peut aussi être dévié par le biais d'une conduite forcée. Si celle-ci ne débouche pas sur un sous bassin connecté, le flux de sédiment n'atteint jamais l'Arc. Pour évaluer quels sont les sous bassins connectés, ils doivent être superposés avec la cartographie des aménagements hydro-électriques présentée en annexe 41.

Les impacts sur le flux détritique

Pour déterminer si le flux sédimentaire est arrêté par les conduites ou les prises sur l'ensemble du réseau, la thèse de A. Marnézy (1999) a été utilisée. Toutes les citations qui vont suivre en sont issues.

« Barrages et chasses artificielles perturbent le transit naturel. Les transformations de l'hydrologie se font sentir à la fois sur les teneurs et sur les flux de matières en suspension véhiculées. »

« Pour les éléments les plus fins (< 0.1 mm), la décantation est pratiquement impossible [dans les captages torrentiels], elle nécessiterait des bassins de dimension beaucoup plus grandes, et beaucoup de temps. [...] Quant à la fraction fine, dont une partie provient de l'abrasion des bassins englacés, elle est véhiculée jusqu'aux barrages à travers dérivations et galeries, ou directement turbinée et restituée à la rivière. »

Les réservoirs d'altitude sont à un état d'équilibre : « Une bonne partie des fines sont directement évacuées par la prise d'eau lors de chaque turbinage. » « [P]lusieurs vidanges décennales ont déjà été effectuées [...] au cours desquelles un volume important de vases était évacué par la vanne de fond. »

Les dépôts dans [l]es retenues [au fil de l'eau], fort abondants depuis les crues récentes relèvent autant du charriage que des MES. Toutes les matières fines ne s'y décantent pas, la durée du séjour de l'eau n'est pas suffisamment longue, mais une bonne proportion est concernée. Cette sédimentation de type « deltaïque » accumule naturellement les éléments fins vers l'aval des cuvettes. »

« Une partie du flux est [donc] piégée par décantation dans les barrages d'altitude et les retenues au fil de l'eau. »

D'après ces observations, les règles définissant la connexion de ces sous bassins ont pu être définie et sont les suivantes :

- Un sous bassin dont le réseau hydrographique se poursuit à l'aval dans un autre sous bassin, sans aucun aménagement, permet la circulation du flux sédimentaire et est donc connecté.
- Les MES transportées par le réseau hydrographique sont partiellement arrêtées par les prises d'eau et les petits barrages. Les sous bassins fournissant ces fines ne seront donc que partiellement connectés. Une étude plus approfondie de chaque ouvrage serait nécessaire pour quantifier l'arrêt du flux de sédiments.
- Les barrages de taille importante arrêtent complètement le flux de sédiment. Les MES décantées dans ceux-ci sont évacuées par turbinage ou par chasse. A l'échelle temporelle utilisée pour cette étude, les sous bassins à l'amont de ces barrages sont donc considérés comme déconnectés.
- Les conduites forcées, ou aqueducs qui se déversent dans des lacs ou réservoir déconnectent les sous bassins dans lesquels ils prennent leur source (le flux de fine passe dans ceux-ci). Ceux qui débouchent sur le réseau hydrographique, en aval, au niveau d'une restitution, rétablissent le flux sédimentaire et les sous bassins sources sont donc connectés.

La cartographie de la connexion des sous bassins est établie à partir du découpage précédent et des règles édictées ci-dessus, et est présente en annexe 42. Elle représente donc les sous bassins en trois classes : connectés, semi-connectés et non connectés. Les sous bassins non connectés ne sont plus pris en compte pour la suite de l'analyse.

La cartographie des sous bassins connectés et semi-connectés est ensuite superposée à celle de la sensibilité à l'érosion du bassin versant. Le résultat donne 6 combinaisons :

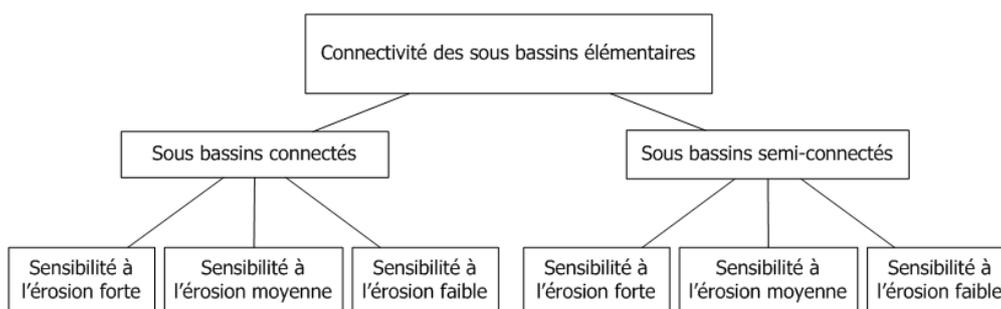


Figure 8 : Combinaisons possibles entre les différents degrés de sensibilité à l'érosion, et la connectivité des sous bassins élémentaires

Les sous bassins adjacents présentant la même combinaison sont fusionnés. Ceux dans lesquels plusieurs classes de sensibilité coexistent prennent le degré de sensibilité de la classe la plus présente (la surface la plus importante).

Pour effectuer la requête nécessaire à la sélection de la classe de sensibilité dont la surface est la plus importante dans chaque sous bassins élémentaires, est effectuée en SQL dans PostgreSQL²⁶. Grâce à l'identifiant de chaque sous bassin, la classe de sensibilité la plus représentée leur est ensuite associée. La représentation cartographique, résultat de la jointure des tables des sous bassins élémentaires, avec la table résultat de la requête, est présentée en annexe 43.

Les sous bassins élémentaires dont la sensibilité est homogènes et appartenant au même sous bassin direct (découpage 1) sont ensuite agglomérés : les couches des sous bassins des affluents directs de l'Arc et celle établie précédemment (caractéristique de sensibilité pour chaque sous bassin élémentaire) sont superposées, et les sous bassins élémentaires présentant la même sensibilité à l'érosion et contenus dans le même sous bassin d'un affluent direct, sont agglomérés. Le résultat est présenté en annexe 44.

Les sous bassins connectés et semi-connectés sont situés en majorité sur la moitié aval du bassin versant. L'ensemble des sous bassins constituant le cours de l'Arc est connecté ou semi connecté. La sensibilité à l'érosion est plus forte sur les deux tiers amont du bassin. La segmentation finale obtenue ici donne 346 sous bassins dont 137 avec une superficie supérieure à 2 km². Les sous bassins des affluents directs de taille moyenne présentent la même sensibilité à l'érosion sur l'ensemble de leur surface. Par contre, les sous bassins de taille plus importante comme ceux de l'Arvan, de la Valloirette, du Glandon, ou du Bugeon sont divisés en de plus petites unités où la sensibilité est homogène. La part de la surface du bassin où le flux sédimentaire est dévié représente 22%. Celles où le flux circule librement ou presque correspondent respectivement à 52% et 26%. 35% des surfaces du bassin correspondent à des secteurs connectés très sensibles à l'érosion, 9% à des secteurs à sensibilité moyenne, et 8% à faible sensibilité. Quant aux secteurs semi-connectés, la forte sensibilité représente 17% des surfaces du bassin, la sensibilité moyenne 6%, et la faible sensibilité 3%.

Dans l'ensemble, les secteurs connectés et semi connectés sont fortement sensibles à l'érosion. Ces sous bassins contribueront donc beaucoup à la production et au transit de matières en suspension.

Vers l'amont, les sous bassins voient leur flux de MES déviés vers des grandes retenues (Plan d'Aval, Bissorte) destinées à la production d'électricité, ou vers des lacs (lac de Mont Cenis) où des quantités importantes de fines se décantent. Elles sont rarement reprises dans le flux, pratiquement exclusivement lors de chasses, mais de manière modérée puisque les éléments fins argileux tendent à colmater et à piéger les matières en suspension d'autre nature (Marnézy, 1999).

Les sous bassins où le flux sédimentaire est déconnecté ont des sensibilités moyennes à fortes. Leurs apports en fines au flux seraient très importants si toutes les prises d'eau et les barrages d'altitude n'existaient pas.

2 EVALUATION DE LA QUALITE DES RESULTATS OBTENUS

Une bonne précision des contours des éléments du dernier découpage est obtenue du fait de la bonne résolution du modèle numérique de terrain (50m) par rapport à la superficie du bassin (environ 1980 km² d'après le calcul), et de la méthode d'agrégation des sous bassins entre eux. Les règles pour combiner ceux-ci sont fixes, donc sur l'ensemble du bassin versant les regroupements se sont fait de manière homogène.

La cartographie de la sensibilité à l'érosion est aussi très précise et a été validée par la comparaison à trois données différentes : la localisation des ravines, et les cartographies de Marnézy (1999) et de Latulippe (1995).

Plus de précisions sur les flux de MES à chaque aménagement, et sur la turbidité des eaux des conduites forcées ou des aqueducs, seraient nécessaires pour pouvoir définir de manière plus juste la connectivité des sous bassins. En effet, les données disponibles ne permettent pas de distinguer les débits solides des conduites, ou des dérivations, et les règles de regroupement énoncées précédemment s'appliquent de la même manière pour chaque ouvrage. Un partenariat avec EdF permettrait de récupérer ces informations, et d'affiner le travail réalisé ici.

26 Documentation et téléchargement sur : <http://www.postgresql.org>

En conclusion, grâce à deux sources de données fiables et à une méthodologie rigoureuse pour la définition de celles-ci, la segmentation réalisée permet donc de représenter le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin de l'Arc, à l'aide des données disponibles. Un enrichissement des sources de données permettra d'affiner le résultat obtenu ici. Une modélisation hydrologique est envisagée : le travail effectué ici pourra être repris, en particulier la dernière segmentation réalisée (présentée dans les perspectives), qui met en évidence des sous bassins unités d'étude pour caler le modèle qui sera utilisé. Dans les perspectives, un exemple d'unité pertinente pour la modélisation sera présenté.

CONCLUSION / PERSPECTIVES

1 SELECTION DES SOUS BASSINS REPRESENTATIFS, UNITES D'ETUDE POUR LA MODELISATION HYDRO-SEDIMENTAIRE

Parmi les sous bassins sensibles à l'érosion et connectés, certains sont mieux localisés, c'est-à-dire, plus proches de stations de mesures, indispensables pour pouvoir caler certains paramètres des modèles hydro-sédimentaires.

Un inventaire des stations de mesures, hydrométriques et turbidimétriques opérationnelles et planifiées a été réalisé. Il est présenté en annexe 45 avec la localisation d'exemples de sélection de sous bassins pour la modélisation.

Le tableau suivant reprend les informations des stations de mesure sur l'ensemble du bassin. Les gestionnaires étant différents, la nomenclature pour identifier une station n'est pas homogène, elles seront ici identifiées par le nom des localités à proximité dans lesquelles elles se trouvent.

Station	Cours d'eau	Hydrométrie opérationnelle	Hydrométrie planifiée	Turbidimétrie opérationnelle	Turbidimétrie planifiée
Saint-Jean-d'Arves	Arvan	✓ DIREN RA			✓ Cemagref 2010
Hermillon (Pontamafrey)	Arc	✓ EDF		✓ Cemagref	
Saint-Jean-de-Maurienne	Arvan		✓ EDF et Cemagref 2009		✓ EDF et Cemagref 2009
Randens	Arc		✓ SPC Alpes Nord 2010		✓ Cemagref 2010
Sainte-Marie-de-Cuines	Glandon	✓ EDF			✓ EDF

Tableau 12 : Récapitulatif des stations de mesure sur le bassin versant de l'Arc

Le Cemagref dispose aussi d'une station limnimétrique opérationnelle au niveau de Saint-Avre. Les autres stations hydrométriques pour lesquelles la mise en place de mesure de turbidité n'est pas envisagée n'ont pas été représentées dans le tableau précédent, mais une (opérationnelle et gérée par la EDF) est présente sur la cartographie en annexe 45.

A l'heure actuelle, il n'existe qu'une seule station de mesure pour laquelle les données disponibles concernent à la fois les débits, les hauteurs d'eau et la turbidité, il s'agit de la station de Pontamafrey, où les aspects hydrométriques sont gérés par EDF, et la turbidimétrie par le Cemagref de Lyon. D'ici 2010, on en comptera 4 ou 5. Les sous bassins que l'on pourrait sélectionner pour caler un modèle hydrologique sont ceux sur lesquels on trouve ces stations, c'est-à-dire, l'ensemble des unités constituant les sous bassins de l'Arvan et du Glandon, et sont représentés en annexe 45.

2 FINALISATION ET VEILLE TECHNOLOGIQUE

L'ensemble des données récupérées et produites pendant le stage a été regroupé suivant la structuration qui est présentée dans la phase 1. La base de métadonnées a été complétée pour chaque donnée produite, dans le fichier Excel. Enfin, un dictionnaire des fichiers faisant correspondre le nom d'un fichier avec son contenu a été réalisé pour les reprises ultérieures.

3 CONCLUSION GENERALE

De nombreuses tâches répondant aux objectifs fixés au début du stage ont été réalisées en particulier une analyse spatiale, et la segmentation en sous bassins pour représenter le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arc, au sein d'un système d'information géographique.

De nombreux livrables ont été produits : ce sont des données à références spatiales au format ouvert, et leurs cartographies associées. Il s'agit de la sensibilité à l'érosion du bassin versant de l'Arc, sa segmentation en sous bassins en cohérence avec son fonctionnement hydro-sédimentaire, et le forçage hydro-climatique moyen.

Afin de produire ces résultats, il a été nécessaire de créer d'autres données, celles-ci n'étant pas disponibles au départ :

- la géologie, la pente, les formes de versant, et la présence de glaciers et de névés, ont permis d'évaluer la sensibilité à l'érosion
- la correction topologique du réseau hydrographique, complétée par l'ensemble des brins intermittents, et les segmentations (sous bassins des affluents directs, sous bassins élémentaires, sous bassins élémentaires connectés) du bassin versant de l'Arc, ont permis d'appréhender le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin

Enfin, des données de vérification ont été produites : il s'agit des densités de drainage et des ravines et rigoles.

L'ensemble des données produites, et celles qui ont été récupérées au cours de ce stage ont été regroupées au sein de dossiers. Leur structuration reprend celle qui a été définie au départ. Elles sont également toutes référencées dans la base de métadonnées.

En plus des nombreuses données produites pendant ce stage, des méthodes d'acquisition de données ont été développées pour certains objets géographiques tels que les ravines et les glaciers. Ces méthodes s'appuient sur la télédétection. Cet outil très puissant, utilise des données facilement accessibles (de nombreuses images satellites sont disponibles sur Internet) et des algorithmes très connus (certains logiciels les mettent à disposition dans leur rubrique aide). Les méthodes développées pourront être appliquées dans d'autres contextes, à d'autres échelles, et sur d'autres entités (neige, cours d'eau, sols nus).

L'étude comparative des logiciels testés pour effectuer le découpage en sous bassins, permettra, dans une certaine mesure, aux utilisateurs voulant réaliser cette tâche de choisir leur logiciel en fonction de leurs besoins et de leur échelle de travail (seulement parmi ceux qui ont été testés).

La méthodologie développée pour la mise en place du système d'information géographique est relativement sommaire et classique, mais reprend les points essentiels de la conduite de projet SIG, à savoir, l'étude des besoins (en ressources humaines, en logiciels et en données), le choix du logiciel, et le référencement des données. Elle pourra éventuellement être réutilisée dans un projet futur.

Les critères à prendre en compte dans l'analyse spatiale ont été déterminés par une analyse bibliographique des différents modèles existants couplés à des SIG. Il s'agit de la géologie, la topographie, et l'occupation des sols. Il ressort de l'analyse spatiale que c'est d'abord la géologie, puis l'occupation du sol et enfin la topographie qui expliquent le mieux la sensibilité à l'érosion. Après plusieurs combinaisons, faisant varier la dominance d'un critère sur les autres, le poids de la pente a été défini comme le plus faible (en comparaison de la géologie et de l'occupation du sol). Ceci ne démontre pas que ce critère devrait être évincé lors d'une modélisation hydrologique, mais uniquement que le croisement réalisé donne les résultats les plus cohérents lorsque son poids est assez faible. De plus, comme les critères ne sont pas strictement indépendants les uns des autres, il ne faut pas interpréter le poids absolu de ce critère en termes de processus physiques.

La sensibilité à l'érosion est très variable sur l'ensemble du bassin. A l'amont c'est plutôt l'occupation du sol qui joue un rôle prépondérant, compte tenu de l'importance des surfaces de sols nus. Dans la partie médiane, ce sont les

différentes lithologies qui font que la sensibilité est forte, comme les schistes lustrés, les terrains houillers et les marnes. Les rôles des pentes et de l'occupation du sol ne sont pourtant pas à exclure. Enfin, vers l'aval, la topographie semble jouer un rôle plus important que sur le reste du bassin.

Des indicateurs de l'érosion, tels que la densité de drainage et la localisation des ravines, ont permis de vérifier la cohérence du résultat de l'analyse de la sensibilité à l'érosion. Il en a été de même avec les travaux réalisés par Latulippe (1995) et Marnézy (1999), où l'érodabilité qu'ils ont définie semble être bien corrélée avec la sensibilité à l'érosion. Les principales différences observées sont liées à la prise en compte du forçage climatique dans la définition de ces indicateurs.

Afin de faire aboutir complètement l'évaluation de l'érosion sur le bassin versant, une modélisation hydro-sédimentaire est nécessaire. Elle permettrait de prendre en compte le forçage hydro-climatique moyen (les précipitations moyennes, la fonte) mais aussi les événements climatiques intenses, tels que les orages ou les laves torrentielles.

La vraie validation viendra de toute façon des données de terrain. Cependant, sur ce bassin versant, les stations de mesure existantes sont assez récentes et ne permettront probablement pas d'établir des conclusions fiables à cause du faible nombre d'années pour lesquelles les données sont disponibles. La mise en place de stations de mesure turbidimétriques constitue donc un véritable enjeu dans les années à venir.

Références bibliographiques du rapport

- [1] Risques d'inondation et d'érosion associés aux effets des sédiments fins et de la végétation sur la morphologie d'une rivière alpine, SEDIRISK, 2009.
- [2] R. Bou Kheir. A conditional gis-interpolation-based model for mapping soil-water erosion processes in Lebanon. *Land degradation & development*, 14:122 – 135, 2008.
- [3] R. Bou Kheir, C. Abdallah, and M. Khawlie. Assessing soil erosion in mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and gis. *Engineering Geology*, 16:239 – 254, 2008.
- [4] S. Brochot. Etude hydraulique de l'Arc en Maurienne de Modane à l'Isère (Savoie, France). Estimation des apports sédimentaires des torrents affluents. Technical report, Cemagref, 1998.
- [5] S. Brochot. Estimation de la production de sédiments des torrents Application aux affluents de l'arc de Maurienne (Savoie, France). In *Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000*, 2000.
- [6] A. Buisson, F. Guirado, F. Lacroix, and F. Valla. Glaciers à risques Alpes françaises. Technical report, Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, Cemagref, RTM, CNRS, 1999.
- [7] L. Canali and G. Allodi. Contribution à l'étude sur le transport solide en suspension dans les cours d'eau et sur la dégradation du sol dans le bassin du Pô. Communication présentée au Symposium de Bari, mais non publiées dans la publication n°59 de l'AIHS.
- [8] A. Chandesris. Les hydro-Ecorégions de France métropolitaine approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés, annexe 1.
- [9] A. Foucault and J.-F. Raoult. *Dictionnaire de Géologie*, 2005.
- [10] F. Gottardi. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement Application aux grands massifs montagneux français. PhD thesis, L'Institut polytechnique de Grenoble Spécialité : « Terre Univers Environnement » Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement dans le cadre de l'École Doctorale « Terre Univers Environnement », 2009.
- [11] M. Jodeau. Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues. PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon I Ecole doctorale Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique Spécialité Mécanique, 2007.
- [12] A. Kühni and O.A. Pfiffner. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250-m DEM. *Geomorphology*, 23:285 – 307, 2001.
- [13] M.J. Kirkby and N.J. Cox. A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. *Catena*, 20:333–352, 1995.
- [14] C. Latulippe. Recherche sur les zones de production sédimentaires et les transports de matière en suspension du bassin versant de l'Isère en amont de Grenoble. Master's thesis, Université Saint Joseph, 1995.
- [15] C. Latulippe and J.-L. Peiry. Essai de hiérarchisation des zones de production de matière en suspension dans le bassin-versant d'un grand cours d'eau : l'Isère en amont de Grenoble. *Revue de Géographie Alpine*, 16:29 – 44, 1996.
- [16] S. Lee. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: a case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 9:457 – 465, 2004.

- [17] V. Mano. Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues - Optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2008.
- [18] A. Marnézy. L'Arc et sa vallée Anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine, Grenoble I, 1999.
- [19] B.M. Mati, R.P.C. Morgan, F.N. Gichuk, J.N. Quintor, T.R. Brewer, and H.P. Liniger. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(9):78–86, 2000.
- [20] S. Monnier. Les glaciers-rocheux, objets géographiques. Analyse spatiale multiscalaire et investigations environnementales. Application aux Alpes de Vanoise. PhD thesis, UNIVERSITÉ PARIS XII - VAL DE MARNE ÉCOLE DOCTORALE SIMME UMR 8591 Laboratoire de Géographie Physique, 2006.
- [21] C. Montier, J. Daroussin, and D. King. Cartographie de l'aléa "érosion des sols" en France. Technical report, INRA, 1998.
- [22] Morgan. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan - Morgan - Finney model. *Catena*, 18:305 - 322, 2001.
- [23] K. Pahari, J-P. Delsol, and S. Murai. Remote sensing and GIS for sustainable watershed management a study from Nepal. In 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Karlstad - Kiruna - Troms, August 19-29, 1996, August 1996.
- [24] F. Paul. The New Swiss Glacier Inventory 2000 Application of Remote Sensing and GIS. PhD thesis, Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich, 2003.
- [25] H.J.E. Rodda, M.J. Stroud, U. Shankar, and B.S. Thorrold. A GIS based approach to modelling the effects of land-use change on soil erosion in New Zealand. *Soil Use and Management*, 11:30–40, 2001.
- [26] T.L. Saaty, L. Dahan, and G. Hirsch. Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision. Esf Editeur, 1984.
- [27] V. Soti, A. Botta, A. Bégué, M. Despinoy, and F. Colin. Contribution de la télédétection au suivi de la sensibilité des sols à l'érosion à l'échelle d'un bassin versant (Île de la Réunion). *Revue Internationale de Géomatique*, 21(10):1 – 21, 2002.
- [28] M. Soutter, A. Mermoud, and M. Musy. *Ingénierie des eaux et du sol*. 2007.
- [29] M. Torkashvand Ali and N. Davood. Methodologies of preparing erosion features map by using RS and GIS. *International Journal of Sediment Research*, 8:130 – 137, 2008.
- [30] B. Valadas. Les Hautes Terres du Massif Central français : Contribution à l'étude des morphodynamiques récentes sur versants cristallins et volcaniques. 1984.
- [31] R. Vivian. Les glaciers des Alpes occidentales. Vivian, R., 1975.
- [32] W.H. Wischmeier and D.H. Smith. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agricultural Engineering*, 5:458 – 462, 1958.

Table des illustrations

Figure 1 : Organisation de la réponse à la problématique _____	- 4 -
Figure 2 : Filtre majoritaire, d'après l'aide d'ArcView 9.3 _____	- 23 -
Figure 3 : Illustration des opérations de dilatation (2e figure) et d'érosion (3e figure) _____	- 23 -
Figure 4 : Tableau récapitulant la reclassification du degré de sensibilité à l'érosion des différentes lithologies _____	- 25 -
Figure 5 : Tableau récapitulant la reclassification du degré de sensibilité à l'érosion des différents types d'occupation du sol _____	- 27 -
Figure 6 : Tableau représentant la reclassification finale des sensibilités à l'érosion liées aux différents types d'occupation du sol _____	- 27 -
Figure 7: Vue de profil d'un puit (d'après l'aide d'ArcGIS 9.3) _____	- 46 -
Figure 8 : Combinaisons possibles entre les différents degrés de sensibilité à l'érosion, _____	- 50 -
Tableau 1 : Exemples de critères pris en compte dans les modèles USLE, PESERA, AVSWAT _____	- 16 -
Tableau 2 : Exemple de critères pris en compte dans les analyses spatiales des travaux de Brochet, 2000, Torkashvand, 2008, Soti, 2002, Latulippe, Peiry, 1996, Bou Kheir et al., 2008 _____	- 16 -
Tableau 3: Echelle numérique pour évaluer la dominance d'un critère par rapport à un autre _____	- 18 -
Tableau 4 : Indice aléatoire pour des matrices de dimension 2 à 7 _____	- 19 -
Tableau 5 : Comparaison des données issues des bases de données SAFRAN et F. Gottardi _____	- 31 -
Tableau 6 : Maxima des cumuls annuels moyens issus des bases de données de F. Gottardi et SAFRAN _____	- 32 -
Tableau 7 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, _____	- 36 -
Tableau 8 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, en faisant dominer le critère géologie _____	- 36 -
Tableau 9 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, _____	- 37 -
Tableau 10 : Pondération des critères pour établir la sensibilité à l'érosion du bassin versant, _____	- 37 -
Tableau 11: Echelles de travail et objectifs des différentes segmentations du bassin versant de l'Arc _____	- 46 -
Tableau 12 : Récapitulatif des stations de mesure sur le bassin versant de l'Arc _____	- 53 -