



HAL
open science

Mise en place d'une méthode d'identification des potentielles sources de matières en suspension d'un bassin versant : application au bassin versant du Rhône

Juliette Conjard

► To cite this version:

Juliette Conjard. Mise en place d'une méthode d'identification des potentielles sources de matières en suspension d'un bassin versant : application au bassin versant du Rhône. Géographie. 2019. dumas-02485551

HAL Id: dumas-02485551

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02485551v1>

Submitted on 20 Feb 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.



MASTER 2

Domaine : Sciences Humaines et Sociales

Mention : GAED (Géographie Aménagement Environnement Développement)

Parcours GEOSPHERES

GEOgraphies - eSPaces - Homme / Environnement - Ressources – Systèmes

Mémoire de recherche

**Mise en place d'une méthode d'identification des potentielles sources de
matières en suspension d'un bassin versant**

Application au bassin versant du Rhône

Analyse spatiale multicritère hiérarchique intégrée à un Système d'information Géographique

Stage réalisé au laboratoire : **IRSTEA Lyon-Villeurbanne**, 5 rue de la Doua, 69100 VILLEURBANNE
de mars à septembre 2019

Mémoire soutenu le 6 septembre 2019 à l'IUGA, Grenoble,
devant un jury composé de :

- M. Pierre-Alain AYRAL, Enseignant-chercheur, IMT Mines Alès et LGEI – Institut des Sciences des Risques.
- Mme Flora BRANGER, chercheuse hydrologue à Irstea Lyon-Villeurbanne, associée à l'Unité de Recherche RiverLy – Maître de stage.
- Mme. Nathalie DUBUS, Enseignant-chercheur, IUGA, Université Grenoble Alpes – Tuteur pédagogique.

**CONJARD Juliette
M2 GEOSPHERES
ANNÉE 2018-2019**

Résumé / Abstract

Les matières en suspension engendrent des problèmes sanitaires, écologiques et économiques sur le Rhône notamment parce qu'elles transportent des polluants tels que les polychlorobiphényles (PCB) et le mercure. Afin d'étudier le transport de ces polluants, il est nécessaire d'identifier les zones sensibles à l'érosion hydrique, susceptibles de produire d'importants volumes de matières en suspension. La production de sédiments fins est contrôlée par des facteurs géologiques, géomorphologiques, pédologiques, anthropiques et climatiques. L'objectif de cette recherche est de construire et mettre en place une méthode d'analyse spatiale permettant d'identifier les potentielles sources de matières en suspension du bassin versant étendu qu'est le Rhône. L'analyse spatiale prendra la forme d'une analyse multicritère hiérarchique intégrée à un Système d'Information Géographique (SIG). La méthode de pondération utilisée sera une Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Les résultats issus de ces pondérations seront vérifiés en s'appuyant sur des données quantitatives : flux de matières en suspension en stations et production sédimentaire estimée sur deux sous-bassins versants à partir d'un modèle de transfert sédimentaire.

Suspended particles beget sanitary, ecological and economic issues on the Rhône River, the main issue being the fact that they carry pollutants such as polychlorinated biphenyl (PCB) and mercury. In order to study the transportation of those pollutants, it is necessary to identify which areas are sensitive to water erosion and thus could produce wide amounts of suspended particles. The production of suspended sediments is driven by geology, geomorphology, pedology, anthropisation and climate. The aim of this research is to build and apply a spatial analysis method, which would lead to the identification of the potential sources of suspended matters within the wide watershed the Rhône watershed is. The spatial analysis shall be a Hierarchical multicriteria analysis coupled with a Geographic Information System (GIS). The weighting method used in this research is an Analytic Hierarchy Process (AHP). The validation of the results lies on quantitative data: suspended material flows from stations and sediment export assessed on two subwatersheds from sediment transfer.

Mots clefs / Key words

Analyse spatiale, analyse multicritère, bassin versant, large bassin versant, Rhône, sensibilité à l'érosion, érosion hydrique, matières en suspension, sédiments en suspension, production sédimentaire, fonctionnement hydro-sédimentaire, données qualitatives, données semi-quantitatives, AHP, SIG, QGis, géomatique, géographie.

Spatial analysis, multicriteria analysis, watershed, wide watershed, Rhône, soil resistance, water erosion, suspended matters, suspended materials, production in sediments, hydro-sedimentary processes, qualitative data, semi-quantitative data, AHP, GIS, QGis, geomatics, geography.

Remerciements

Je tiens à remercier Flora Branger, maître de stage qui m'a apporté son appui dans la mise en place de cette analyse et la rédaction de ce mémoire par son expertise et ses conseils précieux. Je tiens en second lieu à remercier Nathalie Dubus, tutrice pédagogique pour ses conseils, son soutien et ses relectures qui m'ont vraiment beaucoup aidée. Je remercie Pierre-Alain Ayrat d'avoir accepté de faire partie de mon jury et pour la bienveillance dont il a fait preuve cette année. Je remercie chaleureusement Mélanie Bertrand pour ses conseils et son appui technique quant à la mise en place d'une analyse multicritère. Je suis très reconnaissante à Mélanie Bertrand et Jean-Jacques Delannoy pour leurs retours sur ma classification des natures lithologiques des roches, qui furent extrêmement utiles. Je remercie mes collègues du bureau 114, pour leur bonne humeur et leurs conseils tout au long de ce stage. Je tiens également à remercier l'ensemble des stagiaires, thésards et permanents des équipes Hydraulique des rivières, Hydrologie des bassins versants et Pollutions diffuses avec qui j'ai échangé, déjeuné et pris un café. Je les remercie pour leur accueil et leur bienveillance. Je remercie pour finir mes amis Isis N'Dala-Louika, Guillaume Kuc, Julien Chartoire, Laura Hernandez, Aubéline Bellom et Camille L'Hutereau et son papa pour leur soutien sans faille. Pareillement, je remercie du fond du cœur ma famille Etienne, Emmanuelle, Maria et mon informaticien personnel préféré, Samuel Conjard.

Sommaire

Introduction – problématique	6
1. Contexte : présentation de l'espace d'étude : le bassin versant du Rhône	9
1.1 - Contexte géographique et hydrographique	9
1.2 - Contexte climatique	10
1.3 - Contexte géologique	11
1.4 - Contexte lié à l'utilisation anthropique des sols	11
1.5 - Contexte – aménagements du fleuve	12
2. Méthodes d'estimation de la production sédimentaire dans les cours d'eau	12
2.1 - Méthodes quantitatives appliquées au cours d'eau	12
2.2 - Méthodes quantitatives appliquées au bassin versant :	15
2.3 - Méthodes qualitatives et semi-quantitatives appliquées au bassin versant : par analyse spatiale multicritère intégrée à un SIG	18
3. Mise en place de la méthode d'analyse spatiale multicritère sur le bassin versant du Rhône	25
3.1 - Facteurs de production de MES : quels critères pour le bassin versant du Rhône ?	25
3.2 - Mise en place de la classification des valeurs	40
3.3 - Test et pondération des paramètres : résultats globaux	48
4. Mise en place d'une méthodologie d'analyse et de validation des résultats	55
4.1 - Comparaison avec données quantitatives (Sediment Export) de deux sous-bassins	55
4.2 - Comparaison avec des données quantitatives de stations	57
Conclusion	62

Sigles et acronymes

ACP	Analyse en composantes principales
ACRU	Agricultural Catchment Research Unit (modèle)
AFNOR	Association française de normalisation
AGNPS	AGricultural Non-Point Source Pollution Model (modèle)
AHP	Analytic Hierarchy Process, Analyse Hiérarchique des Procédés (méthode)
AMC	Analyse multicritère
AMCD	Analyse multicritère d'aide à la décision
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BV	bassin versant
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CLC	Corine Land Cover
EH	équivalent habitant

EDF	Électricité de France
EDYTEM	Laboratoire "Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne"
e.g.	exempli gratia, par exemple
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIS	Geographic Information System
GP	Goal Programming (méthode)
i.e.	id est, c'est-à-dire
IC, RC, IA	Indice de Cohérence, Ratio de Cohérence, Indice Aléatoire
IDW	Inverse Distance Weighting (pondération inverse à la distance)
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IRIP	Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
IUSS	International Union of Soil Sciences
KINEROS	Kinematic Wave Overland Flow, Channel, Routing and Erosion Model
LGEI	Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MES	Matières en suspension
MNT	Modèle Numérique de Terrain
n.d	no date, date inconnue
OSR	Observatoire des Sédiments du Rhône
OWA	Ordered Weighted Average (méthode)
PCB	Polychlorobiphényles
PVC	Polychlorure de vinyle
SAFRAN	Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SDR	Sediment Delivery Ratio
SIERM	Système d'information sur l'eau du bassin Rhône-Méditerranée
SIG	Système d'Information Géographique
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique (méthode)
SMU	Soil Mapping Unit
STEP	Stations d'épuration des Eaux Usées
STU	Soil Type Unit
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
TIN	Triangulated Irregular Network (Réseau Triangulé Irrégulier)
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (méthode)
URL	Uniform Resource Locator, ressource identifiée par son emplacement.
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTA	Utilités Additives (méthode)
WLC	Weighted Linear Combination (méthode)
WRB	World Reference Base for Soil Resources

Note: Les figures, photographies et tableaux ne présentant pas de sources apparentes sont des réalisations personnelles.

Introduction – problématique

Le Rhône présente des problèmes de contamination de ses eaux à certains micropolluants : les polychlorobiphényles (PCB) et le mercure notamment (Launay, 2014). Le mercure (Hg) est un contaminant métallique fortement toxique qui existe à l'état naturel dans l'environnement. Une partie importante des concentrations en mercure mesurées dans l'eau est cependant d'origine anthropique (Sonney et al, 2005 *in* Launay, 2014). Cette pollution au mercure provient notamment des usines de production de chlore (Launay, 2014). Les PCB quant à eux sont des produits chimiques qui peuvent être utilisés comme isolants ou comme fluide hydraulique. L'usage de ces produits est réglementé depuis 1976 mais dans de nombreux pays existent des exemptions permettant de les utiliser. De plus, il existe des stocks dans les cours d'eau et glaciers en attente d'élimination¹. La contamination du Rhône par les PCB a fait l'objet d'un important intérêt médiatique dans les années 2000 et a conduit à une interdiction de consommation de poisson sur la plus grande partie du linéaire rhodanien (Launay, 2014).

Ces **polluants** sont bio-accumulables, ils peuvent se fixer à la surface de particules et être transportés par le courant (Coynel et al, 2007 *in* Antoine, 2013 ; Hakanson, 2011). On distingue plusieurs classes de matériaux à partir de leur diamètre (Chamley, 1987 ; Rivière, 1977).

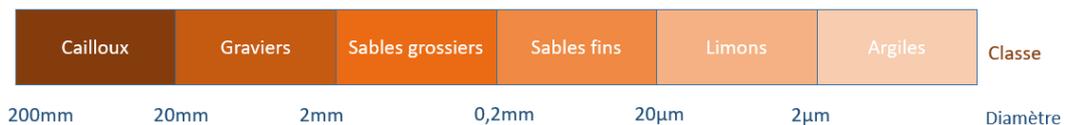


Figure 1: Classes sédimentaires en fonction du diamètre des particules

En fonction de leur classe, les particules présentent des modes de transport différents : traction, saltation, suspension ou solution. Les sables fins, limons et argiles sont usuellement en suspension² dans l'eau. Ces sédiments adsorbent davantage les polluants et sont plus facilement mobilisables. On appelle ces sédiments matières en suspension (notés MES), reconnus comme principales matières porteuses de contamination (Launay, 2014). Le transport des polluants par les MES engendre une modification de la composition chimique des milieux aquatiques (Birgand et al, 2004) et des effets néfastes sur la faune, notamment sur les prédateurs situés en bout de chaîne alimentaire (Bravard et Clémens, 2008).

De plus, les matières en suspension dans un cours d'eau engendrent des problèmes, au-delà de la contamination à certains polluants. Ces problèmes apparaissent lorsque les MES sont en excès. Au niveau des **écosystèmes**, la quantité de MES dans l'eau influence sa couleur ainsi que sa transparence et empêche la pénétration de la lumière dans l'eau. De ce fait, la photosynthèse est freinée, ce qui a des conséquences sur la production de la biomasse. Ensuite, les MES peuvent engendrer par la dégradation des matières organiques qui les composent en partie, un déficit en oxygène dans le milieu aquatique (anoxie) (Macary, 2013). Les MES présentent également des effets mécaniques sur les branchies des poissons (Miquel, 2003 *in* Macary, 2013). Mais surtout, les particules fines colmatent le substrat des cours d'eau qui constitue des zones de frayères pour certaines espèces comme

¹ Source : Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE/PAM) B.P. 18019, Athènes, Grèce. ISSN 1011-7148.. 2004 ISSN 1810-6218 online.

² Correspondants au washload et au suspended load.

les salmonidés. La survie des œufs sous graviers est alors compromise et les conséquences sur les populations des espèces peuvent être importantes (Macary, 2013). En conclusion, les matières en suspension participent à la dégradation des écosystèmes aquatiques, par réduction de la pénétration de la lumière, détérioration des branchies des poissons, colmatage des habitats et des frayères de la faune benthique entraînant des conditions d'anoxie (Massa, 2000 *in* Birgand et al, 2004). Ainsi, un excès de MES dans un milieu aquatique a des conséquences à la fois sur la production primaire (phytoplancton, bactérioplancton) et sur la production secondaire (e.g. zooplancton, poissons) (Hakanson, 2011). D'un point de vue anthropique, des concentrations en MES excessives réduisent l'efficacité des traitements d'eaux usées et ainsi peuvent empêcher l'utilisation de l'eau en tant qu'**eau potable**³. Pour finir, les pertes en terres par érosion, leur transport par les eaux courantes, puis leur sédimentation constituent des **enjeux économiques** importants : à l'amont, la dégradation des surfaces cultivées ou végétalisées nécessite de coûteux travaux de protection et de réhabilitation (Latulippe et Peiry, 1996). De plus, dans les zones de dépôts, les accumulations de sédiments fins engendrent une diminution de la durée de vie des aménagements (e.g. accumulation devant les vannes, usure des turbines) (Antoine, 2013 ; Poirel *et al.*, 2014 *in* Latulippe et Peiry, 1996).

Les matières en suspension sont régies par le phénomène d'érosion hydrique. L'érosion hydrique des sols résulte de plusieurs processus complexes et interdépendants : détachement des particules par météorisation des roches⁴, transport des particules et dépôt des particules (Soutter et al *in* Bertrand, 2009 ; Macary, 2013) causés en général par l'action de la pluie et du ruissellement (Macary, 2013). Le ruissellement naît d'un refus à l'infiltration et peut apparaître en surface (ruissellement Hortonien) ou en subsurface (ruissellement par saturation (Ouvry, 2019). L'érosion des berges d'origine naturelle et anthropique génère des MES complémentaires à celles issues du ruissellement des versants (Macary, 2013). Dans ces ruissellements, les concentrations en MES varient en 1 à 3g/L et exceptionnellement jusqu'à 100 g/L (Ouvry, 2019). L'intensité de l'érosion varie en fonction de la résistance du milieu (topographie, sol, occupation du sol et climat (Wischmeier et Smith, 1978 *in* Dumas, 2010).

Les flux de MES issus du fleuve Rhône représentent la principale source de matières en suspension à la Méditerranée (Tockner, 2009, Ferrand *et al.*, 2012 *in* Le Bescond, 2017). 800 000 à 900 000 m³/an sont acheminés dans le Rhône et la vitesse de transport est estimée à 2km/an (Tockner, 2009). C'est le fleuve au débit le plus important de France et le quatrième d'Europe. Son module interannuel⁵ à l'embouchure est de 1 700 m³/s (Bravard et Clémens, 2008), contribuant à 40 % des apports en eau douce à la Méditerranée (Poussard and Madrid, 1999 ; Tockner, 2009). Son bassin versant, de 98 500 km² dont 90 500 km² en France (Tockner, 2009), correspond globalement au quart sud-est du territoire français⁶. En 2009, l'Observatoire des sédiments du Rhône a été créé pour acquérir des données visant à

³ La réglementation (CE, 2000) a fixé le seuil maximal de 25 mg/L pour l'acceptation des eaux brutes destinées à la potabilité (Macary, 2013).

⁴ La météorisation (weathering) désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques de réduction élémentaire des roches et des minéraux à la surface de la Terre. Source : www.cairn.info/geomorphologie-dynamique-et-environnement--9782200246235-page-91.html

⁵ Synthèse des débits moyens annuels d'un cours d'eau sur une période de référence.

⁶ Source : www.graie.org/osr/IMG/pdf/S4_v2.pdf

quantifier de manière robuste les flux de MES et de contaminants associés en transit sur le Rhône et à étudier les dynamiques de ces flux, du lac Léman à la Méditerranée (Le Bescond, 2017). Les affluents du Rhône ont des fonctionnements hydro-sédimentaires très contrastés et de fait, apportent des quantités différentes de matières en suspension au fleuve. L'Ain, l'Arve, l'Isère et la Durance d'après Tockner (2009) fournissent 75% de la charge sédimentaire du Rhône.

Identifier, hiérarchiser et cartographier les zones de production de matières en suspension permettrait d'anticiper les volumes de matières en suspension et de polluants transportés. Il existe différentes méthodes permettant de quantifier et de caractériser les apports sédimentaires à une rivière, notamment des méthodes quantitatives. Certaines sont mises en place à l'échelle du cours d'eau, d'autres à l'échelle du bassin versant. Mais ces méthodes quantitatives traditionnelles sont difficilement applicables à un bassin versant de grande ampleur, tel que celui du Rhône qui ne peut être instrumenté régulièrement à la fois dans le temps et l'espace. Cette recherche se propose donc de développer une méthode complémentaire pour appréhender la production en sédiments fins, à l'échelle d'un bassin versant de grande ampleur, méthode qui s'appuie sur une analyse spatiale multicritère intégrée à un SIG. Cette approche par l'analyse spatiale multicritère a déjà été mise en place autour de diverses questions : planification territoriale (Chevallier, 2016), planification urbaine (El Amraoui *et al.*, 2017), évaluation de la vulnérabilité territoriale aux séismes (Bascopé, 2015), évaluation des risques de contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires (Macary, 2013) notamment. Appliquées à la question de l'érosion, les analyses multicritère à dimension spatiale sont plus rares. Elles furent mises en place par Dumas (2013) appliquée à la région de Dumbéa à Païta – Bouloupari (Nouvelle-Calédonie), Latulippe et Peiry (1996) appliquée au bassin versant de l'Isère, Bertrand (2009) appliquée au bassin versant de l'Arc en Maurienne ou encore Boughalem *et al.* (2013), appliquée au bassin versant de l'Isser - Tlemcen en Algérie. Toutes ces analyses furent mises en place sur des bassins versants de taille restreinte (petite à moyenne). Il convient dès lors de créer et mettre en place une méthodologie adaptée à un large bassin versant tel que celui du Rhône.

Le questionnement sous-tendant cette recherche s'articule donc autour d'une question principale : comment construire une méthode permettant de caractériser les sources potentielles de sédiments sur un large bassin versant ?

Les questions suivantes se posent aussi :

- Comment identifier et caractériser les sources potentielles en matières en suspension d'un large bassin versant tel que celui du Rhône ?
- Comment spatialiser les stocks de matières en suspension susceptibles d'alimenter le fleuve ?
- Comment hiérarchiser la quantité de sédiments fins qui peut arriver jusqu'au fleuve ?

On émet l'hypothèse qu'une analyse multicritère à dimension spatiale peut-être une approche tout à fait pertinente pour répondre à ce questionnement, à cette échelle d'étude. En effet, cela permettrait de considérer la dimension spatiale du phénomène et de le

cartographier tout en réduisant la masse de données nécessaires et en considérant un ensemble uni de critères en chaque point du territoire.

L'objectif de ce mémoire est ainsi de proposer une méthode d'estimation de la production sédimentaire en tous points d'un bassin versant, qui puisse être développée à l'échelle d'un bassin versant de grande superficie, en utilisant les procédés de l'analyse multicritère spatiale. La méthode de pondération utilisée est l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Cette analyse sera intégrée au sein d'un SIG. La méthode proposée sera appliquée au bassin versant du Rhône.

Le mémoire s'organise de la façon suivante : Dans un premier temps, sera présenté l'objet de l'étude – le bassin versant du Rhône – ainsi que ses caractéristiques principales. Dans une deuxième partie seront présentées les méthodes usuelles d'estimation de la production sédimentaire. Cela permettra de situer la nouvelle méthode proposée de façon comparative et de mettre en avant ses apports et ses limites par rapport aux approches traditionnelles. Ensuite, sera présentée la méthode d'analyse déployée : les critères choisis, les données récoltées, les classifications mises en place, les pondérations et méthodes d'agrégation choisies. Pour finir, sera présentée la méthode d'analyse des résultats mise en place, comparant les résultats obtenus avec des résultats quantitatifs ponctuels (flux de MES en stations de mesure et modèle de transfert sédimentaire).

1. Contexte : présentation de l'espace d'étude : le bassin versant du Rhône

1.1 - Contexte géographique et hydrographique

Le Rhône est un fleuve franco-suisse de 812km dont 512km à l'aval du lac Léman (Tockner, 2009). C'est le quatrième fleuve européen en débit⁷. Il prend sa source dans le Glacier du Rhône (à 2209 mètres), chemine dans le Valais jusqu'au Lac Léman puis à travers le quart sud-est de la France jusqu'à la mer Méditerranée. Ses affluents principaux sont en rive droite : l'Ain, la Saône, l'Ardèche, la Cèze et le Gardon et en rive gauche : l'Arve, l'Isère, la Drôme et la Durance (Figure 2). Son bassin

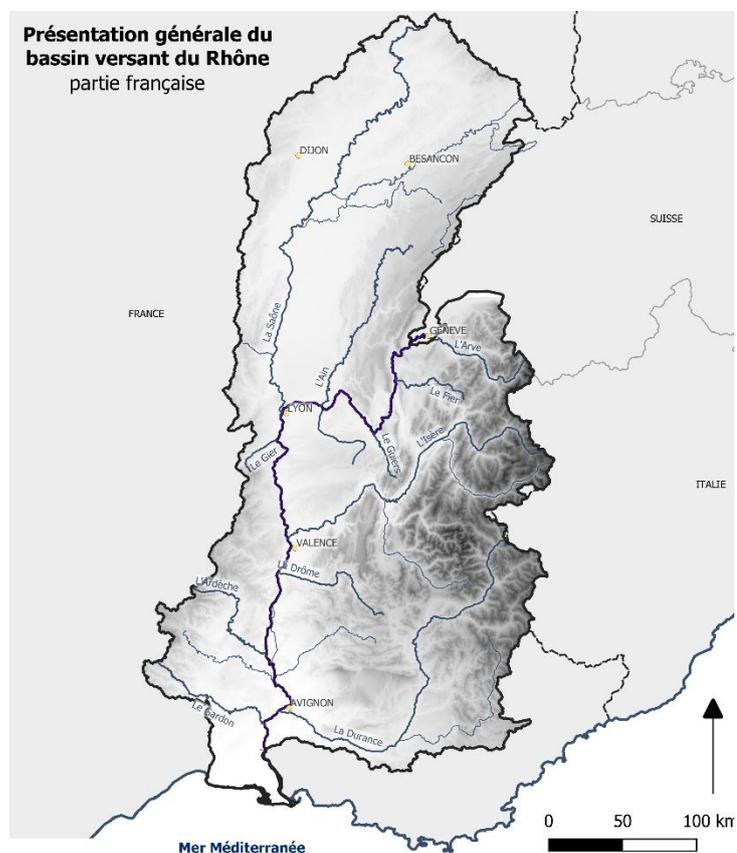


Figure 2 : Présentation générale du bassin versant du Rhône

⁷ Source : www.graie.org/osr/IMG/pdf/S4_v2.pdf

versant, de 98 500 km², est largement montagneux : 50% de son bassin versant est situé au-dessus de 500 mètres d'altitude et 15% au-dessus de 1500 mètres d'altitude (Tockner, 2009). Son module passe de 250m³ à Genève à près de 1700 m³ à l'embouchure. Les affluents du Rhône présentent des fonctionnements hydro-sédimentaires très variés et produisent selon leurs caractéristiques, des volumes différents de MES. Ci-dessous, sont présentés des sous-affluents du Rhône, témoins des différents contextes sédimentaires. Les lônes sont des bras morts d'un cours d'eau encore connectés au cours d'eau lors des crues (Figure 3). Les gorges sont le résultat de la dissolution d'un massif calcaire et leur tracé n'est pas linéaire (Figure 6). L'Arc est une rivière torrentielle à la pente fortement inclinée et au débit très élevé (Figure 4). Le Buëch, rivière alpine au débit également élevé, déverse graviers et sédiments dans la Durance ce qui engendre des risques d'inondations sur la Durance (Figure 5).



Figure 3: Lône de la basse vallée de l'Ain. Source: Conservatoire d'espaces naturels Rhône-Alpes



Figure 6: Gorges du Chassezac, affluent principal de l'Ardèche Source: cevennes-ardeche.com



Figure 5: Gestion sédimentaire du Buëch, affluent de la Durance. Source : Le Dauphiné.



Figure 4: Arc, affluent de l'Isère. La Chambre (73)

1.2 - Contexte climatique

Les précipitations liquides sont souvent considérées comme facteur principal de l'érosion hydrique (Montier, Daroussin, King, 1998, Le Bissonnais, 2002). Le bassin versant du Rhône compte plusieurs zones climatiques d'influence majoritairement océaniques avec des précipitations modérées en toutes saisons. Le nord du bassin et les zones montagneuses reçoivent le plus de précipitations et l'altitude affecte la durée et la dureté de la couverture neigeuse. L'est du bassin versant présente des orages d'été d'influence continentale et des températures hivernales basses dans la vallée de la Saône. La zone sud est sous influence climatique méditerranéenne, avec des étés chauds et secs et les précipitations se concentrent en printemps et en automne. Le cumul des précipitations s'y situe autour de 600 mm/an mais elles peuvent y être très intenses (>600 mm/an en quelques jours) dans les Cévennes (1600m d'altitude) en septembre et en octobre. Cette zone est influencée par des masses d'air chaud et à basse pression venant du nord de la Méditerranée. L'amont de la vallée de l'Isère (Arc) et la vallée du Rhône (au sud de Lyon) présentent de plus faibles précipitations et sont influencées par le Mistral (Tockner, 2009).

1.3 - Contexte géologique

La lithologie représente la nature physique ou chimique des roches. Selon ses caractéristiques, chaque roche a une propension à l'érosion propre. Le bassin rhodanien est un bassin sédimentaire niché entre le Massif Central et les chaînes subalpines et provençales. La vallée du Rhône a connu différentes phases de formation : marines, continentales et fluviales, accompagnées de mouvements tectoniques consécutifs à la surrection des Alpes⁸. Elle existe géologiquement depuis le Miocène. Elle n'a néanmoins comme seule individualité morphologique que d'être la vallée d'un grand fleuve. Tout au long de cette vallée se succèdent des bassins tertiaires plus ou moins vastes : Bas-Dauphiné, Montélimar, Tricastin, Valréas-Vaison, Avignon-Carpentras, Bas-Rhône. Ces bassins sont séparés les uns des autres par des seuils datant du mésozoïque qui résultent des plissements provençaux ou alpins⁹.

1.4 - Contexte lié à l'utilisation anthropique des sols

Le sol est la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous l'action du climat et des organismes vivants. En fonction de ses caractéristiques, chaque sol est sensible différemment à l'érosion hydrique (Ben Hammadi, 2005). En Figure 7 est une représentation de la nature de l'occupation du sol sur le bassin. Elle dépend de spécificités pédologiques, climatiques géomorphologiques (Tockner, 2009) et de l'utilisation anthropique qu'il en est faite. L'agriculture est axée principalement sur la production végétale (viticulture, horticulture, arboriculture)¹⁰. Les aires montagneuses ont été majoritairement utilisées pour l'élevage et la production laitière. Elles ont cependant été largement reforestées durant le XXème siècle. Aujourd'hui, plus de 30% du bassin du Rhône est recouvert par des forêts. Les essences présentes sont des conifères (sapin, épicéa), des feuillus (chêne, hêtre) et des plantations de peupliers dans les vallées alluviales (Tockner, 2009).

Occupation du sol simplifiée du bassin versant du Rhône - 1/100 000

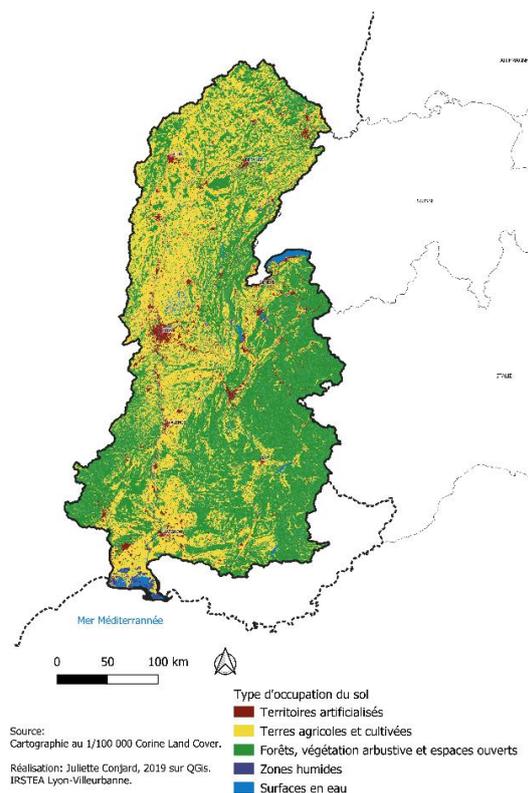


Figure 7: Nature de l'occupation du sol simplifiée

⁸ Source : www.vinsvignesvignerons.com/Gologie/Geologie-de-la-France/La-Vallee-du-Rhone

⁹ Source : http://geologie-alpine.ujf-grenoble.fr/articles/GA_1980_56_59_0.pdf

¹⁰ Source : www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/sdage/docs-complementaires/tableau_bord/2013/TBD2013_portrait-bassin.pdf

1.5 - Contexte – aménagements du fleuve

Le fleuve a connu à partir du XIX^{ème} siècle jusqu'à nos jours, une série d'aménagements successifs. Au XIX^{ème} siècle, le Rhône a été chenalisé pour la navigation. Au XX^{ème} siècle, son cours fut entrecoupé d'aménagements hydroélectriques (retenues, barrages, réservoirs) (Bravard et Clémens, 2008). Cela modifia complètement la morphologie du fleuve, son régime naturel et les dynamiques d'écoulement sédimentaire (Bravard, Clémens, 2008 ; Marnézy, 1999 *in* Bertrand, 2009). Aujourd'hui, le bassin Rhône et côtiers méditerranéens produit à lui seul 60% de l'énergie hydroélectrique nationale. Il possède un important réseau d'aménagements hydro-électriques :

- Aménagements au fil de l'eau pour la production de base (pas de stockage d'énergie)
- Aménagements en écluses (stockage de l'énergie faible)
- Aménagements dits de lacs (stockage de l'énergie important)
- Stations de transfert d'énergie par pompage (réservoirs d'altitude)¹¹

Une partie des sédiments est stockée près de ces aménagements (Roux, 1984 *in* Tockner, 2009) et la vitesse globale de transport des sédiments est réduite (Bravard et Clémens, 2008). Marnézy (1999 *in* Bertrand, 2009) précise que les teneurs et les flux de matières en suspension véhiculées sont particulièrement impactés. Ces sédiments sont reconnectés au réseau hydrographique soit naturellement par le biais de crues, soit artificiellement par le biais de chasses (Figure 8).



Figure 8: Opérations de gestion sédimentaire sur le Haut-Rhône à Seyssel. Compagnie Nationale du Rhône, 2016.

2. Méthodes d'estimation de la production sédimentaire dans les cours d'eau

Cette partie suit une logique en entonnoir, de méthodes quantitatives appliquées au cours d'eau aux méthodes quantitatives appliquées au bassin versant pour aboutir aux méthodes semi-quantitatives et qualitatives multicritère, appliquées au bassin versant.

2.1 - Méthodes quantitatives appliquées au cours d'eau

La quantité de matières en suspension dans un volume d'eau est appelée la concentration. Elle est mesurée en un point et est usuellement exprimée en mg/L. Le débit d'un cours d'eau est exprimé en L/s et représente le volume d'eau qui transite en un point

¹¹ Source : www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/dce/etat-des-lieux/175-180q04.pdf

en un intervalle de temps. En combinant concentration et débit, on peut extraire la quantité de sédiments qui transitent en un point en un intervalle de temps. On appelle cette relation le flux instantané de MES et il est exprimé en t/s. Introduire le concept de flux permet de considérer le stock de sédiments comme mobilisable et donc potentiellement transportable jusqu'au Rhône. Les flux ne peuvent être calculés que lorsque les concentrations sont connues.

2.1.1. Méthodes de détermination des concentrations en MES

Les concentrations mesurées de matières en suspension représentent une quantité de matière dans un volume donné d'eau. Une quantité de matière importante dans un volume d'eau nul stagnera et ne pourra être mobilisé qu'en cas de crue. C'est pourquoi il est important de prendre en considération cette variable. En premier lieu, il est possible d'estimer les concentrations de MES sur l'ensemble du bassin versant en mesurant (à partir d'échantillons filtrés) ou en estimant (mesure de la turbidité et transformation en concentration en MES) les concentrations de MES en plusieurs stations (Launay, 2014).

2.1.1.1. Détermination des concentrations en MES par mesures directes

Les concentrations en MES peuvent être déterminées de manière directe par prélèvement (Launay, 2014) et a posteriori par filtration/pesée (Antoine, 2013 ; Launay, 2014). Plusieurs stratégies de prélèvement existent. Le prélèvement peut être manuel et ainsi effectuer des prélèvements au seau depuis le cours d'eau ou avec une benne (Figure 9)¹² depuis un pont par exemple (Antoine, 2013). Cette méthode implique des contraintes physiques et techniques dans la récolte des prélèvements (Antoine,



Figure 9 : Bennes à sédiments type Van Veen pour extraction du haut d'un pont - SDEC

2013). C'est pourquoi des systèmes de prélèvements automatiques sont souvent préférés. Parmi ces systèmes, il y a l'**échantillonneur automatique** (Annexe 1a). Une crépine d'aspiration est installée dans la colonne d'eau. Une pompe prélève toutes les 30 secondes des échantillons normés en volumes, qui seront directement analysables en laboratoire (Antoine, 2013). Peut également être utilisé un **collecteur de matières en suspension** (Annexe 1b), tube de PVC avec un filtre en tissu à mailles calibrées. Ce collecteur échantillonne les sédiments en suspension sur plusieurs jours et est placé en laboratoire une semaine sur un banc de filtration. Cette technique permet d'évaluer les variations spatiales des flux de MES le long du cours d'eau. Ce dispositif est facile à installer et à relever. Il peut néanmoins facilement être obturé ce qui implique des chroniques de données incomplètes (Birgand¹³, 2004). Un autre système qui peut être utilisé est le **piège à particules** (Schulze et al., 2007 in Le Bescond, 2017), boîte en inox percée de 3 trous sur les faces avant ou arrière pour faire passer l'eau (Annexe 1c). En faisant chuter la vitesse de l'eau par des cloisons internes, les MES se décantent dans des paniers amovibles dans le piège. Ce dispositif

¹² Source image : www.sdec-france.com/prelevement-echantillons-sediments-semi-remanies.html (Solutions Technologiques pour l'Environnement)

¹³ Source : www.graie.org/osr/IMG/pdf/2017.12_rapportiii2_14122017-berni.pdf

permet d'échantillonner les pics de flux de MES sur une longue période. Les pièges sont récoltés toutes les deux à quatre semaines, leur maintenance est aisée et peu coûteuse (Le Bescond, 2017).

Les mesures de concentrations et de flux en MES sont, pour des raisons techniques et économiques, peu nombreuses et sont situées en exutoire de bassin versant. De ce fait, de telles mesures, bien que réelles et non estimées, ne représentent pas la variabilité interne des apports en sédiments du bassin versant (Birgand, 2004). Ces mesures sont soit acquises par prélèvement automatique, technique coûteuse donc difficilement multipliable, soit par prélèvement manuel, impliquant alors un échantillonnage manuel discutable en terme de représentativité des mesures (Birgand, 2004).

2.1.1.2. Estimation des concentrations en MES par mesure de la turbidité

A ces mesures se substituent souvent des estimations, issues de la mesure de paramètres moins coûteux en temps, énergie ou personnel. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la mesure de **turbidité** pour estimer les concentrations en MES en continu (Launay, 2014). L'outil le plus communément utilisé est le capteur de turbidité (Birgand, 2004) ou « turbidimètre » (Gilliet *et al*, 2018) (cf. Figure 10). Il mesure la réduction de la transparence de l'eau due à la présence de matières

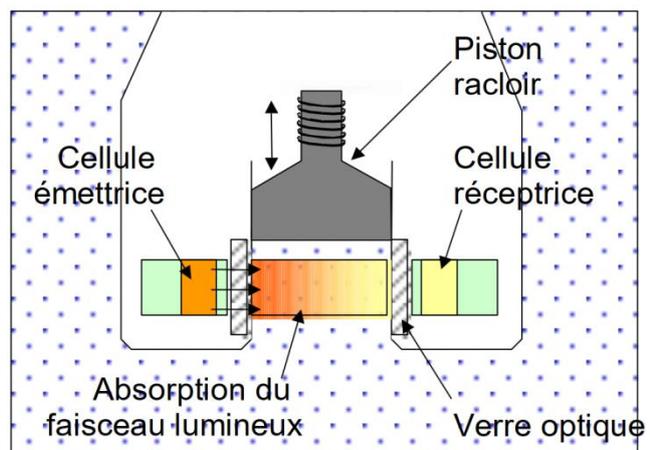


Figure 10: Principe de mesure d'un turbidimètre.
Source : Gilliet *et al*, 2018

en suspension (AFNOR, 2016 *in* Le Bescond, 2017)¹⁴. On peut à partir de ces données, estimer les concentrations en MES. En Annexe 3, se trouve un tableau récapitulatif de ces méthodes de mesures.

Ces outils permettent de mesurer en un point, sur une période donnée et avec un intervalle de temps déterminé, les concentrations en MES. Un nombre important de mesures, à pas de temps restreint et régulier permet de représenter efficacement les effets locaux spatiaux et temporels. Les zones d'implémentation des outils de suivi des concentrations en MES, de contaminants et de débit sont appelées des **stations**. Si le suivi y est ponctuel, ces stations sont temporaires, s'il y est pérenne, ces stations sont qualifiées de permanentes. Ces stations peuvent être situées soit sur le fleuve, soit à la confluence affluent-fleuve. Un nombre de stations important permet de mettre en exergue les spécificités sédimentaires et les variations d'apports en sédiments des affluents du cours d'eau principal. Des stations sur le cours d'eau principal permettent de prendre en compte le changement dans l'écoulement des eaux et l'intégration de cet apport sédimentaire des affluents dans le cours d'eau principal.

¹⁴ Il s'agit d'un capteur optique qui est plongé dans l'écoulement et qui mesure la turbidité locale de l'eau, au voisinage de la sonde, par rétrodiffusion. Cette technique utilise un signal infrarouge et son atténuation ou diffusion témoigne de la présence de matières en suspension (Le Bescond, 2017). Plus de détails en Annexe 2.

2.1.2. Méthodes d'estimation des flux de MES

Cette quantité de matière en suspension se mobilise en fonction du débit du courant (en m³/s). Le flux instantané de MES $\phi(t)$ représente cette relation (en kg/s ou en t/s), soit la quantité de sédiments mobilisés, dans un volume, en une durée spécifique. Si le débit est trop faible, les sédiments ne seront pas mobilisés et ne parviendront pas au fleuve. Or, un stock de sédiment produit mais non connecté au fleuve est hors de notre champ d'étude. Le calcul des flux de MES est généralement effectué à partir d'un jeu de données de débit continu et d'un jeu de concentrations en MES discontinu (Launay, 2014). Les flux sont donc par nature obtenus à des pas de temps discrets (Raymond, 2011). Diverses méthodes de calcul des flux de MES ont été développées au cours des trente dernières années. Elles cherchent toutes la meilleure exploitation possible des deux chroniques (débit et concentration en MES) disponibles à des pas de temps différents (Launay, 2014).

Tout d'abord, il y a les méthodes d'interpolation, basées sur une moyenne des concentrations en MES et des débits mesurés au cours de la période (Raymond, 2011 ; Launay, 2014). Elles permettent une estimation directe du flux à partir des données discrètes de concentration en MES. Ensuite, il y a les méthodes d'extrapolation, basées sur une relation de régression logarithmique entre les variables, qui permettent de reconstituer une chronique de concentration en MES au pas de temps de la chronique de débit (Raymond, 2011 ; Launay, 2014).

Ces méthodes permettent d'estimer la production sédimentaire d'un bassin par la mesure des concentrations en matière en suspension en un point, sur un laps de temps défini. Ces concentrations, liées au débit via le concept de flux, sont considérées représentatives de la production sédimentaire à l'amont. Plusieurs stations permettent d'avoir une idée plus précise de l'apport de chaque affluent.

2.2 - Méthodes quantitatives appliquées au bassin versant :

Une autre approche consiste à relier les flux de sédiments à l'exutoire à la quantité de sol érodée sur le bassin versant (Delmas, 2011 *in* Launay, 2014). L'érosion peut ainsi être estimée en utilisant le Sediment Delivery Ratio mais aussi la modélisation hydro-sédimentaire.

2.2.1. Sediment Delivery Ratio

De nombreuses études utilisent le « Sediment Delivery Ratio » (SDR) (Walling, 1983), défini comme le rapport entre l'érosion produite sur l'ensemble du bassin versant et le flux spécifique de sédiments à l'exutoire du bassin versant. Le SDR s'exprime pour un bassin en particulier et varie en fonction de facteurs environnementaux et géomorphologiques dont la nature, l'étendue et la localisation des sources de sédiments, le relief et les caractéristiques de la pente, la densité de drainage, la couverture végétale, l'occupation du sol et la texture du sol (Walling, 1983). Néanmoins, Walling (1983) note que le SDR décroît généralement

quand la surface du bassin augmente (dû à une augmentation des opportunités de dépôt de sédiment). Plusieurs études ont avancé diverses expressions du SDR afin de prendre en compte l'aire du bassin versant (Walling, 1983). Cependant, cette relation est très variable selon les études (De Vente & Poesen, 2005 *in* Launay, 2014) et l'aire du bassin versant ne saurait être le seul paramètre explicatif de ces écarts de valeur (De Vente & Poesen, 2005 *in* Launay, 2014 ; Walling, 1983).

2.2.2. Modélisation hydro-sédimentaire : simulation de la production sédimentaire

Un **modèle** est une abstraction de la réalité qui décrit un processus et permet de représenter un système complexe. Un modèle d'érosion décrit l'érosion hydrique d'une zone (bassin versant, rivière) et les facteurs influençant ce processus, dans le temps et/ou dans l'espace. Les facteurs contrôlant ce processus sont dépendants de l'objectif original du modèle (Bertrand, 2009). Il existe plusieurs types de modèles pour prédire l'érosion et le transport des sédiments. Les différences entre modèles portent notamment sur les options de simulation en termes de :

- Discrétion spatiale : les modèles peuvent être globaux (*i.e.* considérant le bassin versant comme une seule entité homogène) ou distribués (*i.e.* spatialisés : le bassin versant est découpé en mailles régulières) *e.g.* KINEROS (Le Roux, 2007). Certains modèles sont semi-distribués : le bassin versant est divisé en unités basées sur une certaine homogénéité en terme de nature du sol, de pente ou d'occupation du sol par exemple (Macary, 2013). C'est par exemple le cas des SMU (Soil Mapping Unit) de l'Europe Soil Database composés de plusieurs Soil Type Unit (STU) (Van Der Knijff *et al.*, 2000)).

Le choix du modèle dépend de l'échelle spatiale mais également temporelle de la modélisation (Macary, 2013).

- Échelle temporelle : les modèles peuvent simuler l'érosion en continu (*e.g.* SWAT, AGNPS, ACRU) ou à l'échelle d'événements (*e.g.* KINEROS¹⁵) pour simuler des crues notamment (Macary, 2013 ; Bertrand, 2009). Une modélisation au pas de temps long rend la description des processus hydrologiques plus simple qu'une modélisation au pas de temps court (Macary, 2013).
- Phénomènes hydro-sédimentaires : les modèles peuvent également être liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins importante de ces équations (Macary, 2013).

Dans un récent inventaire, Karydas *et al.* (2014) ont ainsi identifié 82 modèles hydrologiques à diverses échelles spatiales et temporelles, aux divers niveaux de complexité (Panagos, 20015). Se distinguent trois grandes catégories de modèles : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles à base physique (Launay, 2014).

¹⁵ Modèles Soil & Water Assessment Tool (SWAT), AGricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS), Agricultural Catchment Research Unit (ACRU) et Kinematic Wave Overland Flow, Channel, Routing and Erosion Model (KINEROS).

2.2.2.1. Les modèles d'érosion empiriques

Un modèle empirique est une relation mathématique issue d'observations menées sur le terrain mais qui n'est pas reliée à une base théorique. Historiquement, les modèles d'érosion furent d'abord empiriques (Bertrand, 2009).

La majorité de ces modèles sont calqués sur l'équation universelle de perte des sols USLE (Universal Soil Loss Equation) définie par Wischmeier et Smith (1958, 1978) (Bertrand, 2009 ; Launay, 2014 ; Panagos, 2015) et sa version révisée RUSLE (Renard et al, 1997 *in* Panagos, 2015). Cette équation a été conçue pour estimer l'érosion à l'échelle d'une parcelle agricole (Bertrand, 2009) mais est régulièrement employée à l'échelle du bassin versant en adaptant les paramètres du modèle (Mano, 2008). C'est une multiplication d'indices associés à plusieurs paramètres climatiques, topographiques, liés à la couverture du sol et aux pratiques culturales : l'érosivité des pluies, la sensibilité du sol à l'érosion, la pente, la longueur de la parcelle, la couverture végétale et les aménagements anti-érosifs (Bertrand, 2009). Plus récemment, Delmas *et al.* (2009) a mis en place un modèle empirique dont l'ambition était de décrire les processus majeurs de production et de transfert des sédiments au sein de 29 bassins versants européens. Il a ainsi pris en compte l'érosion moyenne (source de particules), la mise en mouvement des particules (transport), le transfert par les cours d'eau décrit par la densité du réseau de drainage (transport) et le dépôt des particules sur le versant (pertes pendant le transport) (Launay, 2014).

Cette équation a de nombreuses fois été associée aux SIG (Bertrand, 2009). Elle permet donc d'exprimer l'érosion nette d'un bassin versant et ne prend pas en compte le transfert des sédiments dans le cours d'eau et donc le Sediment Delivery Ratio (Launay, 2014). L'inconvénient de ces modèles est que leurs résultats sont rarement validés par manque de mesures à cette échelle spatiale et temporelle (Bertrand, 2009).

2.2.2.2. Les modèles d'érosion conceptuels

Un modèle conceptuel considère dans le bassin versant des stocks disponibles de sédiments appelés réservoirs, qui sont connectés entre eux (Launay, 2014 ; Macary, 2013). Les paramètres de vidange de ce stock sont fonction de plusieurs facteurs et notamment des types de sols et des couches géologiques. Ils intègrent sous forme simplifiée les paramètres du cycle de l'eau (Macary, 2013). La méthode utilisée dans le cadre d'un modèle conceptuel peut être rapprochée de celle de la dynamique des systèmes théorisée par J.W Forrester dans les années 1960. Ce modèle se base sur un système de stocks et de flux modifiant l'état des stocks en fonction de variables auxiliaires. Les stocks pourraient représenter les sédiments, les flux l'érosion et les variables auxiliaires des facteurs tels que la pente ou l'occupation du sol.

Les modèles d'érosion conceptuels permettent de mieux comprendre les écoulements au sein d'un bassin versant et la variabilité du système tout en présentant une simplification de l'expression des processus en jeu par rapport aux modèles physiques (Beckers & Degré, 2011 *in* Macary, 2013). Un modèle d'érosion conceptuel permet de représenter les principaux processus intervenant dans la production et le transfert des sédiments vers le cours d'eau, mais ne décrit pas la physique des processus locaux. Les

modèles conceptuels prennent en compte davantage de paramètres que les modèles empiriques et en ça, sont plus complexes (Launay, 2014).

2.2.2.3. Les modèles d'érosion à base physique

Dans la continuité des modèles conceptuels, des modèles à base physique furent mis en place afin de mieux comprendre et quantifier les processus d'érosion (Bertrand, 2009).

Les modèles à base physique (ou modèles basés sur les processus) visent à représenter les principaux mécanismes de contrôle des processus d'érosion par la résolution d'équations (Bertrand, 2009). Ils reposent sur des lois physiques relatives aux processus hydro-sédimentaires (Macary, 2013), telles que les équations de conservation de la masse, de la quantité du mouvement et de l'énergie (Launay, 2014). Plusieurs modèles hydrologiques s'appuient sur l'équation de Darcy (1856), calculant la dissipation de l'énergie mécanique en sols saturés, et l'équation de Richards (1931), calculant le mouvement de l'eau en sols non saturés (Macary, 2013). Des algorithmes sont mis en œuvre pour résoudre les équations en chaque point du maillage (Lagadec, 2017). Chaque élément possède une représentation physique (cuvettes, talwegs, surface) avec une logique d'écoulement et des caractéristiques du sol qui lui correspondent, auxquelles est intégré le forçage climatique (les données pluviométriques notamment) (Lagadec, 2017). Ces modèles décrivent le transport des sédiments en intégrant les phénomènes de dépôt, d'érosion et de ruissellement (Launay, 2014). Les processus sont décrits à une échelle d'observation fine (Launay, 2014), mais nécessitent de fait un temps et une puissance de calcul importants ainsi que de nombreuses données d'entrée (Launay, 2014 ; Macary, 2013) notamment au niveau des paramètres descriptifs du sol. De fait, l'application des modèles à base physique est limitée à des espaces restreints (Ambroise, 1998 ; Payraudeau, 2002 *in* Macary, 2013).

Ces modèles permettent de simuler l'érosion en continu mais aussi 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 (Bertrand, 2009). Il est à noter que les modèles travaillant à partir d'événements requièrent moins de données que les modèles dont la simulation est continue (Bertrand, 2009).

Ces différents modèles ont été adaptés depuis ces 30 dernières années pour être appliqués dans des SIG afin de pouvoir spatialiser les phénomènes d'érosion (Bertrand, 2009). Le niveau d'organisation spatiale étudié détermine la méthode à utiliser et les données disponibles.

2.3 - Méthodes qualitatives et semi-quantitatives appliquées au bassin versant : par analyse spatiale multicritère intégrée à un SIG

La production sédimentaire peut être estimée autrement que par des méthodes quantitatives. Il existe ainsi de nombreuses méthodes qualitatives et semi-quantitatives. L'analyse spatiale et l'analyse multicritère en sont deux et elles peuvent être combinées.

2.3.1. Analyse spatiale et production sédimentaire

A l'application de modèles d'érosion, plusieurs auteurs ont préféré réaliser une analyse spatiale (Launay, 2014 ; Bertrand, 2009, Macary, 2013). C'est le cas de Latulippe (1995), Brochot (2000), l'INRA (2000), Bertrand (2009), Irstea avec la méthode IRIP (Lagadec, 2014). **L'analyse spatiale** est une approche géographique qui étudie les localisations et les interactions spatiales en tant que composantes actives des fonctionnements socio-naturels. L'espace est étudié par ses arrangements spatiaux : formes, organisations, ou structures de tout ordre (Brunet, 1980 *in* Macary, 2013). L'analyse spatiale prend ainsi en compte l'organisation de l'espace (héritages physiques ou humains) et les dynamiques entre ses composants. Caractériser les volumes de MES implique de considérer le sédiment fin en tant que partie de plusieurs héritages, témoin de plusieurs contextes géologique, géomorphologique, pédologique, climatique etc. Cela implique de prendre en compte ces héritages et leurs interactions potentielles, en admettant qu'ils ont pu être coconstruits et qu'ils peuvent encore évoluer. Il s'agit également de prendre en compte le fait que le sédiment peut migrer sous l'action du transport fluvial. Ainsi trois espaces se distinguent : l'espace de production, l'espace de transfert et l'espace d'accumulation des sédiments. Cette analyse se propose de se concentrer sur l'espace de production, tout en gardant en tête l'existence des deux autres types d'espaces. Rappelons en effet que le but de cette analyse est de caractériser les volumes de MES potentiellement mobilisables et transportables au fleuve Rhône.

Cette méthode permet de réaliser une analyse à toutes échelles, spatiales et temporelles, en fonction des données disponibles (Bertrand, 2009). Les données ne représentent pas forcément le même type d'information (dans le thème ou l'unité) et les croiser en combinant leurs effets permet de faire ressortir des zones plus ou moins sensibles (Lagadec, 2017). Cela permet notamment de pallier le manque de données en continu et à un maillage régulier.

2.3.2. Analyse multicritère et production sédimentaire

2.3.2.1. Définition et fonctionnement d'une AMC

Les problèmes environnementaux à référence spatiale sont considérés par plusieurs auteurs comme étant de nature multicritère (Laarbi, 2000).

L'analyse multicritère (AMC) a pour but de déterminer l'aptitude zonale, définie par les caractéristiques d'une zone ou d'un objet spatial, à répondre à une nécessité, à satisfaire des conditions préalablement établies ou à être favorable au développement d'un phénomène donné (Caloz et Collet, 2011 *in* Bascopé, 2015). L'aptitude zonale s'exprime par un indice représentant l'ensemble des éléments considérés influencer le phénomène, la décision à prendre etc. (Bascopé, 2015). Ce type d'analyse est beaucoup utilisée en tant qu'outil d'aide à la décision territoriale (Chevallier, 2016 ; Tacnet, 2010 ; Bassono, 2016 ; Yan, 2018 ; Evrard, 2016) et ce depuis les années 1970 (Roy, 1990 *in* Macary, 2014) et dans différents domaines (Scharlig, 1996 *in* Macary, 2014). Dans le cadre de notre analyse, l'analyse multicritère permet de déterminer l'aptitude zonale à engendrer la production de

matières en suspension. L'objet spatial est le bassin versant du Rhône et l'indice caractérisant l'aptitude zonale est appelée le « Potentiel production de MES ».

Une analyse multicritère suit globalement 5 étapes :

- Identification de l'objectif global de la démarche et de la nature de la décision à prendre, du phénomène à caractériser.
- Définir le nombre de solutions attendues (unique, multiples) et si multiples dresser ces solutions (en cas de solution unique comme c'est le cas ici, le but de l'AMC est de la définir).
- Dresser la liste des critères à prendre en compte et structuration (hiérarchisation)
- Juger chacune de ces solutions aux yeux de chacun des critères
- Agréger ces jugements pour désigner la solution qui obtient les meilleures évaluations / caractériser le critère unique de synthèse.

2.3.2.2. Types de méthodes multicritère

Les méthodes multicritère peuvent être regroupées en fonction de la façon dont les jugements sont agrégés (Scharlig, 1988 *in* Lehoux et Vallée, 2004). La plupart d'entre elles appartiennent à l'une des trois approches opérationnelles suivantes (Roy, 1985 *in* Macary, 2013) :

- L'approche du **critère unique de synthèse** (agrégation complète ou top-down approach). On cherche à agréger les n critères afin de les réduire en un critère unique. On suppose que les jugements sont transitifs : soit $a > b$ et $b > c$ alors $a > c$ (Lehoux et Vallée, 2004). Ces méthodes questionnent les critères, leur classement, leur agrégation autant au niveau local que global. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont : AHP, MAUT, GP, SMART, TOPSIS, UTA¹⁶ (Martel, 1999 *in* Macary, 2013), WLC et OWA¹⁷ (Balzarini, 2006).
- L'approche du **surclassement de synthèse** (agrégation partielle ou bottom-up approach). L'analyse débute par le classement des solutions et le but est tout au long de l'analyse, de les ordonner de la meilleure à la moins adaptée. Le critère de synthèse n'est donc pas unique et plusieurs solutions/combinaisons sont testées et comparées. On cherche à comparer les classements les uns aux autres et à établir entre eux des relations binaires de surclassement (Lehoux et Vallée, 2004, Balzarini, 2006). Les principales méthodes et familles de méthodes appartenant à cette approche sont : ELECTRE, QUALIFEX, MACBETH, ORESTE, PROMOTHEE, MELCHIOR, REGIM et NAIADÉ¹⁸ (Lehoux et Vallée, 2004, Balzarini, 2006, Macary, 2013). Cette approche correspond particulièrement à une approche d'aide à la décision territoriale. Dans tous les cas, cela correspond certainement à une nécessité de classement de solutions à apporter à un problème.

¹⁶ Analytic Hierarchy Process, AHP (Saaty, 1976), Multi Attribute Utility Theory, MAUT (Keeney et Raffia, 1976), Goal-Programming (GP), Simple Multi-Attribute Rating Technique (Edwards, 1971, 1977), Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) et Utilités Additives (UTA).

¹⁷ Weighted Linear Combination (WLC) (Eastman, *et al.*, 1995) Ordered Weighted Average OWA (Jang et Eastman, 2000)

¹⁸ ELECTRE I, II, III, IV (Roy, 1968 et +) QUALIFEX (Paelinck, 1976), ORESTE (Reubens, 1979), PROMETHEE I et II (Brans, 1980), MELCHIOR (Leclerc, 1984), REGIM (Nijkamp et Rietveld, 1983, NAIADÉ (Munda, 1995)

- L'approche du **jugement local interactif** (agrégation locale et itérative). En premier lieu, une première hypothèse de solution, de critère de synthèse est avancée. Par la suite, l'analyste procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution. Elle est basée sur une démarche cognitive, issue de l'interaction entre l'analyste et le décideur/le chercheur. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont : Interactive Goal Programming, STEM, PRIAM ¹⁹(Balzarini, 2006). Cette approche correspond particulièrement à une approche d'aide à la décision territoriale locale. En Annexe 4, est un schéma récapitulant les principales approches et méthodes associées.

2.3.3. Analyse multicritère à dimension spatiale

Initialement les méthodes d'analyse multicritère s'appuient sur des outils statistiques et des approches mathématiques. Les objets géographiques considérés sont souvent non continus dans l'espace : usines, villes par exemple. Ainsi Evrard (2016) utilise l'analyse multicritère pour rechercher les meilleures techniques de management industriel à l'échelle de l'Europe. Il cherche ainsi à déterminer les niveaux de consommations et d'émissions de polluants optimaux pour une installation industrielle. Son analyse aboutit au choix de l'installation qui représente le mieux ces niveaux. Différents outils statistiques peuvent être utilisés : analyse de corrélation (Evrard, 2016 ; Bertrand, 2009), analyses en composantes principales (ACP) (Béguin *et al.*, 2012, Bertrand, 2009, Evrard, 2016), classification ascendante hiérarchique (CAH) (Evrard, 2016 ; Latulippe, 1995 *in* Bertrand, 2009 ; Béguin, 2012), analyse factorielle de correspondance (Evrard, 2016, Latulippe, 1995 *in* Bertrand, 2009) ou méthodes statistiques de pondération des critères (Bertrand, 2009). Ces méthodes statistiques fonctionnent particulièrement bien sur des objets géographiques de taille restreinte dont les informations sont unifiées. Ces outils (explicités en Annexe 5) peuvent être en partie repris dans le cadre d'une analyse multicritère à dimension spatiale.

Néanmoins, les méthodes d'analyse multicritère purement statistiques ne sont pas toujours adaptées (Bascopé, 2015), notamment lorsqu'on considère un maillage du territoire continu. Elles arrivent difficilement à prendre en compte les critères à référence spatiale (Bascopé, 2015). Ainsi, à partir des années 1990, les méthodes d'analyse multicritère ont été combinées avec des SIG ou plus récemment couplées, c'est-à-dire intégrées dans le logiciel SIG (Macary, 2013). Les fonctionnalités des logiciels SIG ne sont pas spécifiquement conçues pour l'analyse spatiale des processus d'érosion, mais s'y prêtent très bien (Bertrand, 2009 ; Bascopé, 2015). L'algèbre de carte, les outils de superposition, d'extraction ou encore les outils d'analyse de terrain (e.g. morphologie, hydrométrie) sont particulièrement utiles. De plus, la mise en place d'un Système d'Information Géographique présente l'avantage prépondérant de permettre une visualisation du résultat de l'analyse sous forme de cartographie.

L'analyse multicritère sous SIG se présente comme une **analyse combinée de couches géographiques**. On distingue deux types de méthodes multicritère adaptées aux SIG : par sélection booléenne et par combinaison de facteurs pondérés.

¹⁹ Interactive Goal Programming (Dyer, 1972) STEM (Benayoun *et al.* 1971), PRIAM (Lévine et Pomerol, 1986)

2.3.3.1. Analyse multicritère par sélection booléenne

Cette méthode est issue des méthodes de surclassement de synthèse. Elle s'appuie sur la standardisation de l'ensemble des critères en deux classes : 1= favorable, apte et 0=défavorable, inapte. Chaque critère est ensuite combiné par multiplication en utilisant l'outil « calculatrice raster ». La carte ainsi produite propose plusieurs secteurs, qualifiés soit de favorable ou défavorable à l'objectif prédéfini. Cette méthode présente l'avantage d'être facile et rapide à mettre en œuvre. Néanmoins, elle apporte peu de nuances à l'analyse.

Exemple : La méthode IRIP (Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial) est une méthode de cartographie par combinaison géomatique d'indicateurs du paysage ayant une influence sur le ruissellement. Elle utilise trois entrées : la production, le transfert et l'accumulation. Elle peut être adaptée afin de caractériser les zones de production, de transfert et d'accumulation de matières en suspension (Lagadec, 2017). Des indicateurs du ruissellement sont déterminés et on y associe des facteurs de sensibilités en deux classes, auxquels on associe une valeur numérique 0 si défavorable, 1 si favorable. Ces indicateurs sont additionnés au sein de chaque entrée (production, transfert, accumulation) pour chaque sous-zone puis concaténés au sein de trois cartes de sensibilité. Ces cartes peuvent être par la suite croisées avec l'aléa pluviométrique (Lagadec, 2017).

2.3.3.2. Analyse multicritère par combinaison de facteurs pondérés

Cette méthode s'appuie sur l'approche du critère unique de synthèse. Elle suit sept étapes (Beck, 2017) :

- Choix des critères
- Collecte des données
- Transformation des couches
- Définition des catégories et attribution des valeurs à ces catégories (pondération intracritère)
- Reclassification des valeurs
- Pondération intercritère et somme
- Mise en forme des résultats

Cette méthode s'appuie sur deux phases de pondération (Beck, 2017). Une fois les critères définis, ses valeurs doivent être reclassées en plusieurs catégories ou classes. On associe à chacune de ces catégories une valeur (ou note, identifiant). A l'échelle nominale, il s'agit souvent d'un processus de généralisation. Les informations sont acquises en référence à un nombre de catégories élevé, puis regroupées selon un modèle hiérarchique (Caloz et Collet, 2011). C'est la pondération intracritère. Cela permet de reclasser chaque raster suivant une échelle commune. Ensuite, est associé à chaque critère un poids par rapport aux autres critères. Ces poids représentent l'importance de chaque critère dans la définition du critère de synthèse final. C'est la pondération intercritère. Ensuite, l'outil «calculatrice raster» est utilisé afin de calculer pixel par pixel la somme pondérée de chaque critère (Beck, 2017) dont voici la formule (Bertrand, 2009) :

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

Avec :

- S : la valeur finale du pixel
- N : le nombre de critères pris en compte dans l'établissement de la valeur finale du pixel
- W : le poids de chaque critère
- K : la valeur de la classe, donc la valeur initiale du pixel pour chaque critère.

Les pixels de chaque critère sont sommés. Plus la valeur est élevée, plus le lieu répond au questionnaire. Il est possible de normaliser le résultat pour obtenir des valeurs entre 0 et 1 (Beck, 2017). De façon analogue à la somme pondérée, on peut utiliser le produit pondéré (Yan, 2018).

Systeme de pondération :

Une superposition simple des critères permet déjà une hiérarchie. La pondération n'est pas essentielle, mais permet de nuancer l'influence de chacun des critères. La réflexion sur le système de pondération doit être soignée car la pondération est subjective. Il en existe plusieurs méthodes : la méthode AHP (impliquant une hiérarchisation) et la méthode MACBETH (comparaisons d'alternatives « triviales ») notamment. L'AHP est la méthode la plus couramment utilisée (Yan, 2018) et c'est celle qui sera utilisée dans cette analyse.

L'AHP (Analytic Hierarchy Process, analyse hiérarchique des procédés)

Cette méthode statistique proposée initialement par Thomas L. Saaty en 1980 est la plus simple des méthodes multicritère à mettre en place (Tacnet, 2010). Elle suit 4 étapes majeures.

1/ Décomposition du problème complexe en une structure hiérarchique :

Elle permet de décomposer un problème en critères et sous-critères de résolution (Chevallier, 2007) au sein d'une structure hiérarchique (Lehoux et Vallée, 2004) qui peut prendre la forme d'un arbre de pondération (Bertrand, 2009).

2/ Effectuer des comparaisons binaires (matrice non normalisée)

Les critères (et sous-critères) sont comparés deux à deux pour évaluer la dominance de chacun par rapport aux autres (Chevallier, 2007 ; Bertrand, 2009). Pour cela, est utilisée l'échelle de comparaison ci-contre (Figure 11). Les calculs se font à tous les niveaux de l'arbre. La somme des poids d'un niveau doit être égale au poids du critère ou sous-critère d'ordre supérieur (Bertrand, 2009).

Figure 11: Échelle de comparaison par paires selon Saaty (1980) in Chevallier, 2007

Degré d'importance	Définition de la valeur
9	Le critère est absolument plus important que l'autre
7	Le critère est beaucoup plus important que l'autre
5	Le critère est plus important que l'autre
3	Le critère est un peu plus important que l'autre
1	L'importance des deux critères est équivalente
1/3	Le critère est un peu moins important que l'autre
1/5	Le critère est moins important que l'autre
1/7	Le critère est beaucoup moins important que l'autre
1/9	Le critère est absolument moins important que l'autre

3/ Détermination et synthétisation des priorités (matrice normalisée)

Ensuite, l'analyste calcule l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente. Une matrice normalisée est mise en place, en divisant chacune des évaluations de l'étape 2 par la somme des évaluations de chaque critère.

4/ Cohérence des jugements

Il est important de vérifier que les jugements émis sont cohérents. Pour cela, un **indice de cohérence** noté IC est calculé.

Avec :

- K : le nombre d'éléments comparés
- λ_{max} : somme des valeurs des vecteurs propres de la matrice normalisée sur le nombre de critères

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

Un IC faible signifie une bonne cohérence des jugements. Un IC fort signifie qu'une trop forte dominance a été accordée à un critère par rapport à un autre et donc que les jugements ne sont pas cohérents.

Tableau 1 : Indice aléatoire en fonction du nombre de critères dans le cadre d'une AHP

Nombre de critères	2	3	4	5	6	7
Indice aléatoire IA	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32

Cet indice est ensuite comparé aux valeurs critiques obtenues par simulation, correspondant à l'**indice aléatoire** (Tableau 1) d'une matrice de même dimension.

Cette comparaison est effectuée par le calcul d'un **ratio de cohérence**, qui peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée de manière aléatoire. Il doit être inférieur à 10% sinon les jugements doivent être révisés (Bertrand, 2009).

Avec :

- RC : Ratio de cohérence
- IA : Indice aléatoire
- IC : Indice de cohérence

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Si le ratio de cohérence est inférieur à 10% alors la cohérence des jugements est bonne et les poids sont cohérents. A ce moment-là, les poids peuvent être appliqués aux jeux de données raster par le biais d'une somme pondérée. Note : la méthode n'est pas conçue pour comparer deux critères. C'est pourquoi nous appliquerons une AHP sur le premier niveau de l'arbre de pondération (critères) et une simple relation de proportion entre les sous-critères qui ne sont que deux.

Le bassin versant du Rhône est un bassin étendu qui n'est instrumenté que ponctuellement dans le temps et dans l'espace. Composé d'un ensemble de sous-bassins aux réalités sédimentaires différentes, il est l'héritier de plusieurs contextes géographiques qui entremêlés, le rendent plus ou moins sensible à l'érosion et susceptible de produire des

matières en suspension. Il s'agit alors de représenter, en fonction de ces réalités entremêlées, quelles surfaces du bassin produisent davantage de sédiments que d'autres et de les hiérarchiser, du plus producteur au moins producteur. L'analyse prendra soin d'étudier les caractéristiques intrinsèques du bassin (physiographiques) mais également externes par la prise en compte du forçage hydro-climatique. L'analyse spatiale multicritère par combinaison de facteurs pondérés semble tout à fait adaptée pour répondre à cette question et l'AHP semble constituer une méthode de pondération tout à fait pertinente. Cela permet de travailler sur des données de type et de résolution très diverses, et surtout de mailler de façon régulière le territoire. Ici, le résultat de l'analyse se présentera sous la forme d'une carte théorique du bassin maillée en pixels tous les 25 mètres, gradués en fonction de leur production potentielle de matières en suspension. Cette méthodologie présente l'intérêt de réduire les besoins en données mais aussi en logiciels et personnels. Seuls seront utilisés Excel pour la partie pondération et QGIS pour la partie traitement, analyse et mise en forme des données. Pour comprendre comment l'information géographique peut être formalisée en donnée spatiale, un récapitulatif est présenté en Annexe 4.

3. Mise en place de la méthode d'analyse spatiale multicritère sur le bassin versant du Rhône

« Il n'existe pas vraiment de relations simples entre l'érosion mécanique et chacun des facteurs supposés jouer un rôle déterminant sur l'érosion. Il s'agit ainsi de tenir compte de plusieurs facteurs simultanément pour comprendre les mécanismes qui règlent l'intensité de l'érosion mécanique des continents. » (Probst, 1992)

3.1 - Facteurs de production de MES : quels critères pour le bassin versant du Rhône ?

Dans le contexte morphoclimatique du bassin du Rhône, l'érosion par le vent, la gravité et les changements de température apportent bien moins de matières en suspension au fleuve que l'érosion par l'eau. Les principaux facteurs affectant les taux d'érosion par l'eau sont les précipitations, le type de sol, la topographie, l'occupation du sol et la gestion du sol (Panagos, 2015). Nous exposerons l'implication de chaque facteur dans l'analyse en cinq parties : géomorphologie, géologie, occupation du sol, aménagements anthropiques et facteurs hydro-climatiques.

3.1.1. Influence de la géomorphologie

Plusieurs facteurs géomorphologiques influent sur l'érosion hydrique et sur la production de MES : l'altitude, la pente, l'exposition et le volume et la répartition des formations superficielles (Brochot, 1998).

Introduction : de la topographie

La forme et l'organisation d'un bassin versant influencent la concentration des écoulements (Lagadec, 2015). Les caractères morphométriques (ou formes du relief) constituent les données mesurables d'une morphologie (Raymond, 2011). Douvinet *et al.*

(2008) dans une revue bibliographique ont recensé 63 indices les caractérisant (Annexe 7). Ces indices peuvent ainsi caractériser :

- La forme du bassin : e.g. coefficient de compacité (Gravelius), facteur de forme (Horton) ;
- Le volume du bassin : e.g. courbe hypsométrique (de Humboldt), dénivelée spécifique (Biro), angle moyen de la pente (Baulig), indice de pente (Lo et Mabrouk) ;
- Le réseau du bassin : e.g. rapport de bifurcation ou de confluence (Horton), longueur totale du réseau (Llamas), ratio de longueur ou indice de hiérarchie (Horton).

Ils se basent sur la forme, la longueur, la surface et le dénivelé du bassin et la forme des versants (Latulippe et Peiry, 1996). Certains de ces indices croisent deux caractéristiques. Par exemple, la densité de drainage (Horton) et l'indice topographique caractérisent tous deux la forme et le volume du bassin versant (Douvinet *et al.*, 2008 *in* Lagadec, 2017).

3.1.1.1. Influence de la topographie : altitude et pente

Le bassin versant du Rhône présente des altitudes très variables entre 0m au niveau de l'embouchure et du niveau de la mer et 4798m dans les Alpes (MNT, IGN, 2013). Probst en 1992 atteste qu'il est probable que l'altitude ne soit pas le paramètre géomorphologique qui explique le mieux l'érosion mais que ce soit plutôt les **pentés**²⁰. La pente participe aux phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur (Dumas, 2007), des pentes fortes et longues étant propices à la constitution de volumes importants (Hjerdt *et al.*, 2004 *in* Lagadec, 2017). L'inclinaison de la pente agit directement sur la vitesse de ruissellement et augmente l'ablation des matériaux détritiques, donc le transport solide vers le bas (Dumas, 2007). La longueur de la pente et sa forme (convexe, concave, homogène) ont une influence moins marquée et constante sur le volume de matériaux ruisselés (Wischmeier, 1974 ; Maurizot et Delfau, 1995 *in* Dumas, 2007). C'est pourquoi comme Bertrand (2009), Dumas (2007) et autres, cette analyse retiendra l'**inclinaison de la pente** sur la production de matières en suspension.

Collecte des données : A partir des altitudes de terrain, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) représente en 2.5D la surface d'une zone, sans prendre en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes et les bâtiments. La donnée brute disponible est un MNT fourni par l'IGN, sous forme d'un maillage carré de 25 mètres, ce qui constitue une résolution relativement précise. Le MNT permet de déduire la pente sur la zone ainsi que la forme des versants et ce, via des algorithmes SIG. Il s'agit tout d'abord de découper le MNT à l'échelle du bassin versant ainsi que de corriger ses anomalies en remplissant les « cuvettes ».

Il existe plusieurs algorithmes de calcul de pente à partir de données raster dont les algorithmes d'Horn (1981), Zevenbergen et Thorne (1987), désignés par Jones (1998) comme les plus performants parmi huit autres algorithmes (Bergot, 2010). Ces méthodes prennent en compte les pixels autour du point sans prendre en compte le point en lui-même. La méthode de Zevenbergen et Thorne s'appuie sur les diagonales particulièrement alors que

²⁰ Note : A altitude égale, les bassins à orogénèse récentes présentent des pentes et une érosion mécanique plus fortes que les bassins à orogénèse anciennes (Dumas, 2007)

celle d'Horn s'appuie sur les points adjacents²¹. Kienzle (2004) compare les pentes obtenues en utilisant ces deux algorithmes sur la base de rasters à différentes résolutions et montre que ces deux méthodes de calculs fournissent des pentes équivalentes (Bergot, 2010). Les deux sont disponibles sous QGis, il sera arbitrairement utilisé l'algorithme d'Horn.

3.1.1.2. Influence de la topographie : courbure de la pente

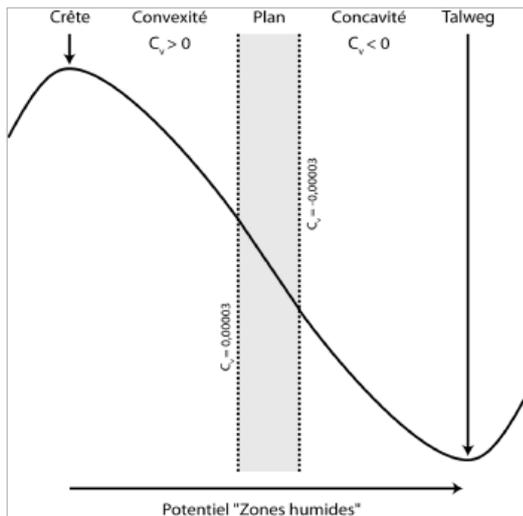


Figure 12: Classification simple des grandes formes du relief. Source: www.esrifrance.fr/sig2008/asconit.htm

La forme de la pente, dans une moindre mais non négligeable mesure, influe sur la production en sédiments fins au travers de sa courbure (convexe ou concave) (cf. Figure 12). Elle peut être étudiée sous trois dimensions : plane, tangentielle ou verticale (en profil) afin de caractériser les mécanismes de convergence ou de divergence, de ralentissement ou d'accélération des écoulements (Bergot, 2010). La courbure en plan affecte la convergence et la divergence de l'écoulement. La courbure en profil affecte l'accélération et la décélération des écoulements

de surface et de fait, l'érosion et le dépôt (Bergot, 2010). Ainsi, une courbure en plan vertical convexe favorise l'accélération des écoulements de surface et une courbure en plan vertical concave favorise leur ralentissement (Bertrand, 2009). De fait, les profils convexes sont ceux où se produit le plus d'érosion, à l'inverse des profils concaves qui reçoivent les dépôts (Auzet, 1989 ; Macary, 2013). C'est pourquoi cette étude considère les **courbures du relief en profil** (profile curvature), c'est-à-dire les courbures du relief en plan vertical.

Collecte des données :

Sera utilisé le même Modèle Numérique de Terrain corrigé que précédemment. Le calcul des concavités et convexités se fait à partir du module « Slope, aspect and curvature » de Saga Gis. Au sein de cet outil, on utilise l'entrée « Profile curvature ».

3.1.2. Influence des facteurs liés aux substrats géologiques

L'érosion hydrique peut être impactée par des facteurs liés aux substrats géologiques du bassin. Pech (1986) montre ²²ainsi que le volume annuel de matériaux produits dépend surtout des substrats, quels que soient les étages morpho-dynamiques et les processus en action (Brochot, 1998). L'étude du substrat géologique peut se faire suivant deux optiques

²¹ Source : www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/demb1f3n.htm

²² À partir de mesures dans la région de l'Ossola (Italie du nord) (Brochot, 1998)

différentes : celle de la lithologie (c'est-à-dire des types de matériaux) ou celle de la stratigraphie, de l'histoire géologique²³. La tectonique peut également indirectement influencer sur l'érosion de la zone (Brochot, 1998).

3.1.2.1. Influence de la lithologie

La lithologie représente la nature physique ou chimique des roches formant un ensemble géologique (massif, formation géologique, échantillon de roche). Elle représente le type de matériau qui peut se décrocher. L'érodibilité de ce matériau peut ainsi donner des indications sur la probabilité d'un sédiment appartenant à un ensemble géologique donné de se décrocher. La **lithologie** représente un critère commun à la majorité des analyses multicritère visant à qualifier l'érosion d'un bassin : dans Boughalem (2013), Dumas (2010), Latulippe et Peiry (1996), Bertrand (2009) par exemple.

Collecte de la donnée :

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) fournit un ensemble cartes numériques, disponibles sous forme scannée, vectorisée ou harmonisée, à différentes échelles. La BD Charm-50 est une base de données géoréférencées de cartes géologiques vectorisées et harmonisées, au 1/50 000, soit un point tous les 50 mètres. La base de données contient six couches d'informations détaillées au format shapefile, nous utiliserons la couche qualifiant les surfaces géologiques avec attributs (appelée S_FGEOL_CGH) au sein de laquelle les objets géographiques sont des polygones (et non des lignes ou points). Chaque département en possède une. Il s'agit alors de regrouper ces couches en une seule et de découper les zones du département ne faisant pas partie du bassin versant.

Ces bases de données géographiques contenant beaucoup d'informations, il est stratégique de regrouper les entités présentant les mêmes informations, afin d'alléger le poids du fichier et ainsi d'accélérer les traitements sur SIG.

3.1.2.2. Influence des formations superficielles

Les formations superficielles sont des formations continentales, meubles ou peu consolidées, provenant de la désagrégation mécanique et de l'altération chimique des roches, qu'elles soient restées sur place ou qu'elles aient fait l'objet d'un remaniement et d'un transport. Toute roche, quelle que soit sa genèse et son évolution, peut être ou devenir une formation superficielle (Joly, 1967). Du fait qu'elles sont altérées et peu consolidées, elles sont de fait, facilement mobilisables. Ces sédiments fins en cas d'événement pluvieux ou lors de la fonte des glaces et si connectés au réseau hydrographique, peuvent alimenter le Rhône.

²³ Source : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_01/010017058.pdf

Cas particulier - Les formations superficielles glaciaires et périglaciaires :

Un glacier rocheux est une masse de débris rocheux liée par de la glace, se déplaçant à très faible vitesse sur un versant. Ils sont constitués d'une grande quantité de matériaux fins en profondeur (Bertrand, 2009). Comparés à d'autres sources de sédiments en haute-montagne (e.g. moraines), les fronts des glaciers rocheux qui se meuvent rapidement, connectés à des chenaux torrentiels, dénotent d'une érosion et d'une activité de transfert des sédiments importante (Kummert *et al.*, 2017). 12% des glaciers rocheux actifs des Alpes française seraient en déstabilisation (Marcer, 2018). De plus, le mouvement du glacier rocheux favorise l'initiation de l'érosion en modifiant continuellement la pente de fond, ce qui cause des instabilités. Cela assure également un renouvellement continu de sédiments érodables (Kummert *et al.*, 2017). Or, les vitesses des glaciers rocheux augmentent substantiellement en raison du réchauffement des sols induit par le changement climatique dans les Alpes (Roer *et al.*, 2005; Kaufmann *et al.*, 2007; Ikeda *et al.*, 2008; Permos, 2016 in Kummert & Delaloye, 2018). Cette accélération accentue la chute des sédiments et augmente la disponibilité en sédiments dans les bassins torrentiels de haute montagne (Kummert *et al.*, 2017).

Un critère intéressant peut-être la surface des zones présentant des **formations superficielles**. Parmi elles, il peut être intéressant de prendre en compte les formations superficielles glaciaires et périglaciaires et en particulier les **glaciers rocheux**.

Collecte et données et discrimination du critère : La donnée récoltée pour qualifier les lithologies prend en compte la majorité des formations superficielles. Une cartographie plus détaillée ne s'est pas avérée disponible. Au niveau des glaciers rocheux, la cartographie de Marcer (2018) des glaciers rocheux alpins a été considérée. Néanmoins, deux obstacles se hissent. Tout d'abord, les glaciers rocheux couverts sont uniquement alpins (et non jurassiens) et ne représentent de fait qu'une partie du bassin du Rhône. Ensuite, pour constituer une source de MES mobilisable jusqu'au Rhône, les glaciers rocheux doivent être connectés à un bassin versant torrentiel. Estimer la connexion des glaciers rocheux au réseau hydrographique principal constitue un travail à échelle très fine qui n'entre pas dans le cadre de notre analyse. De fait, en raison du nombre potentiel de glaciers rocheux connectés et de leur aire de répartition à l'échelle du bassin versant du Rhône, l'influence de ces formations sur la production de MES du bassin est sûrement faible. Il est à noter également que dans les délais du stage, une convention n'a pu être mise en place pour récupérer la donnée. Ainsi, l'influence des glaciers rocheux sur la production de matières en suspension constitue une entrée intéressante qui serait sûrement plus facile d'application à l'échelle d'un bassin versant moins étendu. Aux glaciers rocheux sont associées des formations connexes telles que les éboulis fluants, ou protalus lobés, des « ice-cored moraines » ou « push moraines » (Bertrand, 2009). Les données ne sont, à cette échelle là, pas disponibles.

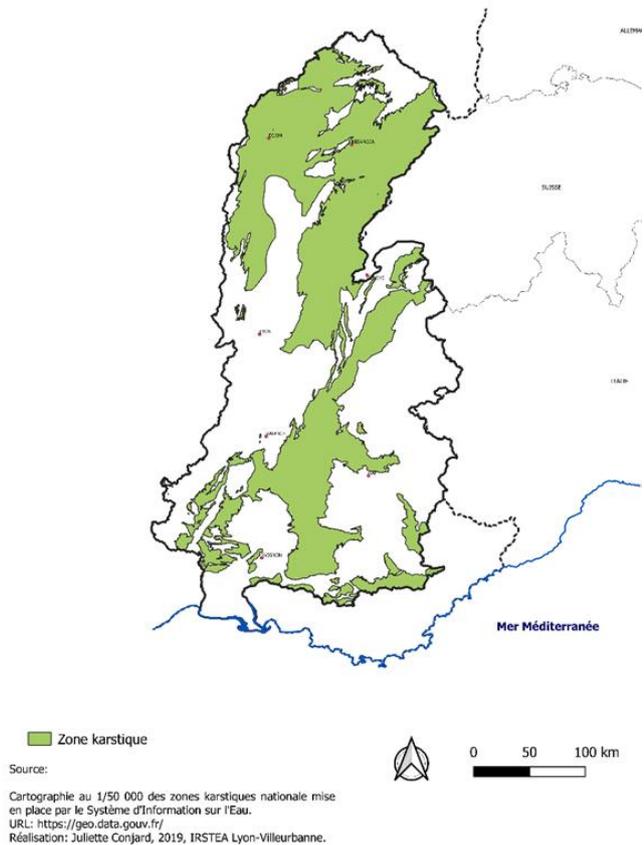
3.1.2.3. Influence des formations karstiques

Le **karst** est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique d'une roche soluble. Ces roches sont essentiellement carbonatées et correspondent majoritairement à des calcaires et à des marnes. Cette structure implique un réseau hydrographique souterrain très développé et un sous-sol creusé de nombreuses cavités. L'érosion interne des conduits karstiques conduit au relâchement de particules qui agrégées, peuvent constituer un stock de MES mobilisable (Ouvry, 2019).

Collecte et données et discrimination du critère

Le bassin versant du Rhône présente à la fois des karsts des hauts plateaux calcaires (e.g. Jura, Préalpes) et de montagne (e.g. massif des Bauges). L'inventaire des karsts constituant une entreprise minutieuse et coûteuse en temps, nous nous contenterons des données au 1/50 000 produites par le Système d'Information sur l'Eau en décembre 2018. Ces données regroupent les entités hydrogéologiques principales caractérisées, dans leur globalité, par un type de milieu « karstique » en intégrant les résultats de certaines études localisées. Cette base de données permet de mettre en exergue les secteurs où les karsts actifs sont à l'affleurement de ceux, supposés, qui se trouvent en profondeur sous d'autres entités hydrogéologiques non forcément karstiques. Cette cartographie expose ainsi les zones où le karst est potentiellement actif, c'est-à-dire où l'eau est potentiellement mobilisable et peut donc produire des matières en suspension (Figure 13).

Répartition des zones karstiques du bassin versant du Rhône



Néanmoins, le fonctionnement des karsts diffère selon la géologie (lithologie, tectonique : zones plissées ou tabulaires), la géomorphologie (montagne, plateau, cuesta), les conditions bioclimatiques, les couvertures de débris (Nicod, 1995). De fait, les volumes d'eau et les volumes de sédiments mobilisés diffèrent selon le type de karst. Ainsi, les karsts méditerranéens impliquent un taux de dissolution de la roche compris entre 3.5 et 57 (médiane : 31) m³/km²/an. Les karsts du gypse (Vanoise, Tarentaise, Maurienne) quant à eux impliquent une dissolution bien plus importante : entre 500 et 1541 (médiane : 949) m³/km²/an (Nicod, 1995). Le type de roche constituante du karst et notamment le type de calcaires influent grandement sur les volumes libérés. Cette information sera prise en compte dans l'étude des lithologies du bassin. Si l'inventaire des karsts était plus détaillé, il aurait fait sens de les dissocier. Or, il n'est ici pas possible de différencier les zones situées assez proches des cours d'eau pour contribuer potentiellement à l'apport en MES dans les cours d'eau. Par manque de précision des données et crainte de redondance entre critères, ce critère ne sera pas davantage considéré.

Figure 13 : Répartition des zones karstiques du bassin versant du Rhône

3.1.2.4. Influence de la stratigraphie : le métamorphisme

Le **métamorphisme** désigne l'ensemble des changements intervenant à l'état solide, dans la composition minérale d'une roche, soumise à des conditions de pression et de températures différentes de celles où elle s'est formée. La structure de la roche est déformée²⁴. Le métamorphisme joue un rôle très important sur le degré d'usure des roches, donc sur leur sensibilité à l'érosion (Bertrand, 2009).

Initialement, la roche a une stratification planaire. Sous l'effet du métamorphisme, les grains de la roche peuvent se réorienter suivant des plans parallèles (feuilletage puis schistosité) puis se compacter (foliation). Une roche présentant une schistosité est particulièrement sensible à l'érosion. En effet, elle a été déformée et est donc plus fragile, mais surtout ses grains sont particulièrement fins. Les roches foliées ont quant à elles été compactées et par ce fait, peuvent difficilement libérer des sédiments. Elles deviennent résistantes à l'érosion. La fragilité des roches est fonction des hautes pressions et températures, contraintes tectoniques, du degré d'enfouissement et des conditions hydro-climatiques (Bertrand, 2009). Il existe donc plusieurs degrés de métamorphismes que nous diviserons en plusieurs niveaux (Tableau 2) :

Structure des roches et degré de métamorphisme des roches du bassin versant du Rhône

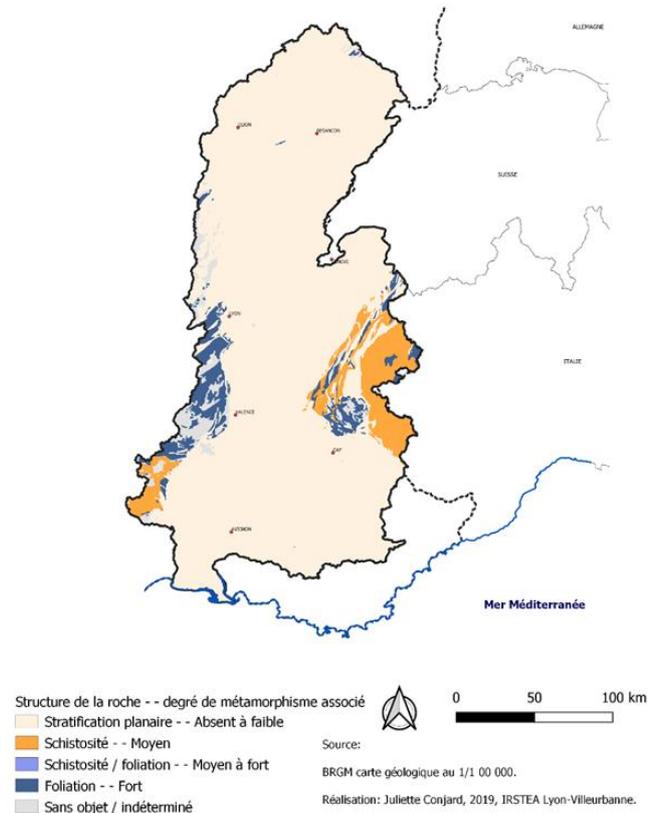


Figure 14 : Structure des roches et degré de métamorphisme des roches du bassin versant du Rhône – au 1/1 000 000

Tableau 2: Classification des degrés de métamorphismes en fonction de leur propension à produire des matières en suspension

Structures métamorphiques	Degré de métamorphisme	Potentiel de production de MES
Structures stratifiées planaires	Absent à faible	/
Structures présentant une schistosité simple (schistes bleus, schistes verts)	Moyen	Forte
Structures en phase de foliation (schistosité/foliation).	Moyen à Fort	/
Structures présentant une foliation (éclogite, anatexite, amphibolite).	Forte	Très faible

²⁴ Note : Certains éléments (e.g. minéraux, fossiles) peuvent servir de marqueurs de l'intensité de la déformation et donc du degré de métamorphisme (Dequincey, 2007).

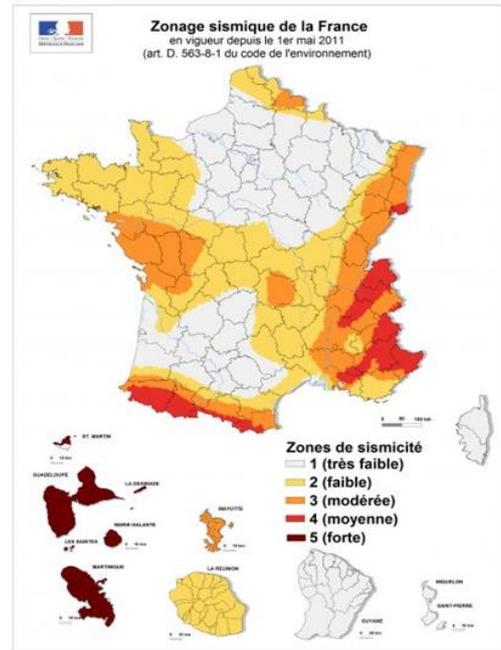
Selon la nature de la donnée relative aux lithologies, la question du métamorphisme peut être intégrée ou dissociée. Dans le cas de cette analyse, elle sera intégrée.

3.1.2.5. Influence de la tectonique

La **tectonique** peut avoir une influence indirecte sur l'érosion et la production de MES. En effet, elle peut avoir engendré la fracture de roches qui n'étaient pas spécialement érodables (Bernard-Allee, 1984 *in* Brochot, 1998).

Le bassin versant du Rhône est touché par un aléa faible à moyen (2 à 4) (Figure 15), ce qui est au-dessus de la moyenne française métropolitaine mais que l'on peut néanmoins considérer comme non significatif. Dans une analyse prédictive cependant, la sismicité aurait pu davantage être prise en compte.

Figure 15: Zones sismiques de France. Source: www.cnews.fr/france/2016-04-28/ou-sont-les-zones-sismiques-en-france-728341



➔ Ainsi, cinq critères reliés à la géologie du bassin peuvent être retenus : la lithologie, les formations superficielles, le karst, le métamorphisme et la tectonique. Cette analyse ne retiendra que le critère « lithologie », intégrant pour partie des informations issues des autres critères.

3.1.3. Influence des sols (pédologie)

Le sol est la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous l'action du climat et des organismes vivants. Il présente une intense activité biologique (insectes et racines) mais aussi des minéraux particuliers. Le sol, de l'ordre d'un mètre d'épaisseur en moyenne en France métropolitaine, s'étend de la surface de la terre jusqu'à la roche altérée (Lemercier et Walter, 2011). La formation des sols résulte généralement d'une évolution lente, dont la durée varie de plusieurs millénaires à plusieurs dizaines, voire centaines de millénaires (Lemercier et Walter, 2011). Néanmoins, à l'ère de l'Anthropocène, la nature de milliers d'hectares est modifiée pour les besoins grandissants de l'élevage et surtout de l'agriculture intensive, bousculant l'échelle de temps de construction et de renouvellement des sols. Les sols varient beaucoup dans le milieu méditerranéen et leurs caractéristiques peuvent permettre de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique (Ben Hammadi, 2005). Au niveau des sols, deux processus entraînent le détachement de particules pouvant devenir des MES :

1/ le détachement des particules de sol provoqué par l'impact des gouttes de pluie

Elles brisent les agrégats du sol en éléments plus fins (Le Bissonnais, 1998) qui, par sédimentation, colmatent les porosités de la partie superficielle du sol (Mano, 2009). Progressivement, se forme une croûte superficielle de quelques millimètres à quelques centimètres appelée croûte de battance (Le Bissonnais, 2002). Quand elle est sèche, cette couche de surface est plus compacte, dure et friable que le matériel sédimentaire de subsurface (Le Bissonnais, 2005). De ce fait, cette croûte réduit l'infiltration de la pluie (Le Bissonnais, 2002, 2005) et favorise un écoulement Hortonien (par dépassement de la capacité d'infiltration du sol) (Bradford *et al.*, 1987 *in* Le Bissonnais, 2005) : l'excès d'eau s'accumule en surface et ruisselle, en transportant des particules de sol (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Les facteurs principaux menant à la formation de cette croûte sont une faible concentration en matière organique, une fraction argileuse à l'activité réduite, une forte concentration en argile ou limon et une faible stabilité des agrégats (Le Bissonnais, 2005).

2/ le détachement des particules de sol provoqué par la force tractrice des écoulements : Le ruissellement induit un creusement de la partie supérieure du sol, sous forme d'incisions linéaires plus ou moins espacées : griffures, rigoles ou ravines. La capacité de détachement du flux de ruissellement est contrôlée par les caractéristiques des écoulements (vitesse, débit de pointe), par la résistance du sol à l'arrachement et la teneur en MES dans l'eau de ruissellement (Le Bissonnais, 1998 *in* Ben Hammadi, 2005).

3.1.3.1. Influence des caractéristiques pédologiques et pédogénétiques

La nature des sols joue un rôle majeur dans sa stabilité structurale et sur sa propension à l'érosion hydrique (Macary, 2013). Selon Ben Hammadi (2005), les principales caractéristiques de sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont : la profondeur, la pierrosité²⁵, la granulométrie, la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987, Y. Le Bissonnais *et al.*, 1995), l'infiltrabilité (Papyetal, 1995), la cohésion du sol (Mériaux, 1961) et la teneur en matière organique (Rooseetal ; 1993). Le Gouée (2007) a considéré la pédogénèse, l'épaisseur de sol, la proportion d'éléments grossiers, la texture et l'hydromorphie (capacité de saturation en eau) afin de caractériser la stabilité structurale du sol par ses caractéristiques physiques, hydrologiques et chimiques.

La nature des sols est particulièrement fonction de la texture du sol, qui peut être argileuse, limoneuse ou sableuse. Un sol riche en argile (et en matière organique) en est d'autant plus stable. Il est d'autant plus instable que sa granulométrie est proche du sable fin et des limons (Macary, 2013). Ainsi, les facteurs importants dans la détermination de la propension au détachement de particules de sol sont les **caractéristiques pédogénétiques** : physiques, chimiques, biologiques et hydrologiques.

Collecte des données :

La Base de référence mondiale de ressources en sol (World Reference Base for Soil Resources ou WRB) est la norme internationale taxonomique de la classification des sols, développée par l'ISRIC et parrainée par l'IUSS (International Union of Soil Sciences) et par la

²⁵ La quantité d'éléments grossiers dans le sol détermine sa pierrosité.

FAO. Elle caractérise tout matériel compris entre la surface et deux mètres de profondeur, en contact avec l’atmosphère (à l’exception des organismes vivants, zones englacées et non couvertes par d’autre matériel) (IUSS Working Group, 2015).

3.1.3.2. Influence de l’occupation des sols

A l’ère de l’Anthropocène, il est important de prendre en compte l’occupation du sol, c’est-à-dire, la façon dont le sol est utilisé dans un objectif de production (agriculture, industrie)²⁶. En effet, cela peut modifier complètement les caractéristiques du sol (utilisation des pesticides altère leur chimie par ex.) et modifier la nature de la surface du sol (e.g. type de couverture végétale, perméabilité). Ainsi, les modes d’occupation des sols, du parcellaire, de la nature et de la distribution spatiale des cultures et le taux de couvert végétal influencent globalement l’érosion (Lefrançois, 2007).

La nature de l’**occupation des sols** influence le degré de protection des sols (Dumas, 2007) et constitue, de fait, un facteur prépondérant de la production sédimentaire.

Collecte des données :

Les données utilisées sont issues de la base de données européenne Corine Land Cover. Il s’agit d’un inventaire biophysique de l’occupation des terres. Il est produit dans le cadre du programme européen d’observation de la terre Copernicus. La version utilisée est la 20b2 de décembre 2018. La base est dite à une échelle d’utilisation au 1/100 000 et se présente sous format vecteur. Chaque zone où l’occupation des sols est commune se voit attribuer une valeur chiffrée, un code, renvoyant à une nomenclature sur trois niveaux. Les 5 postes du niveau 1 sont : Territoires artificialisés (1), Territoires agricoles (2), Forêts et milieux semi-naturels (3), Zones humides (4) et Surfaces en eau (5). Cette analyse utilisera les informations de chaque niveau dans sa classification.

3.1.4. Influence des aménagements anthropiques

3.1.4.1. Influence des stations d’épuration des eaux usées

Les stations d’épuration des eaux usées émettent des MES dans le bassin versant du Rhône, que ce soit au niveau du cours d’eau comme sur des affluents (Libes, n.d). Afin de dépolluer les eaux usées, les stations d’épuration mettent en place des traitements physico-chimiques ou biologiques. Dans la mise en place des traitements biologiques, certains utilisent des algues, microalgues et bactéries²⁷. Cela peut engendrer une pollution particulière organique importante (la teneur en MES pouvant atteindre 0,2 kg/m³) (Libes, n.d). Ainsi, l’épuration des eaux usées d’agglomérations de plus de 2000 à 4000 EH est très majoritairement assurée par des stations d’épuration qui mettent en œuvre ces cultures intensives de biomasse épuratrice en suspension dans l’eau (appelée boues activées) ou fixée sur un support (biofiltres immergés). Elles génèrent une quantité importante de boues

²⁶ Définition de Sylvain Piron, L’Occupation du monde 240 p. ISBN 978 293 0601 33 5. Mai 2018 URL: <http://www.zones-sensibles.org/sylvain-piron-loccupation-du-monde/>

²⁷ Conjard, J., 2018. Stratégies de retrait du phosphore des effluents d’eaux usées aux rivières. Déphosphatation physico-chimique, déphosphatation biologique et traitements algaux.

d'épuration (20 à 22 kg de matières sèches/habitant/an²⁸) constituées principalement de matières en suspension non biodégradables et de la biomasse produite dans les réacteurs biologiques.

Collecte des données :

Les données relatives aux stations d'épuration des eaux usées sont collectées sur le système d'information sur l'eau du bassin Rhône-Méditerranée (SIERM) : localisation et propriétés des 3950 ouvrages du territoire. Les ouvrages dont la capacité nominale dépasse 2000 EH sont considérés car transportant davantage de matières en suspension (Annexe 8).

Une façon d'aborder la question serait de projeter l'ouvrage sur le cours d'eau et d'extraire la partie du cours d'eau à l'aval jusqu'à l'intersection avec une autre ramification du réseau hydrographique. Il faudrait pour cela s'assurer de la direction des écoulements, et prendre ainsi en compte l'altitude du point projeté représentant la station et celle du point à l'extrémité à l'aval. Serait ensuite considérée une zone tampon autour de cette ligne que l'on considérerait comme zone de production de matières en suspension. Pour cela, il s'agit également de s'assurer de la parfaite ramification du réseau hydrographique au sein de la couche d'information géographique. On pourrait également différencier le type de mécanismes utilisés par la station (biofiltres, boues activées ou non) et la mise en place ou non une solution pour la destination des boues. Ces données sont disponibles sur le portail du bassin Rhône Méditerranée www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr mais sont très incomplètes. L'incertitude sur ces questions, ajoutée au fait que la proportion de MES libérée par ce type d'ouvrage soit très faible comparée aux autres facteurs considérés ainsi qu'à l'ampleur du travail géomatique nécessaire au traitement de la donnée nous amène à ne pas considérer davantage ce facteur dans cette analyse.

3.1.4.2. Influence des aménagements hydro-électriques

Les aménagements hydro-électriques tels que les barrages ou les retenues bloquent momentanément le transport solide du cours d'eau. Une partie des matériaux transportés peut sédimenter au fond du lit, derrière ces aménagements, diminuant ainsi la charge solide initiale du fleuve (Probst, 1992). Les larges barrages ont impacté le fleuve notamment dans la quantité de sédiments stockés, qui doivent désormais faire l'objet de chasses à intervalles réguliers (Roux, 1984 *in* Tockner, 2009). Les quantités de sédiments remises en suspension dans les retenues varient d'une année sur l'autre et le bilan peut être nul comme positif (Marnézy, 1999). Les sédiments sont transportés sur une faible distance car un débit important permettant de mobiliser ces sédiments ne peut être maintenu longtemps. De plus, peu de cours d'eau du bassin font l'objet de chasses (Arc et Rhône) et elles ont lieu tous les ans sur l'Arc et tous les 10 ans sur le Rhône. Pour toutes ces raisons, on considère que les ouvrages hydroélectriques empêchent, dans une certaine mesure, la connectivité sédimentaire. Les ouvrages ont été distingués ainsi :

²⁸ Source : www.encyclopedie-environnement.org/eau/pourquoi-comment-traiter-eaux-usees-urbaines/

- **Connecté** : on définit comme connecté un sous bassin versant dont le flux hydro-sédimentaire se poursuit à l'aval sans aucun aménagement hydroélectrique sur son chemin.

- **Semi-connecté** : on définit comme semi-connecté un sous bassin dont le flux hydro-sédimentaire est partiellement stoppé par un ouvrage hydroélectrique de faible ampleur (barrages de basse chute, à la hauteur inférieure à 50m).

- **Peu connecté** : on définit comme non-connecté un sous bassin dont le flux hydro-sédimentaire est stoppé de manière conséquente par un ouvrage hydroélectrique de plus grande ampleur (<50m de hauteur).

Cette question est très importante quand on considère le transport des sédiments. Elle n'a ici pas été traitée puisque nous considérons les zones de production de MES et non leur transport. De plus, ce travail est fastidieux sous SIG, est plus efficace par modélisation hydro-sédimentaire.

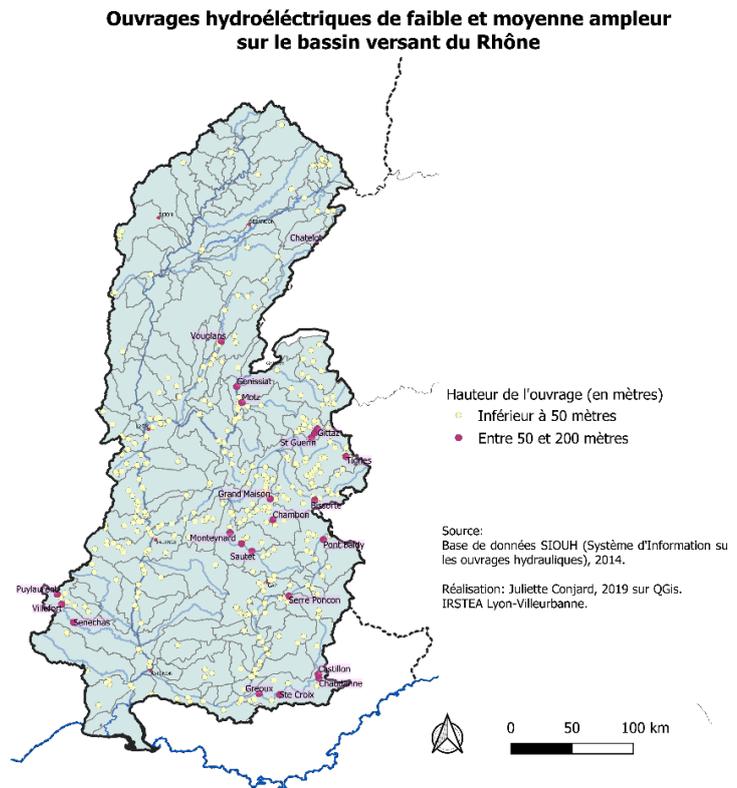


Figure 16: Ouvrages hydroélectriques de faible et moyenne ampleur sur le bassin versant du Rhône

3.1.5. Implication du forçage hydro-climatique

Les précipitations liquides sont souvent considérées comme facteur principal de l'érosion hydrique (Montier, Daroussin, King, 1998, Le Bissonnais, 2002). Le facteur climatique est très souvent résumé à l'intensité des pluies sur un événement (Bertrand, 2009). Or, plusieurs facteurs climatiques ont une action sur l'érosion des bassins dont les pluies, mais aussi les neiges, cycles de gel/dégel (alternance, intensité) (Brochot, 1998). C'est pourquoi il est important de considérer des facteurs relatifs aux précipitations, ainsi qu'aux températures.

3.1.5.1. Echelle temporelle

Deux temporalités peuvent être étudiées : à l'échelle d'un événement (type crue) ou bien à l'échelle de l'année ou de la saison.

- A l'échelle de l'événement : Cela permet une bonne prise en compte des extrêmes d'intensité. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés tels que : la durée effective de l'événement, l'intensité maximale en 6 minutes, le cumul des précipitations, la quantité 48h auparavant et la hauteur d'imbibition (paramètres utilisés par Patault et

al, 2017 à l'échelle du bassin de 1300km² de la Canche). Cela s'adapte particulièrement aux bassins instrumentés et de faible superficie²⁹. Il est possible de moyenniser des indicateurs à l'échelle de l'événement afin de les considérer à l'échelle de l'année.

- A l'échelle de l'année ou de la saison : cela permet davantage de considérer des tendances globales, des moyennes et des mesures à pas de temps régulier.
- ➔ En raison de l'emprise spatiale large du bassin versant du Rhône et des chroniques de données disponibles, il n'apparaît ici pas pertinent de considérer une échelle temporelle aussi fine. Cette analyse considèrera les comportements climatiques à l'échelle de l'année voire de la saison (notamment estivale).

3.1.5.2. Influence des précipitations et de la température

En climat méditerranéen comme en climat montagnard, les **précipitations** et températures sont marquées par une **saisonnalité** qui se répercute sur le phénomène de l'érosion hydrique (Mano, 2009, Lefrançois, 2007, Bertrand, 2009). Ainsi, une partie des précipitations, l'hiver se fait sous forme neigeuse. Une couverture neigeuse se forme, protégeant le sol de l'érosion. De fait, l'érosion pendant l'hiver est faible mais l'accumulation de neige engendre au printemps de l'eau de fonte, responsable d'une érosion massive presque continue sur la période de fonte. A l'échelle de l'année, l'érosion induite par l'eau de fonte est plus forte que celle prévenue par la couverture neigeuse pendant l'hiver. C'est pourquoi nous considèrerons la **proportion neigeuse des précipitations** comme premier critère. **L'alternance et l'intensité des cycles de gel/dégel** engendrent également une érosion des sols : ils brisent les agrégats du sol et engendrent la fissuration puis la fragmentation des sols. Leur action est particulièrement importante au printemps (Bryan 2000) : le sol ayant été dégradé au cours de l'hiver par une forte alternance de ces cycles, ils sont alors particulièrement sensibles à la pluie et la fonte des neiges (Mano, 2009). Le reste de l'année, le sol est à nu et donc potentiellement érodable. Il s'érode particulièrement dans le cas de pluies intenses. L'érosion n'est dans ce cas, pas continue mais conséquence de ces événements (Bertrand, 2009). Il s'avère qu'il y a davantage d'orages en été. Néanmoins, on peut citer les événements cévenols qui eux, sont davantage automnaux, et pour autant extrêmement intenses. Ainsi, il apparaît intéressant de prendre en compte l'ensemble des **événements pluvieux** ayant lieu durant la période de l'année où le sol ne présente **pas de couverture neigeuse**.

Il semble ainsi intéressant de considérer un critère « précipitations intenses hors période nivale », un critère prenant en compte la proportion des précipitations faite sous forme neigeuse, un critère prenant en compte les cycles gel/dégel (e.g. nombre de jours de gel consécutifs).

Collecte de données :

La réanalyse SAFRAN de Météo-France a été utilisée et particulièrement les données journalières de précipitations et de températures. Ces données sont issues d'un modèle

²⁹ Ces indicateurs nécessitent des données à pas de temps extrêmement restreint.

climatique calé sur des observations de terrain et satellites (Vidal *et al.*, 2009). Chacun des 1679 points représente le centre d'une maille de 8km de résolution. Chaque donnée présentée en un point est considérée égale en tous points de la maille. Il a été fait le choix de considérer la période du 01/01/1960 au 31/12/2016. Il est usuel de considérer 30 ans de données. Il a ici été fait le choix de considérer 56 ans de données pour apporter une plus grande représentativité aux données. Il a ensuite été calculé la moyenne journalière interannuelle des précipitations (resp. des températures), c'est-à-dire la moyenne des précipitations (resp. Températures) en chacun des centroïdes pour chaque jour de l'année (e.g. tous les 1^{er} janvier). Cela fut réalisé sous R et le code utilisé pour les précipitations se trouve en Annexe 9 (similaire pour les températures). A partir de ce tableur, on peut calculer l'ensemble des indicateurs.

La **proportion neigeuse des précipitations** (Figure 17) a été calculée ainsi :

$$Proportion\ neigeuse = \frac{Cumul\ des\ précipitations\ neigeuses}{Cumul\ des\ précipitations} \times 100$$

$$Cumul\ des\ précipitations\ neigeuse = \sum Précipitations\ SI\ et\ Températures < 0$$

L'**alternance des cycles de gel/dégel** a été calculée comme le nombre de jours de gel à l'année, ce qui consiste un parti pris. Ils ont été considérés comme le nombre de jours où la température a été inférieure à 0.

Les **précipitations intenses hors période nivale** (Figure 18) ont été calculées comme le nombre moyen de jours où il a plu plus de 7mm en un jour du 31/05 au 31/10. Plusieurs essais ont été réalisés en considérant d'autres seuils (8 et 10mm) ou une autre méthode : ratio entre le cumul des précipitations hors période nivale et le nombre de jours de pluie de cette même période (en considérant comme jour de pluie toute journée où il avait, en moyenne interannuelle, plu plus de 1mm). Les résultats cartographiés ont été jugés moins convaincants.

Les couches raster de chaque critère ont ensuite été interpolées.

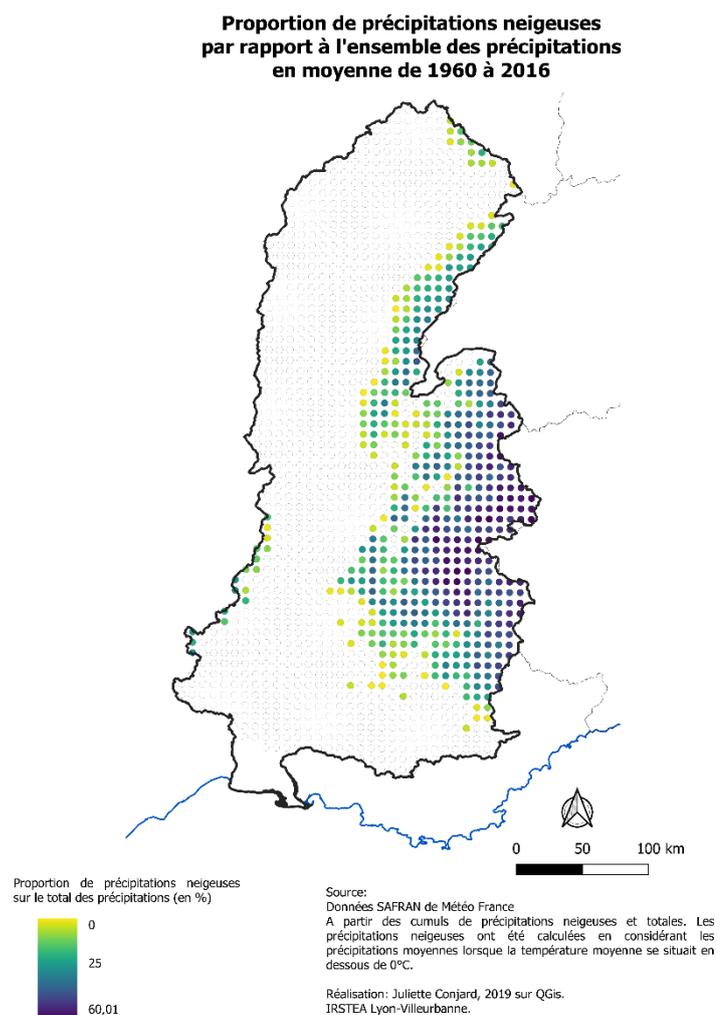
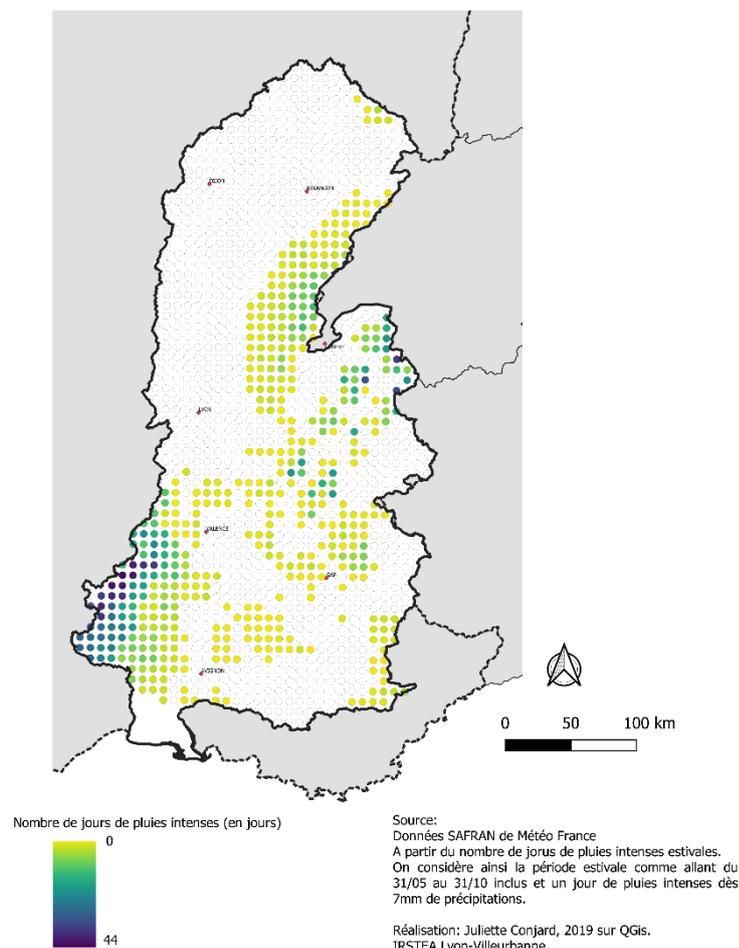


Figure 17: Répartition des zones de précipitations neigeuses sur le bassin versant du Rhône

Les données sont déjà issues d'une interpolation et cela peut constituer une limite à ce travail. Néanmoins, il a été considéré qu'une résolution de 8km était trop importante comparée à la résolution des données utilisées pour l'ensemble des autres critères. C'est pourquoi il a été fait le choix d'interpoler les données. Dans l'interpolation IDW (pondération par l'inverse de la distance), les points d'échantillons sont pondérés durant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre décline avec la distance. Cette pondération fait trop ressortir les centroïdes des mailles. C'est pourquoi, l'interpolation triangulaire (TIN) a été utilisée. Elle crée une surface de triangles formés par des points voisins les plus proches.

Précipitations intenses hors période nivale



On note que les données relatives à la Camargue ne sont pas disponibles. Le modèle SPAZM d'EDF a été considéré pour croiser les résultats mais les données de ce modèle ne sont pas disponibles sur l'entièreté du bassin versant du Rhône.

Figure 18: Répartition des zones de précipitations intenses (hors période nivale) sur le bassin versant du Rhône

Conclusion : Il existe de nombreux critères influençant la production de MES. Nous en avons isolé 14 qui ont été discriminés en fonction de la disponibilité et de la nature de la donnée collectée pour chaque critère. Certains ont été regroupés, d'autres exclus, d'autres conservés. Ainsi 5 critères vont être utilisés : l'inclinaison de la pente, la courbure de la pente, la nature de la lithologie, la nature physico-chimique des sols, l'occupation des sols (et nous questionnerons l'intégration de la question des aménagements hydro-électriques). Un tableau récapitulatif des critères et données utilisés pour chacun d'entre eux est disponible en Annexe 10. Il s'agit désormais de présenter la classification des valeurs mise en place pour chaque critère.

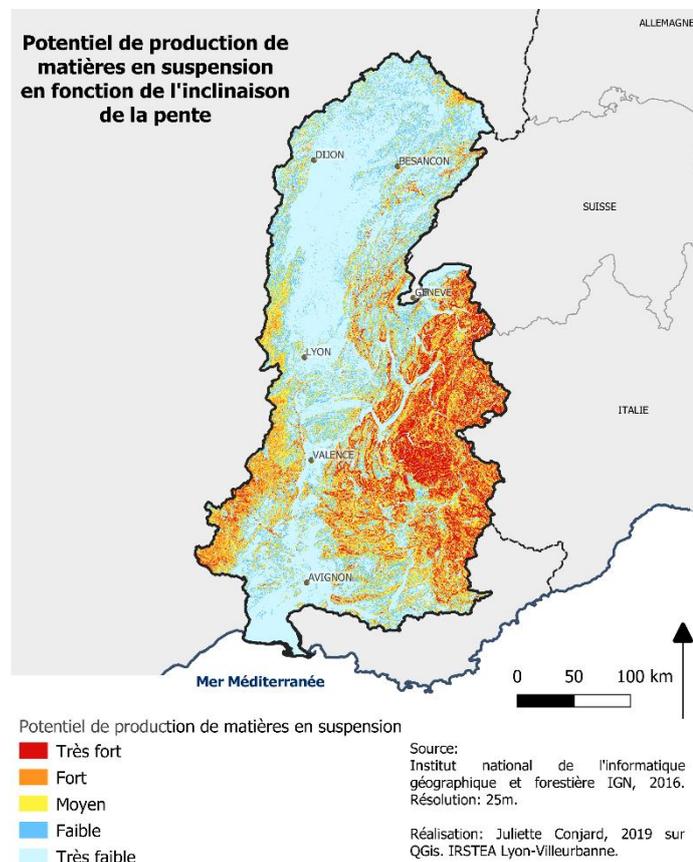
3.2 - Mise en place de la classification des valeurs

3.2.1. Classifications des critères liés à la géomorphologie

3.2.1.1. Classification du Critère 1 : inclinaison de la pente

L'inclinaison de la pente peut être hiérarchisée en plusieurs classes en fonction de son influence sur les phénomènes érosifs. Les bornes de classes dépendent du nombre de classes, des caractéristiques topographiques du terrain d'étude et du niveau de précision recherché par l'analyste. Lagannier attribue à une déclivité de 0 à 10% une sensibilité à l'érosion faible, à une déclivité de 10 à 25% une sensibilité moyenne et à une déclivité de 25% une sensibilité forte (Lagannier, 1994, *in* Dumas, 2007). La Nouvelle Calédonie (Grande Terre) étudiée par Dumas présente une dichotomie vaste plaine/chaîne montagneuse avec des altitudes comprises entre 0 et 1600 mètres. El Hage Hassan (2015) choisit pour la région montagneuse d'El Aaqôura une classification en 5 classes : 0 – 5° très faible, 5 – 10° faible, 10-15° moyen, 15-20° fort et > 20° très fort. Bertrand (2009) choisit pour le bassin de haute montagne de l'Arc 4 classes : 0°-10° faible ; 10°-20° moyenne ; 20°-30° forte ; > 30° très forte pente.

Comme la Nouvelle Calédonie, le bassin versant du Rhône présente une importante dichotomie montagne/plaine. Les pentes du bassin sont ainsi comprises entre 0° et 89.1° (MNT, IGN 25m). 5 classes sont ici proposées : 0-5° ; 5-10° ; 10-20° ; 20- 30° ; > 30° afin de représenter cette diversité (Tableau 3). Le potentiel de production hiérarchisé qui en est issu est représenté en Figure 19.



Inclinaison de pente (en °)	Potentiel production de MES	Potentiel production de MES - chiffré
0 – 5°	Très faible	1
5 – 10 °	Faible	2
10 – 20°	Moyenne	3
20 - 30°	Forte	4
> 30 °	Très forte	5

Figure 19: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de l'inclinaison de la pente

Tableau 3: Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction de l'inclinaison de la pente

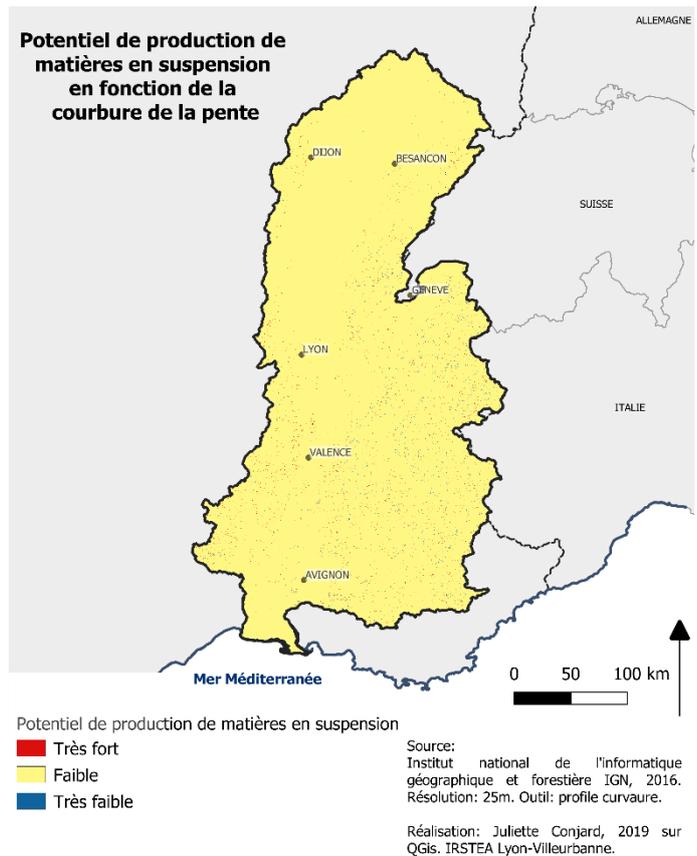
3.2.1.2. Classification du Critère 2 : courbure de la pente

Sont distingués ainsi les secteurs convexes (valeur entre -0.0634 et -0.02) des concaves (valeur entre -0.01 et 0.01), des secteurs considérés comme plans (de 0.2 à 0.0736). Le potentiel de production issu de cette classification de la courbure de la pente est représenté en Figure 20.

Tableau 4: Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction des courbures de la pente

Forme des versants	Potentiel de production de MES
Convexe	Très forte
Plane	Faible
Concave	Très faible

Figure 20: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la courbure de la pente



3.2.2. Classifications des critères liés à la géologie

3.2.2.1. Classification du Critère 3 : La lithologie

En 1996, André Chandesris réinterprète une carte géologique au 1/250 000 du BRGM dans le cadre des travaux de construction des hydro-régions. Il affecte aux polygones plusieurs propriétés (e.g. nature lithologique, dureté, perméabilité, richesse ionique) qui lui permettent d'évaluer la résistance des roches. Il distingue : roches meubles sensibles, roches cohérentes tendres moins sensibles, roches hétérogènes peu sensibles et roches résistantes très peu sensibles. Sa cartographie (Annexe 11) apporte une première idée de la sensibilité à l'érosion du bassin versant en fonction de sa lithologie.

Néanmoins, la lithologie consistant un facteur important dans le processus d'érosion, une échelle cartographique plus fine est souhaitable. C'est pour cela que cette analyse se base sur les cartographies géologiques au 1/50 000 du BRGM. Ainsi, l'information n'est plus donnée en un point pour 250 mètres mais un point pour 50 mètres. A chacune des 270 natures lithologiques listées dans cette couche d'information géographique a été attribuée un potentiel de production de matières en suspension en 5 classes. Chaque classe a une valeur numérique associée à une valeur textuelle: 1 – Très Faible ; 2 – Faible ; 3 – Moyenne ; 4 – Forte ; 5 – Très forte. Les publications (Annexe 12) permettant d'évaluer le potentiel de production de MES de chacune des lithologies sont notamment :

- Classification de Dubus (1989), présentée dans Probst (1992)

- Classification de Marie (1984), présentée dans Marie (1984)
- Classification de Canali et Allodi (1967) présentée dans Bertrand (2009)
- Classification de El Hage Hassan *et al.* (2014)
- Classification de Probst (1992)
- Classification de Latulippe et Peiry (1998)
- Classification de Bertrand (2009)
- Classification de Chandesis établie à partir de Derruau (1974), Rogers et Wasson (1995)

Les informations de la base de données spatiales telles que l'âge et la période associée, la dureté et l'épaisseur de la roche, la description détaillée, peuvent également être utilisées. Des recherches annexes pour permettre de caractériser certaines roches ont été conduites en utilisant notamment : Boulvain et Dumont (2019), Martin (2010), Encyclopedia Universalis, Brtiannica.com, Geoalp.com, Legoût (2015), Ben Hammadi (2005), Hite Prat (1985)³⁰, Caron, Charollais et Septfontaine (1970)³¹ et dictionnaires.

Classification proposée : Les sensibilités à l'érosion les plus fortes se retrouvent dans les dépôts quaternaires et [certaines] marnes (Legoût, 2015) comme les marnes noires. Les sables ont également été considérés comme très sensibles (degré de sensibilité compris entre 4 et 5), au même titre que les limons (degré de sensibilité maximal 5) car facilement mobilisables. Les argiles sont un peu plus difficiles à éroder en raison de la forte cohésion capillaire entre les éléments. Mélangés à des limons, elles sont néanmoins très érodables³². Plus la concentration en calcaire dans les roches est élevée, moins l'argile est érodable, plus la concentration en limon dans la roche est élevée, plus l'argile est érodable. Le degré de sensibilité des argiles varie de 2 à 4. Le grès est une roche sédimentaire, constituée par une agrégation de grains de sables. Sa sensibilité à l'érosion est comprise entre 2 et 4 selon la nature du ciment agrégeant les grains de sables. Les éboulis, graviers et blocs ne sont pas particulièrement érodables en tant que tels : leur sensibilité dépend de leur nature, de leur taille et du substrat. De fait, le degré de sensibilité varie entre 2 et 4. De même, la sensibilité des alluvions dépend de la nature et de la taille de ses constituants. Des alluvions grossières comprenant des galets auront une sensibilité différente que des alluvions présentant des sables ou des limons. Leur degré varie ainsi de 2 à 5. Les calcaires sont des roches sédimentaires carbonatées et peuvent être classés selon : les fossiles contenus, la structure de la roche, leur grain, les impuretés présentes et leur lieu de dépôts. Selon ces paramètres, le potentiel de production varie entre 1 pour les calcaires récifaux et 4 pour les calcaires marneux par exemple. Selon le type de calcaires, il est plus ou moins résistant mais aussi plus ou moins soluble dans les eaux acides. Les phénomènes de dissolution des calcaires par circulation des fluides dans diverses fractures et cassures sont des phénomènes karstiques que l'on retrouve dans des formations telles que des grottes, dolines par exemple (cf. II.2.3). Les formations rocheuses consolidées présentent une sensibilité très faible du fait de leur compacité. Ainsi les roches basaltiques, volcaniques, cristallines et métamorphiques entrent dans cette catégorie, comme le quartz ou le gneiss par exemple. Lorsque les roches sont

³⁰Source : Sophie Hite Prat. Les "Marnes bleues" à nodules barytiques du Gargassien et de l'Albien de la fosse Vocontienne (Sud-est de la France) : étude géochimique et minéralogique. Héritage, diagenèse, hydrothermalisme. Stratigraphie. Université Claude Bernard - Lyon I, 1985. Français. (tel-00799984)

³¹ Source : http://geologie-alpine.ujf-grenoble.fr/articles/GA_1970__46__49_0.pdf

³² Source : Entretien avec Delannoy, 2019

fracturées, leur sensibilité augmente d'un rang (2). Lorsque la roche est meuble mais partiellement consolidée ou calcifiée (*e.g.* calcaire noduleux, argilite calcaréo-dolomitique), elle peut être déclassée en rang 2.

Validation de la classification :

Cette classification a été soumise à l'expertise de Mélanie Bertrand, ayant mis en place une analyse spatiale multicritère dans le cadre de son mémoire en 2009 (sur le bassin de l'Arc, en Maurienne) ainsi que de Jean-Jacques Delannoy, anthropo-géomorphologue à EDYTEM (Le Bourget du Lac). Vous trouverez en Annexe 13 la classification qui a été appliquée dans le cadre de cette étude et en Figure 21 la représentation du potentiel de production qui en est issue. Cette base de données a été jointe à la couche géologique du bassin au 1/50 000.

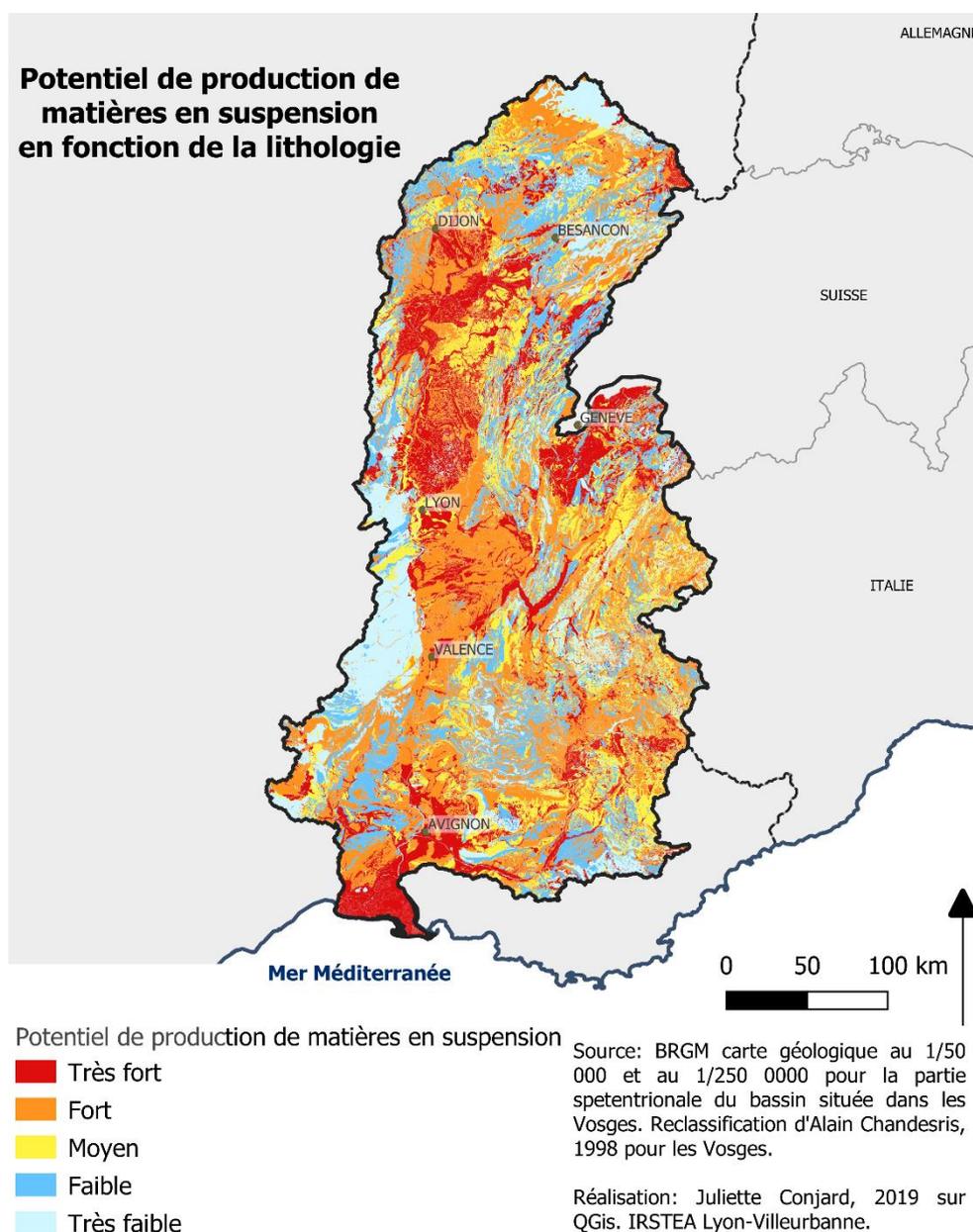


Figure 21: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la lithologie

Le

département des Vosges n'est pas disponible au sein de la cartographie du BRGM au 1/50 000. Or une zone de faible ampleur (rapportée à la surface du bassin versant) se situe dans ce département. Dans ce cas, la cartographie au 1/250 000ème fut utilisée.

Pour les Alpes de Haute-Provence, Bouches du Rhône et Vaucluse, les couches d'informations géographiques ne sont pas autant renseignées. Seule la description détaillée est utilisable. Or, elle diffère en de nombreux points de celle utilisée dans le reste du bassin. De plus, les notations ne sont aussi pas les mêmes. De fait, il a s'agit d'expertiser chacune des 635 lithologies des zones de ces trois départements comprises dans le bassin versant du Rhône. Il aurait été possible d'utiliser la cartographie au 250 000ème comme dans le cas des Vosges, cependant cette zone étant d'ampleur plus importante et représentant une partie importante du bassin versant de la Durance, le choix a été fait d'adapter la classification précédente, en complétant par des recherches définitives (notamment) conduites sur les mêmes médias que précédemment cités. Ce travail (Annexe 14) fut relativement fastidieux et ne se justifie que par l'importance de la géologie dans la potentialité d'une zone à produire des matières en suspension.

3.2.3. Classifications des critères liés à la pédologie

3.2.3.1. Classification du Critère 4 : Caractéristiques pédologiques et pédogénétiques

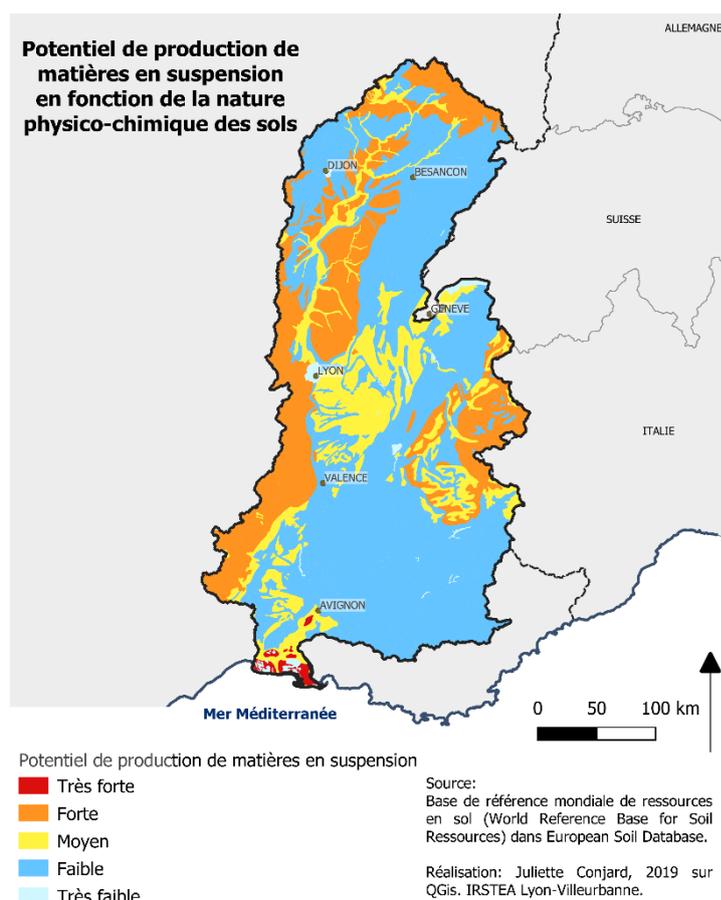
La classification des sols se base sur les caractéristiques du sol définies en termes d'horizons, propriétés et matériaux diagnostiques (IUSS Working Group, 2015). Les horizons et propriétés diagnostiques sont définis par un ensemble de caractéristiques reflétant les effets usuels des processus de formation des sols (Bridges, 1977 *in* IUSS Working Group, 2015) ou indiquant des conditions spécifiques de pédogenèse. Les matériaux diagnostiques sont des matériaux influant clairement sur les processus pédogénétiques ou qui les reflètent. Dans un premier temps, les classes sont principalement différenciées par les caractéristiques typiques du sol résultant du processus pédogénétique principal, sauf là où des matériaux parentaux spéciaux sont d'une importance primordiale. Ensuite, les sols sont différenciés selon des caractéristiques du sol résultant de tout processus pédogénétique secondaire ayant affecté de manière significative les caractéristiques primaires (IUSS Working Group, 2015). La texture des sols est plus ou moins prise en compte dans la base de référence mondiale de ressources en sol. De plus, nous l'avons également considéré dans la partie lithologie (lorsque la lithologie dominante était limon, argile ou sable). Les paramètres climatiques ne sont pas appliqués dans la classification des sols, ce qui permet de ne pas être redondant avec les facteurs hydro-climatiques qui sont considérés.

Le Bissonnais a repris cette classification qu'il a lui-même classée en fonction de l'habilité de ces sols à assurer la stabilité structurale des sols. Il prend en compte l'effet de la matière organique sur la stabilité structurale, des carbonates, des cations, et des autres caractéristiques pédogénétiques (Le Bissonnais, 2002) (Tableau 5).

Tableau 5 : Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols

Caractéristiques physico-chimiques des sols	Potentiel de production de MES	Potentiel de production de MES – chiffrée
Histosols	Très faible	1
Rendzine, Chernozem, Kastanozem, Greyzem, Phaeozem, Ferralsol	Faible	2
Acrisol, Lithosol, Fluvisol, Regosol, Ranker, Vertisol, et tous les autres types sauf s'ils présentent l'un des caractères suivant : dystric, gleyic, albic, planic, spodic (qui les rend plus sensibles) ou calcaric, chromic, calcic, humic (qui les rend moins sensibles)	Moyenne	3
Podzoluvisol, Podzol, Arenosol, Andosol, Planosol, Xerosol.	Forte	4
Solonchak, Solonetz	Très forte	5

La classification de Le Bissonnais est appliquée aux différents types de sol présents sur le bassin versant du Rhône. En Annexe 15 est la classification détaillée qui a été mise en place. Dans le cas des Cambisols eutriques, la classification de la FAO a également consultée afin de déterminer la sensibilité de ces sols. ³³



L'Europe Soil Database est une base de données européenne regroupant les données disponibles sur les sols. Elle fut développée et mise en ligne en 2004 par la commission européenne et l'European Soil Bureau Network. Cette base de données spatiale intègre les types de sol de la WRB. Ainsi, par une jointure entre cette base de données et la classification choisie, on spatiale la classification de la nature physico-chimique des sols. Le potentiel de production qui en est issu est représenté en Figure 22.

Figure 22: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la nature physico-chimique des sols

³³ Le type de sol défini par la WRB associé au code est disponible sur https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDBv3/Legend/sg_attr.htm#WRBFU.

3.2.3.2. Classification du Critère 5 : l'occupation des sols

Les secteurs les plus sensibles sont ceux où les matériaux sont à nu et/ou où les sols sont peu stabilisés : roches à nu, sites d'extractions de minéraux (*e.g.* carrières), glaciers (rocheux ou non), terres nues de couverture végétale (Bertrand, 2009). En effet, l'absence de couverture végétale contribue à l'accroissement du ruissellement de surface et des processus érosifs (Kronsfeller-Kraus, 1982 ; Chinnamani *et al.*, 1982 in Latulippe et Peiry, 1996). Parmi l'ensemble des utilisations du sol, les terres arables et les zones de végétation éparse sont les plus sujettes à l'érosion (Panagos, 2015).

Les secteurs les moins sensibles sont ceux où les sols sont imperméabilisés (zones urbaines, routes) et/ou où la végétation arbustive est très représentée car sa capacité de stabilisation des sols est importante (Montier, Daroussin, King, 1998 in Bertrand, 2009).

La méthode IRIP présentée par Lagadec divise les pixels en deux classes : la classe « forêt et végétation » et la classe « zones urbaines, agricoles ». On remanie la classification de Montier, Daroussin et King, 1998, élaborée à partir de la base de données Corine Land Cover, également utilisée par Bertrand, 2009. La classification mise en place est celle présentée en Tableau 6.

Tableau 6 : Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction de l'occupation du sol

Classe	Type de sol	Code CLC	Description	Potentiel de production de MES (nominal et chiffré)
1	Terres arables	211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	Très forte 5
2	Zones agricoles hétérogènes	241 à 244	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes ; Systèmes culturaux et parcellaires complexes ; Territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante ; Territoires agro-forestiers	Très forte 5
3	Cultures permanentes	221 à 223	Vignes, vergers, oliveraies	Forte 4
4	Prairies, pelouses et pâturages	231, 321	Prairies, pelouses et pâturages	Moyenne 3
5	Forêts hors stade arbustif	311 à 313	Forêts de conifères, feuillu et forêts, mélangées	Faible 2
6	Zones arbustives	322 à 324	Landes et broussailles ; Végétation sclérophylle	Forte 4
7	Zones naturelles dégradées	333, 334	Végétation clairsemée, zones incendiées.	Forte 4
8	Espaces ouverts, zones à nu	331, 332, 335, 131	Sans végétation : roches nues, glaciers, plages, zones d'extraction de matériaux.	Maximale 5
9	Territoires artificialisés sauf zones d'extraction des matériaux	111 à 124 132 à 142	Tissu urbain discontinu, zones industrielles ou commerciales, réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	Très faible 1
10	Surfaces en eau et zones humides	411 à 523, 213, 212	Mers, lacs, rivières, marais et rizières, terres arables irriguées en permanence.	Nulle 1

Les 44 types de sols de la base de données CLC sont classés en 10 types de sols selon leur sensibilité à l'érosion : très faible, faible, moyenne, forte et très forte. La détermination des sensibilités s'appuie sur les analyses de Montier, Daroussin & King (1998), Bertrand (2009), Panagos (2015), Probst (1992) et El Hage Hassan (2015). Probst (1992) apporte un premier éclairage avec sa classification de la capacité des formations à protéger les sols contre l'érosion mécanique : déserts et sols nus (coefficient 0), cultures (1), toundra (2), steppes (3), savanes (4), prairies (5), forêts (6). Sa classification est à l'échelle du monde tandis que celle de Panagos (2015) est spécifique à l'Europe. Ainsi, Panagos (2015) a calculé le pourcentage de perte en sol que chaque type de sol impliquait : terres arables (30.41%), terres agricoles hétérogènes (20.25%), végétation éparse (16.16%), zones arbustives et herbacées (14.63%),

cultures permanentes (10.05%), pâturages (7.59%) et forêts (0.91%) (Annexe 16). Les zones à nu sont les plus sensibles à l'érosion (Dumas, 2007) car le matériau est disponible et non stabilisé. Les cultures permanentes (vignes, vergers, oliveraies) ont un rôle stabilisateur et de protection de surface des sols (comme les prairies et pâturages). Néanmoins, lorsque les inter-rangs de ces zones sont cultivés, les cultures doivent être considérées comme des zones agricoles hétérogènes (Montier, Daroussin et King, 1998 ; Bertrand, 2009) C'est pourquoi une érodibilité intermédiaire : forte a été attribuée aux zones de cultures permanentes. Le couvert végétal protège le sol de deux manières. D'une part, il augmente l'infiltration, améliore les propriétés (physiques, chimiques) du sol et maintient la cohésion des matériaux grâce au système racinaire. D'autre part, il brise l'énergie cinétique des gouttes de pluie et intercepte une partie des précipitations. (El Hage Hassan, 2015). Les zones où la couverture végétale est dense, telles que les forêts, limitent donc fortement le processus érosif (Dumas, 2007). Le potentiel de production de ces zones est, de fait, classé comme faible. Les territoires artificialisés, routes ont une érodibilité très faible en raison de leur imperméabilité et du faible stock de sédiments disponible qui leur est associé. Afin de conserver une unité dans le nombre de classes (par rapport aux autres critères), les classes Nulle et très faible sont regroupées, de même que les classes Très Forte et Maximale.

Le potentiel de production lié à la nature de l'occupation du sol est présenté ci-après en Figure 23.

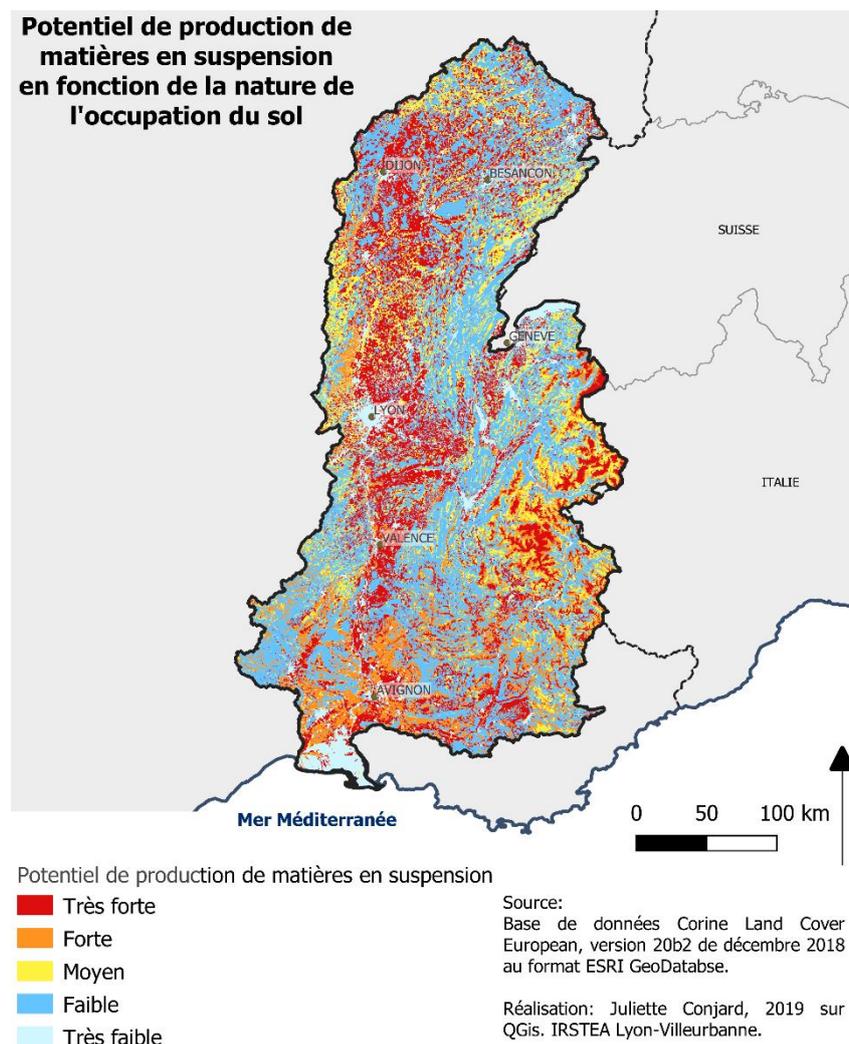


Figure 23 : Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la nature de l'occupation du sol

3.2.4. Classification des critères liés au forçage hydro-climatique

Critère 7 : Les précipitations liquides intenses

Critère 8 : Les précipitations neigeuses

Afin de représenter ces phénomènes, Bertrand (2009) a créé trois secteurs pluviométriques en distinguant l'intensité des précipitations ainsi que leur importance relative saisonnière (entre été et hiver). Le Bissonnais (2002) a cherché à combiner l'intensité des pluies avec la hauteur de pluie. Les hauteurs de pluies sont issues de la méthode Aurelhy, développée par Météo France, qui a pour particularité de tenir compte des effets du relief (Le Bissonnais, 2002 ; Canellas, 2014). Ces valeurs ont ensuite été reclassées en quintiles pour chaque saison climatique. Lorsque l'intensité est moyenne ou forte, la classe de précipitations est augmentée d'un niveau par rapport à la classe des hauteurs de pluie. Le Bissonnais (2002) a diminué l'aléa des terres cultivées (terres arables et zones agricoles hétérogènes) au printemps et en été, afin de prendre en compte la croissance du couvert végétal durant l'année culturale.

Il a été fait le choix de pondérer le forçage hydro-climatique de la façon suivante. La méthode des quintiles a été utilisée pour déterminer les classes des différents critères. Cela présente l'avantage d'être simple à mettre en place mais cette méthode est discutable. Puis les critères ont été pondérés entre eux. Dans le cadre d'une analyse multicritère, il est important que les critères ne soient pas redondants. Or, le critère « Jours de gel » prend en compte les jours de température négative alors que le critère « précipitations neigeuses » le prend également en compte. Le choix est ici fait d'abandonner le critère « Jours de gel ». De fait, seuls deux critères subsistent pour qualifier le forçage hydro-climatique : Critère 6 « proportion neigeuse des précipitations » et Critère 7 : « précipitations intenses hors période nivale ».

Limite et perspective : Les zones englacées et enneigées sont particulièrement impactées par les modifications de température. Il serait intéressant dans une future étude de prendre en compte ces modifications de température depuis trente ans (1981-2010) et de mettre en exergue les zones englacées ou enneigées où le ratio d'augmentation est le plus fort. Les précipitations (fréquence des événements extrêmes croissante) comme les températures ne sont pas constantes dans le temps et sont amenées à augmenter. Cela pourrait être considéré dans le cadre d'une étude prospective. Il serait alors intéressant de prendre en compte les scénarios du GIEC (précipitations et températures). De plus, l'aire de répartition et l'importance du couvert neigeux pourraient bénéficier d'un détail plus important. Il serait ainsi intéressant d'exploiter les données satellite MODIS ou encore d'utiliser le modèle hydrologique en développement par Ivan Horner à IRSTEA Lyon-Villeurbanne.

3.3 - Test et pondération des paramètres : résultats globaux

Les valeurs de chaque critère classifiées, il s'agit désormais de pondérer les différents critères à chaque niveau de l'arbre. L'arbre des pondérations mis en place est disponible en Figure 24.

Arbre des critères, des sous-critères et des classifications

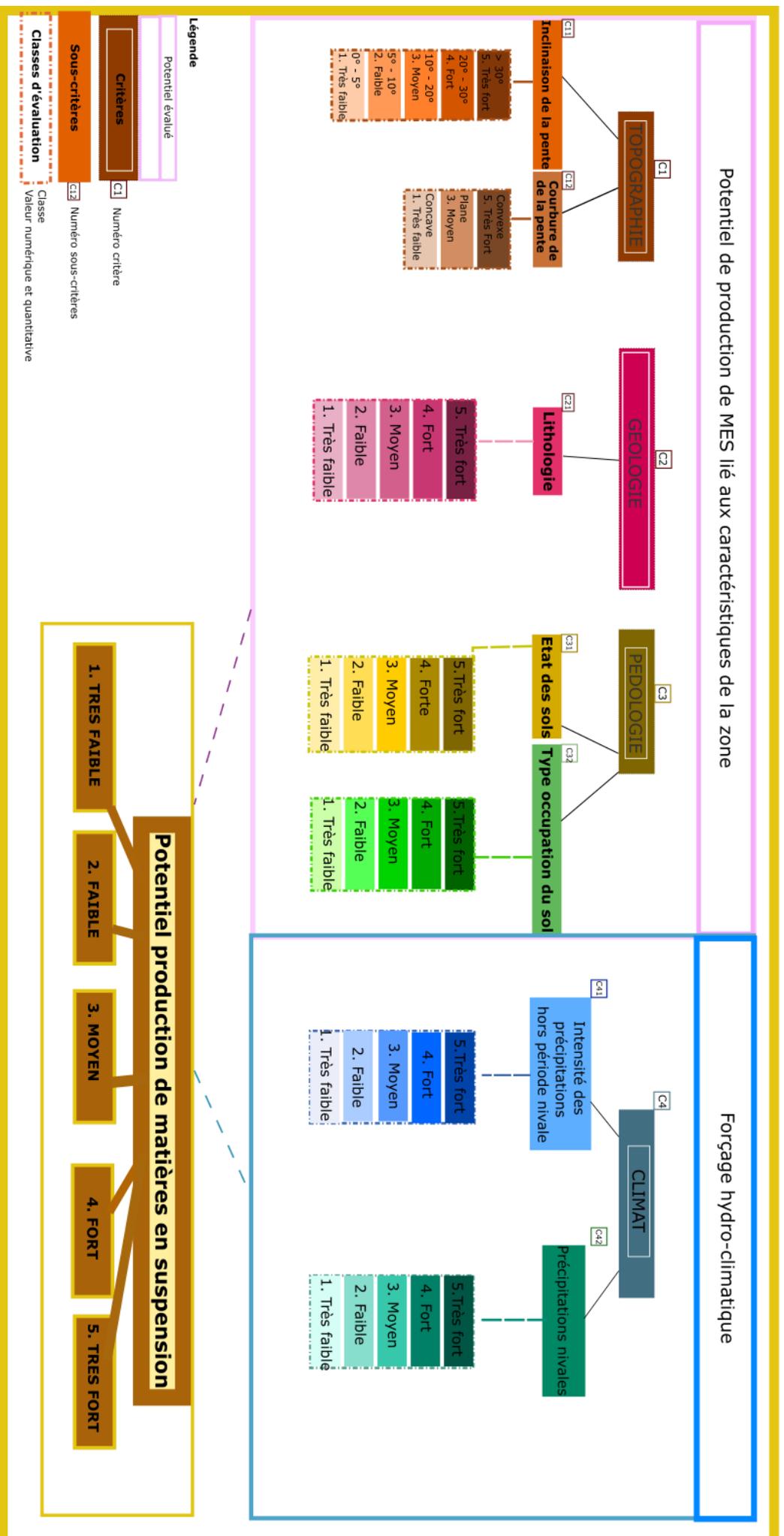


Figure 24 : Schéma des facteurs permettant de déterminer le potentiel de production de MES

3.3.1. Pondération intercritère : niveau 2

3.3.1.1. Pondération du critère topographie

Comme précédemment explicité, l'inclinaison de la pente a davantage de poids sur la potentialité d'une zone à produire des MES que la courbure de la pente. Le choix de la pondération a été fait en considérant que le critère topographie était expliqué à 67% par l'inclinaison de la pente et à 33% par la courbure de la pente. Bertrand (2009) avait auparavant effectué la même distinction. Le résultat de la pondération du critère topographie se trouve ci-contre en Figure 25.

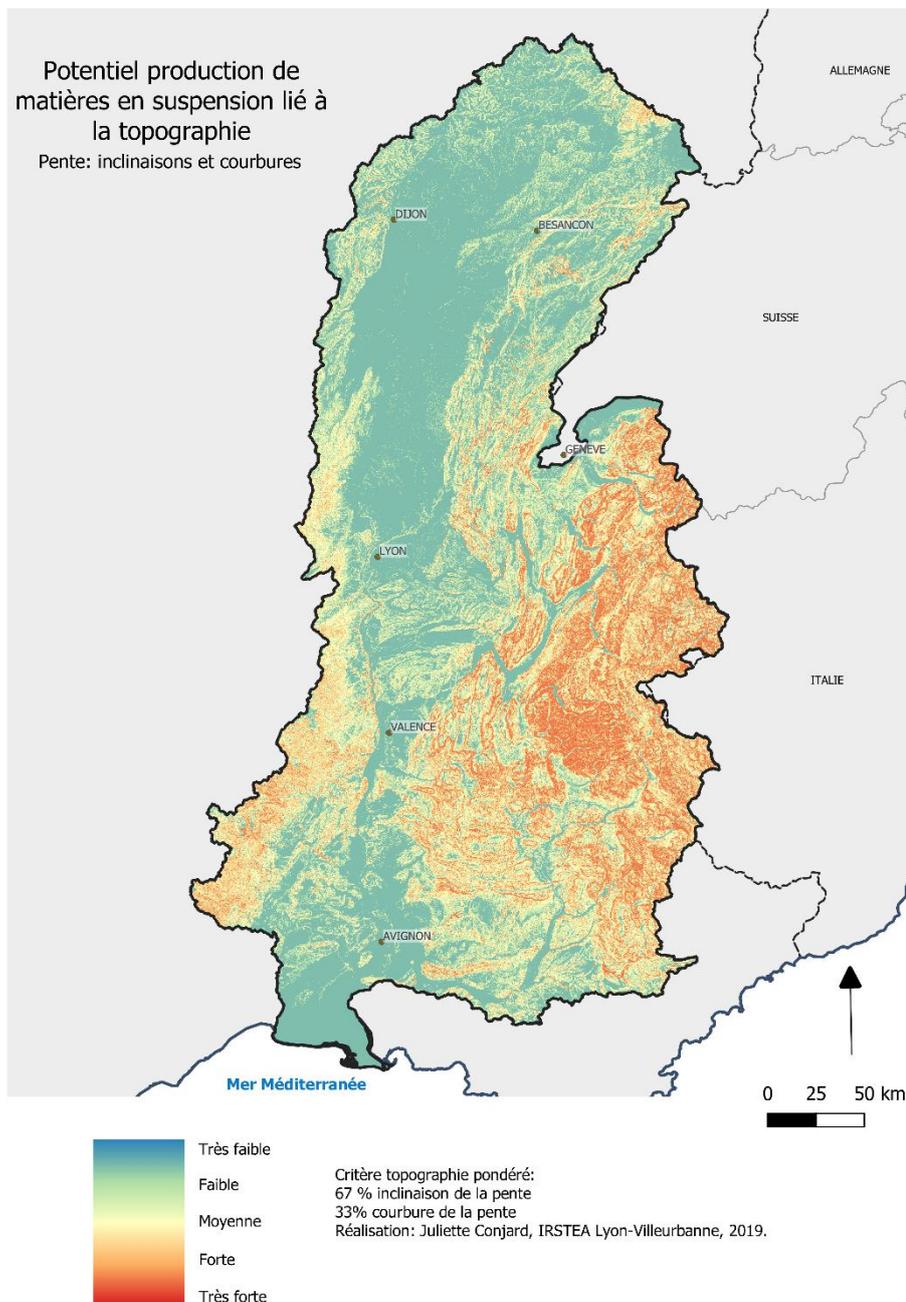


Figure 25: Potentiel production de matières en suspension lié à la topographie

3.3.1.2. Pondération du critère géologie

L'ensemble des critères liés à la géologie ont été regroupés en amont de la classification. De fait, la classification et représentation du critère géologie sont les mêmes que celles du critère lithologie (cf. Figure 21).

3.3.1.3. Pondération du critère pédologie

Le critère pédologie est représenté à part égale par le critère « Etat physico-chimique des sols » et le critère « nature de l'occupation des sols ». Ce choix a été fait afin de représenter à la fois le sol de surface et de subsurface. Le résultat se trouve ci-contre en Figure 26.

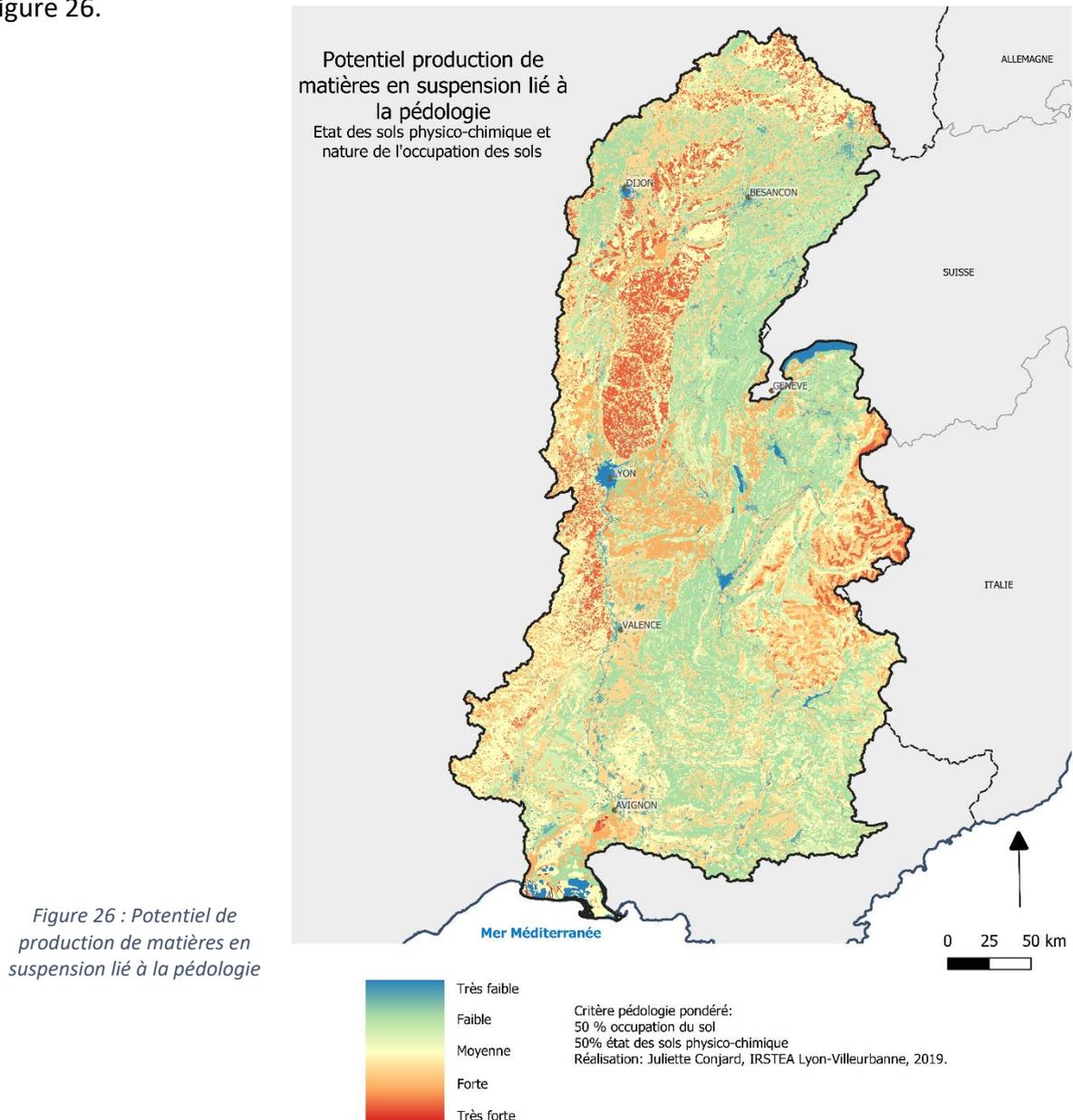


Figure 26 : Potentiel de production de matières en suspension lié à la pédologie

3.3.1.4. Pondération du critère climat

La question de la pondération des critères 7 et 8 apparaît épineuse par manque d'informations sur la question. Il a été fait le choix de pondérer également les deux critères :

50%-50%. Le résultat (Figure 27) semble satisfaisant, faisant ressortir le fait que l'est du bassin présente des orages d'été et des températures hivernales basses. La cartographie fait également bien ressortir les Cévennes, particulièrement sujettes aux phénomènes de précipitations intenses à l'automne (événements cévenols). Elle fait également bien ressortir les zones montagneuses.

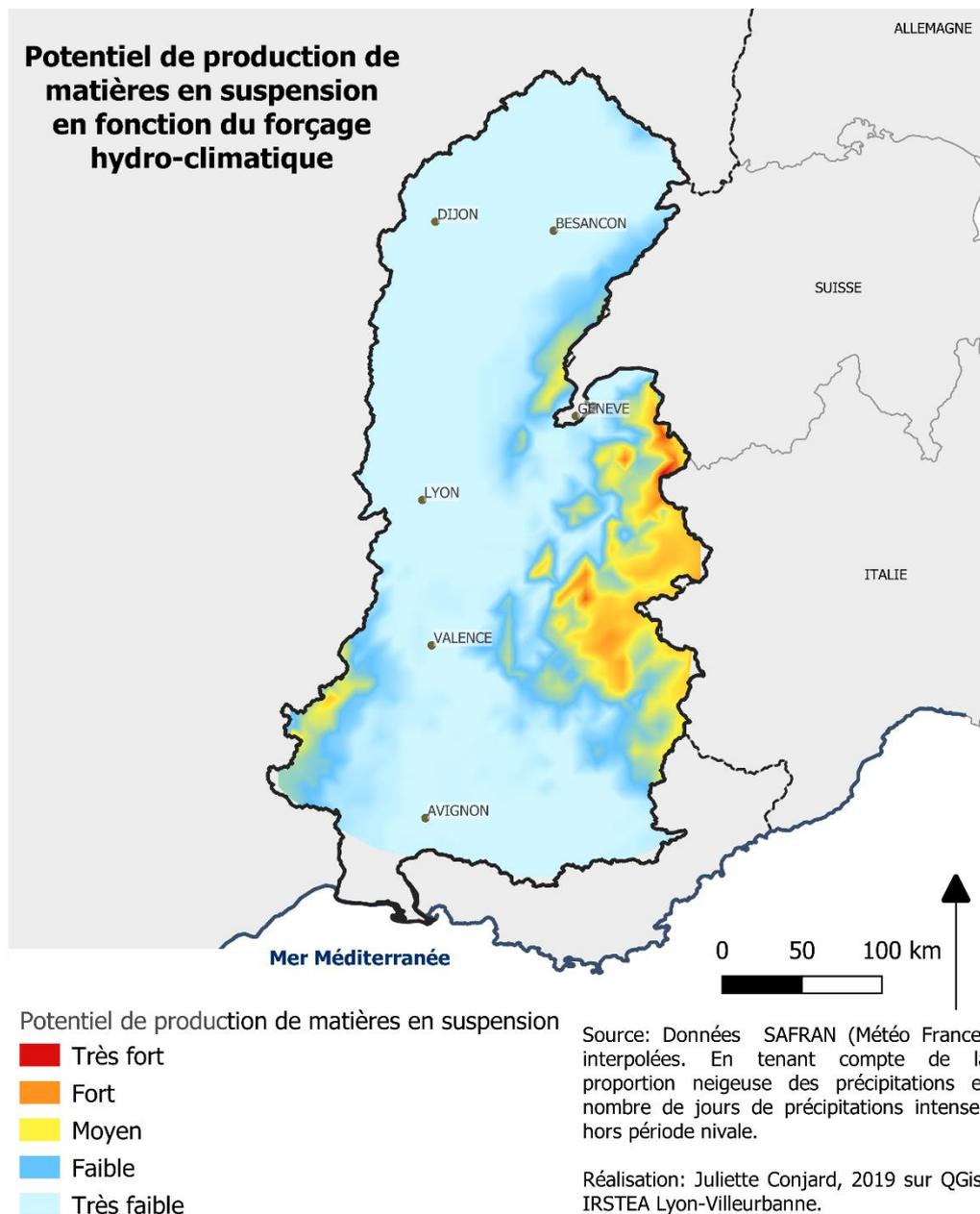


Figure 27: Potentiel de production de matières en suspension en fonction du forçage hydro-climatique

3.3.2. Tests de pondération des critères et résultats

Pour cette pondération entre critères de niveau 1 et suivant la méthode AHP, des comparaisons binaires ont été réalisées (matrices non normalisées), puis les priorités ont été déterminées et synthétisées (matrices normalisées) et les jugements ont été vérifiés cohérents.

Dumas (2010) accorde à chaque critère un poids similaire, la carte des sensibilités se constitue ainsi d'une superposition de couches de même poids. Une carte semblable a été produite mais ne mettait pas correctement en exergue les zones de production de MES. Boughalem pondère les critères selon un indice variant de 1 à 3. Il attribue au couvert végétal le plus grand poids, à la pente un poids de 2 et aux précipitations un poids de 1.

Plusieurs tests ont été menés pondérant différemment les critères de niveau 1 (Figure 28) :

Nom du test	Dominances	Géologie	Topographie	Pédologie	Climat
TestA	GPCT	46	10	27	17
TestB	GPTC	46	17	27	10
TestC	GTPC	46	27	17	10
TestD	GTCP	46	27	10	17
TestE	GCTP	46	17	10	27
TestF	GCPT	46	10	17	27
TestG	TCPG	10	46	17	27
TestH	TCGP	17	46	10	27
TestI	TPGC	17	46	27	10
TestJ	TPCG	10	46	27	17
TestK	TGPC	27	46	17	10
TestL	TGCP	27	46	10	17
TestM	CGPT	27	10	17	46
TestN	CGTP	27	17	10	46
TestO	CPTG	10	17	27	46
TestP	CPGT	17	10	27	46
TestQ	CTGP	17	27	10	46
TestR	CTPG	10	27	17	46
TestS	PGTC	27	17	46	10
TestT	PGCT	27	10	46	17
TestU	PTCG	10	27	46	17
TestV	PTGC	17	27	46	10
TestW	PCTG	10	17	46	27
TestX	PCGT	17	10	46	27

Figure 28: Pondérations des différents critères et tests associés (en %)

La cohérence des jugements a été vérifiée selon le protocole de la méthode AHP décrit précédemment. En annexe 17 est un exemple de pondération par cette méthode. De chacune de ces combinaisons de critères ont été extraites des cartes sous format raster.

Pour cela, les informations numériques contenues dans les couches raster des quatre critères de niveau 1 : Géologie, Topographie, Pédologie et Climat ont été additionnées en prenant en compte les pondérations ci-dessus. Par exemple, une requête peut être : ("GEOL_@1" * (46 / 100) + "TOPO_@1" * (10 / 100) + "PEDO_@1" * (17 / 100)) + "CLIMAT @1" * (27 / 100). En figure 29, est le résultat cartographique de cette requête.

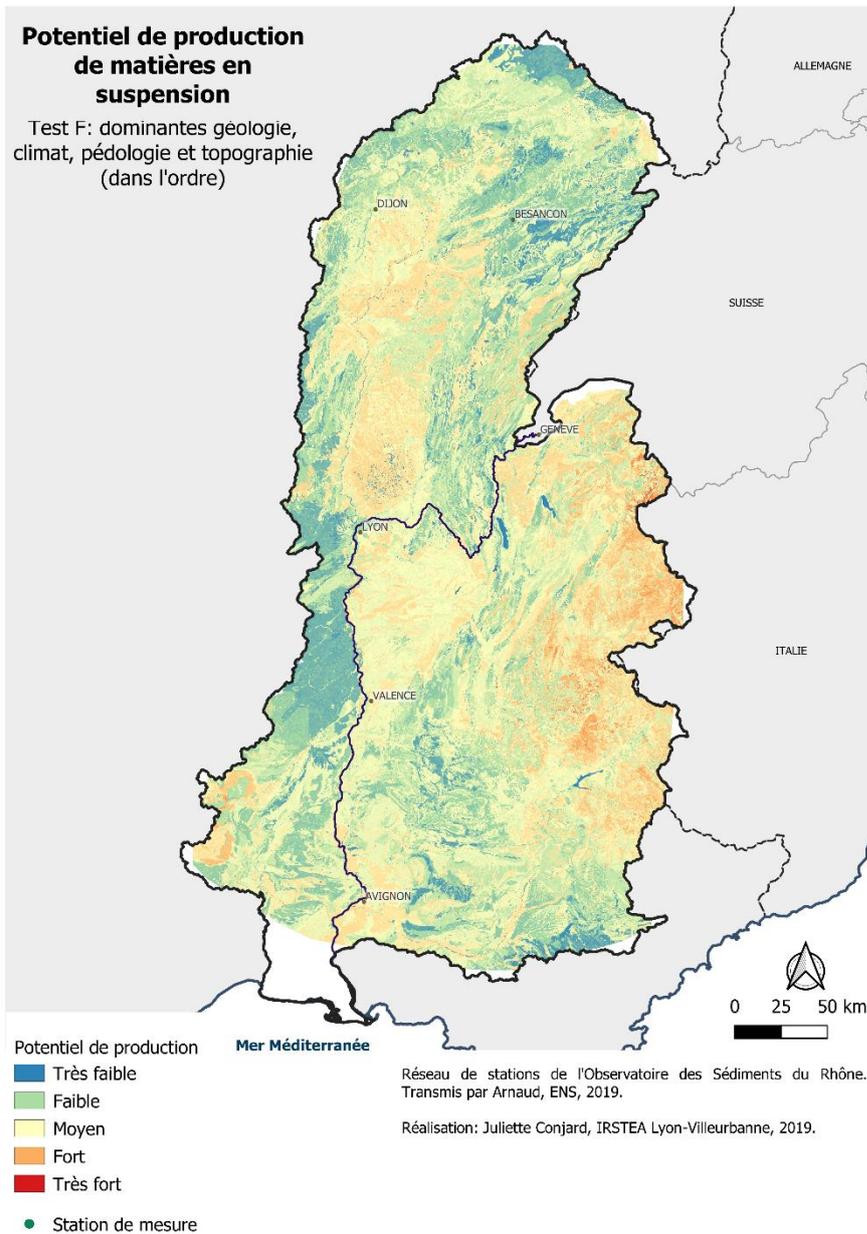


Figure 29 : Potentiel de production de MES général - Test F : dominante géologie, climat, pédologie et topographie

Il est ensuite nécessaire de mettre en place une méthodologie d'analyse des résultats afin de déterminer laquelle des 24 propositions est la plus représentative de la réalité du terrain.

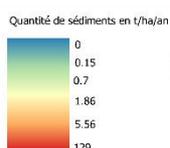
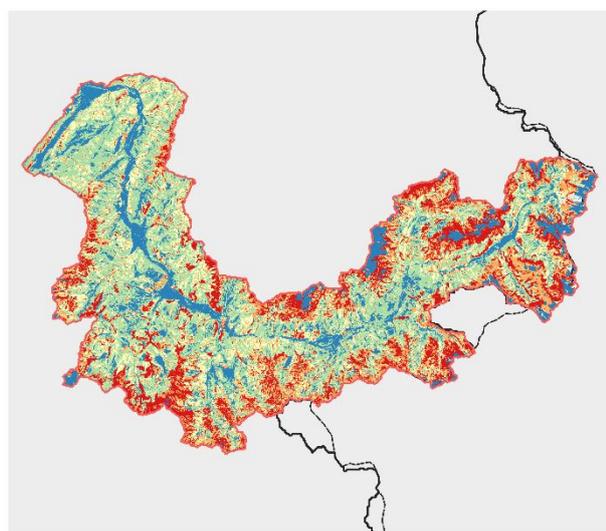
4. Mise en place d'une méthodologie d'analyse et de validation des résultats

4.1 - Comparaison avec données quantitatives (Sédiment Export) de deux sous-bassins

Olivier Le Flem, stagiaire de Mathieu Fressard au CNRS, a estimé la production sédimentaire de deux sous-bassins du Rhône : l'Arc (Maurienne) et l'Ardière (Beaujolais). Ces estimations sont quantitatives et s'appuient sur le modèle de transfert sédimentaire InVEST³⁴ (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs). Ces données sont utilisées dans cette analyse afin de vérifier les correspondances entre nos travaux et nos hiérarchisations. Ici, on cherche ainsi à déterminer lesquels des 24 tests de pondération correspondent le plus aux travaux réalisés sur l'Arc et l'Ardière.

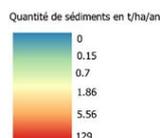
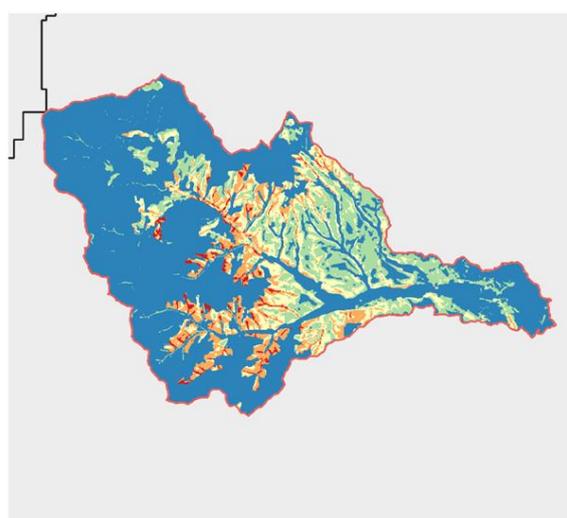
Pour cela, les valeurs des rasters « Sédiment export sur l'Arc » et « Sédiment export sur l'Ardière » ont été reclassées en cinq catégories (Figures 30 et 31), en utilisant la méthode des quintiles (sur l'Arc) : classe 1 : de 0 à 0.15 ; classe 2 : de 0.15 à 0.7 ; classe 3 : de 0.7 à 1.861 ; classe 4 : de 1.861 à 5.584 et classe 5 de 5.558 à 129. L'unité utilisée est tonne par hectare et par an. On conserve les mêmes bornes de classe pour des soucis de comparabilité des résultats.

Sédiment Export sur le bassin de l'Arc (reclassifié)



Source: Données d'Olivier Le Flem, ENS Lyon, 2019. Sédiment export à l'exutoire.
Réalisation: Juliette Conjard, IRSTEA Lyon-Villeurbanne, 2019.

Sédiment Export sur le bassin de l'Ardière (reclassifié)



Source: Données d'Olivier Le Flem, ENS Lyon, 2019. Sédiment export à l'exutoire.
Réalisation: Juliette Conjard, IRSTEA Lyon-Villeurbanne, 2019.

Figure 30: Sédiment Export sur le bassin de l'Arc

Figure 31: Sédiment export sur le bassin de l'Ardière

³⁴ Source : <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/sdr.html>

Ensuite, on utilise la calculatrice raster pour additionner les valeurs de cette couche à celle de chacun des tests. Les valeurs de chaque test sont multipliées par 10 afin de mettre en exergue les valeurs qui ne correspondent pas. Ainsi, les valeurs 11, 22, 33, 44 et 55 correspondent parfaitement. Les valeurs 10, 12, 21, 23, 32, 34, 43, 45 et 54 correspondent quasiment (voir règles en annexe 18). Ainsi, on peut calculer : "SE_exut_arc_reclass@1" + ("GTCP_TestD@1" * 10). De là, on peut estimer quelle est la proportion, pour chaque test, de pixels classés de façon similaires. Les correspondances sur l'Arc (Figures 32 et 33) sont plutôt faibles et analogues, ce qui signifie peut-être que la méthode de reclassification des Sediment Export n'était pas la plus adaptée. Néanmoins, plusieurs tests ressortent : A, G, H, J, O, U et W notamment. Les correspondances sur l'Ardière sont plus marquées et plusieurs tests ressortent : E, F, L, O et Q notamment. Ces résultats seront pris en compte dans la suite de l'analyse afin de discriminer certains tests et de régler d'éventuels litiges.

Figure 32: Graphique des correspondances sur l'Arc

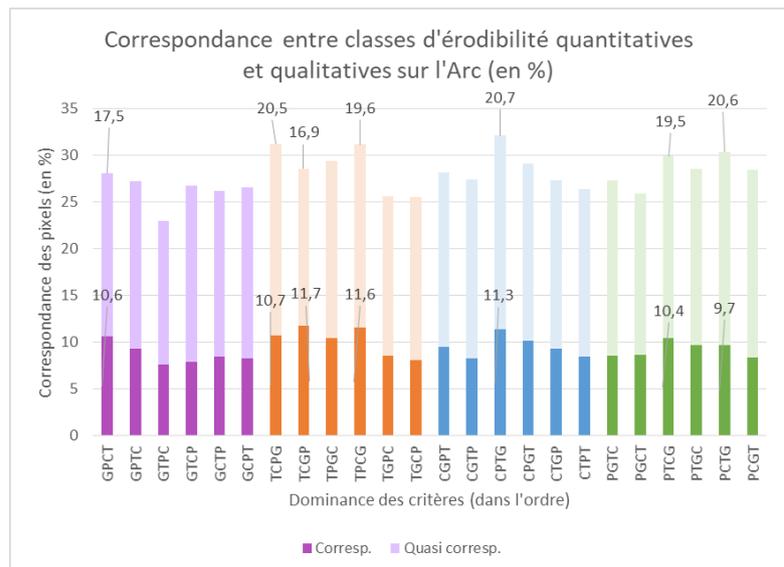
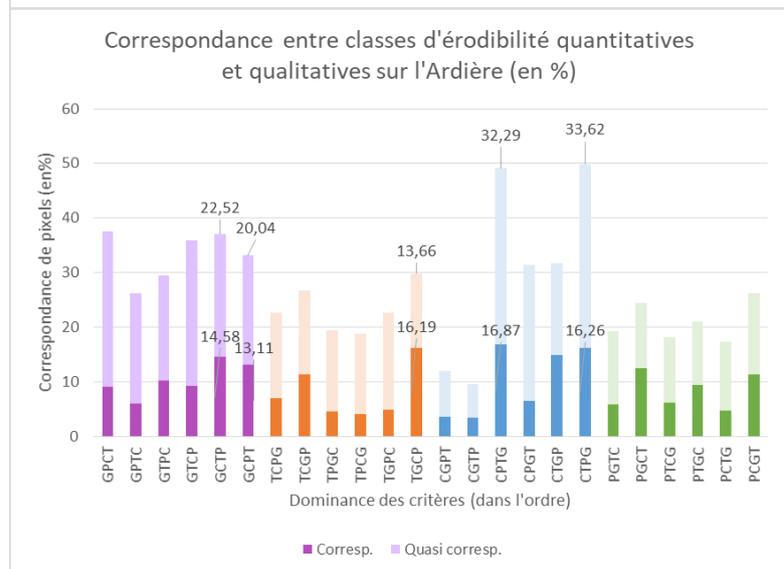


Figure 33: Graphique des correspondances sur l'Ardière



Il s'agit en effet de prendre en compte ces données issues de cas particuliers, petits sous-bassins du Rhône dans l'analyse des résultats sur le plus étendu territoire du bassin versant du Rhône. Plusieurs auteurs ont hiérarchisé les sous-bassins du Rhône en fonction de leur érodibilité ou encore de leur production de MES (Tableau 7).

Tableau 7 : Bassins fournisseurs de MES selon la littérature

Auteur	Bethemond et Bravard	Bégorre et al.	Tockner	Launay, Dabrin	Launay	Irstea	Agence de l'eau
Année	2016	2018	2009	2018	2014	2019	2010
Partie du Rhône concernée	Tout le bassin	Haut-Rhône	Tout le bassin	Tout le bassin	Tout le bassin	Tout le bassin	
Bassins fournissant le plus de MES	Romanche, Asse et haut-bassin de l'Arve	Arve, Fier	Isère, Durance	Isère, Arve	Isère, Durance	Isère, Durance	
Bassins fournissant moins de MES		Guiers, Ain, Bourbre	Saône, Drôme, Ardèche, Ain	Saône	Arve, Saône	Gier	Eyrieux
Source (lorsque non dans la bibliographie)	cf. bibliographie	https://presentations.copernicus.org/EGU2018-6371_presentation.pdf	cf. bibliographie	www.graie.org/osr/IMG/pdf/complactes_jtosr18_v3.pdf	cf. bibliographie	www.irstea.fr/fr/toutes-les-actualites/eaux/pollution-de-quelles-sources-proviennent-les-particules-et-contaminants	www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/gestion-quantitative/EEVPG/Eyrieux/EVP_Eyrieux_rapport_phase1_mars2010.pdf

4.2 - Comparaison avec des données quantitatives de stations

La base de données pour les observations en hydrologie (BDOH) met à disposition des données hydrologiques et biogéochimiques issues des observations de long termes gérés par (ou dans lesquels est fortement impliqué) Irstea. Elle met à disposition des chroniques des flux de MES en divers stations, calculées à partir des chroniques de débit et de concentration en MES. Les chroniques de concentrations en MES sont issues de la transformation de la chronique de la turbidité (mesurée en continu). 4 stations contrôlent la turbidité du Rhône, 5 stations celle des affluents du bas-Rhône et 7 stations celles des affluents du Haut-Rhône. Leur suivi n'est néanmoins pas continu dans le temps (Figure 34).

Figure 34 Disponibilité des chroniques de flux de MES dans la BDOH pour chacune des stations instrumentées par année

Type de cours d'eau étudié	Station/Arles	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Affluents du Haut-Rhône	AIN							
	ARVE							
	BOURBRE							
	BUGEY							
	FIER							
	GUIERS							
	SAONE							
Affluents du Bas-Rhône	ARDECHE							
	DURANCE							
	GARDON							
	ISERE							
Sur le Rhône	ARLES							
	CREYS							
	CRUAS							
	JONS							

Les chroniques de données de 7 stations ont été utilisées dans cette analyse car leurs concentrations étaient notables et elles ont été suivies au moins deux ans. Les flux de MES en (t/s) ont été moyennés selon les données disponibles : Arve (2013 -2016), Fier (2014-2018), Durance (2014-2018), Isère (2014-2018), Ardèche (2016-2018), Giers (2014-2018) et Saône (2014-2018). Puis, ces flux moyens ont été rapportés à la superficie des sous-bassins contributeurs (Figure 35 et 36). En Annexe 19, ils sont représentés sous forme de graphiques en anneaux.

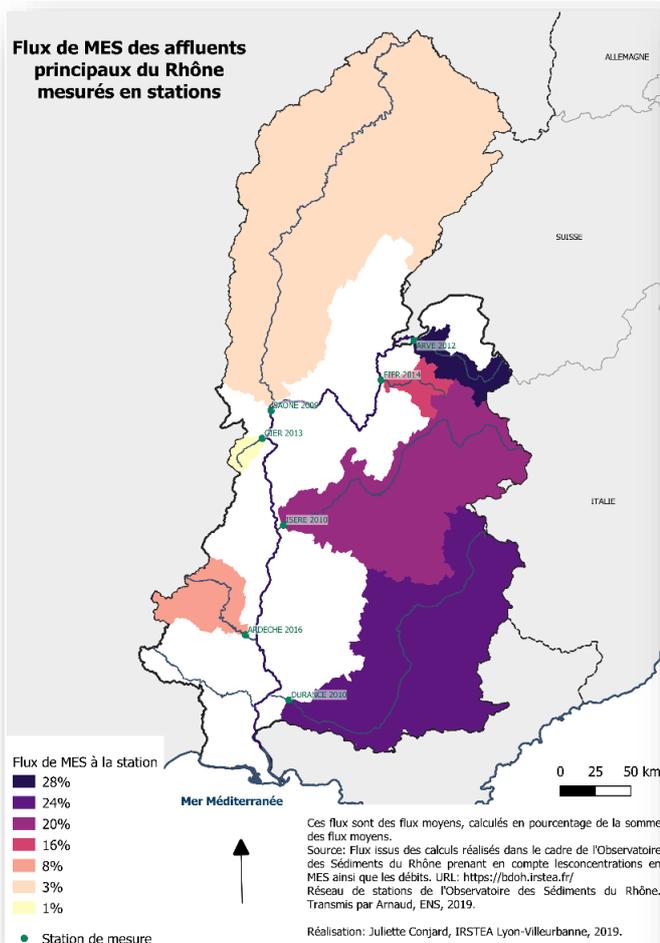


Figure 36 : Flux moyens de MES des affluents principaux du Rhône issus des mesures en stations

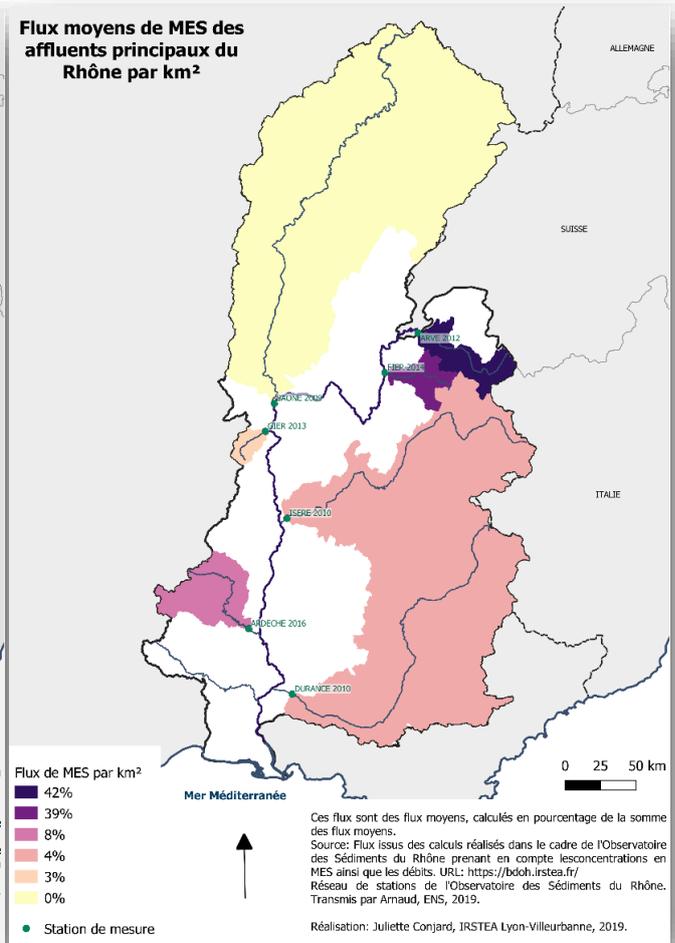


Figure 35 : Flux moyens de MES des affluents principaux du Rhône par km²

Les 24 cartes sont inspectées et celles qui visuellement se rapprochent le plus de la carte des flux moyens de MES par km² sont sélectionnées : tests C, E, G, H, I, J, L, M, N, O, Q, R en l'occurrence. Ensuite, le croisement est fait avec les résultats issus de l'analyse des « Sediment export » de l'Arc et de l'Ardèche et les tests ne correspondant pas à ces résultats sont écartés. Il s'agit aussi de prendre en compte les bassins désignés comme forts contributeurs et peu contributeurs par la littérature (Figure X). Une attention particulière a été apportée à plusieurs informations annexes : l'Eyrieux (Ardèche du Nord) ne présente pas spécifiquement de problèmes de particules fines et la Dessoubre et la Loue (bassin du Doubs) sont des sous-bassins torrentiels et de fait, sont plus propices à produire des MES. Grâce à l'ensemble de ces informations, trois tests ont été sélectionnés : Q, H et M (Figures 37, 38 et 39).

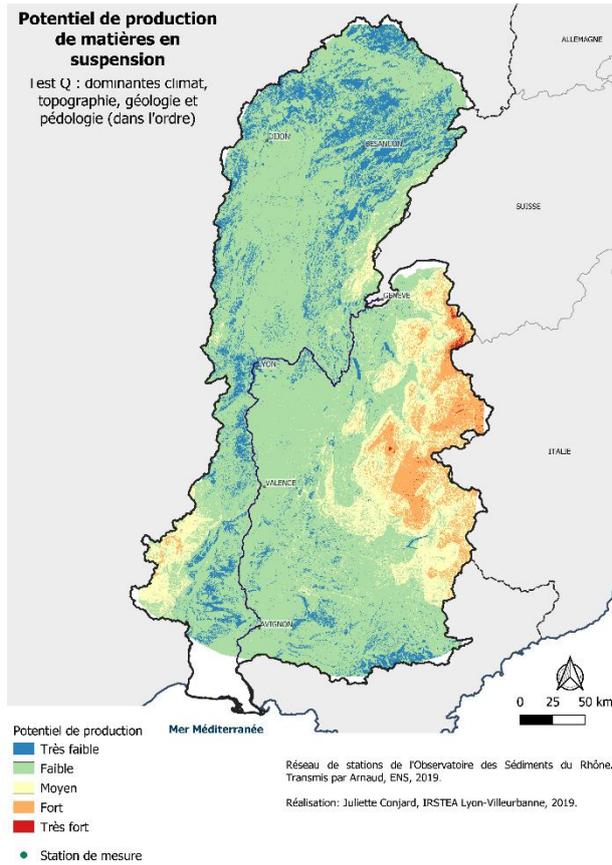


Figure 37 : Potentiel de production de MES global - Test Q : dominantes climat, topographie, géologie et pédologie

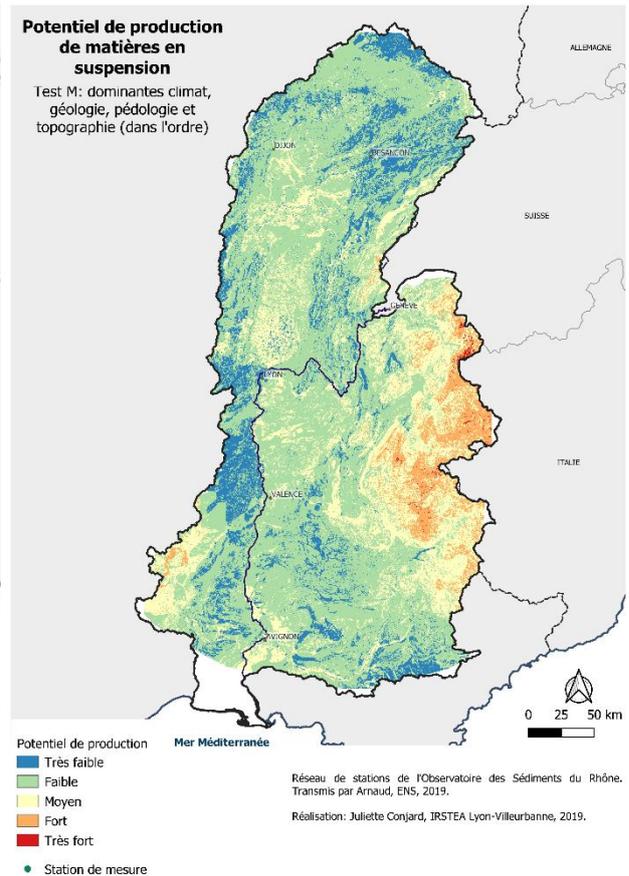
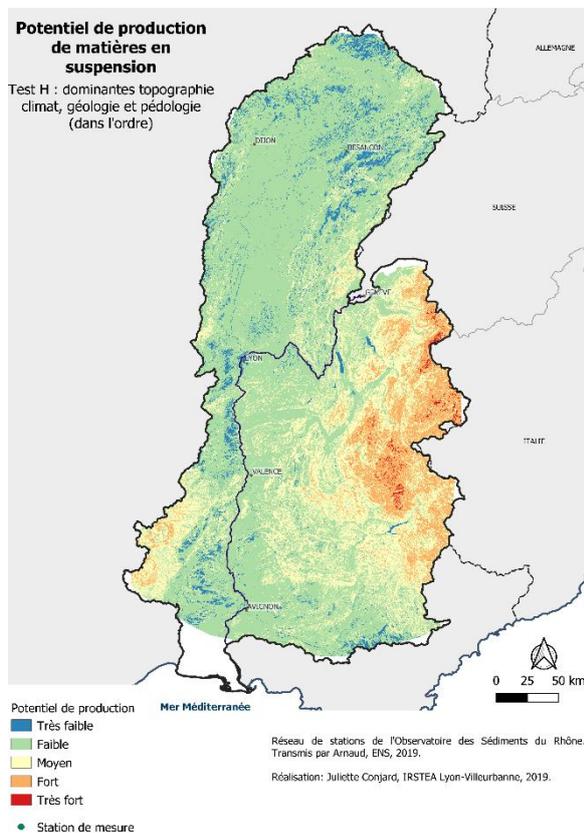


Figure 38 : Potentiel de production de MES global - Test M : dominantes climat, géologie, pédologie et topographie.



Les valeurs de chaque pixel des rasters Q, h et M ont été reclassées suivant les règles suivantes : De 1 à 1.7 = 1 ; 1.7 à 2.5 = 2 ; 2.5 à 3.3 = 3 ; 3.3 à 4.1 = 4 ; 4.1 à 5 = 5. Ensuite chacun de ses rasters ont été découpés à la taille des sept bassins de comparaison. De là, on génère un rapport sur les valeurs uniques de la couche raster qui renvoie le nombre et la superficie de chaque valeur dans une couche raster donnée. De là, on peut exprimer quelle est la part de chaque classe de sensibilité par rapport aux autres (Figure 40).

Figure 39 : Potentiel de production de MES global - Test H : dominantes topographie, climat, géologie et pédologie

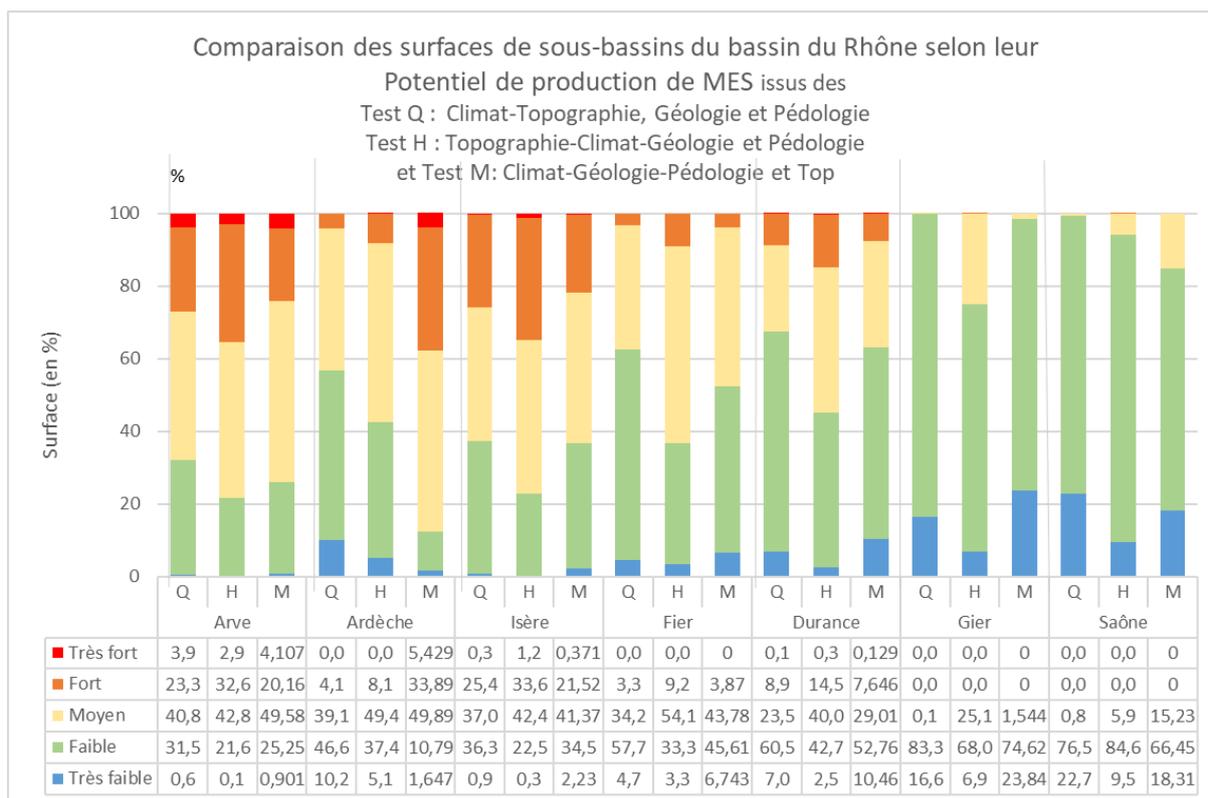


Figure 40: Comparaison des surfaces de sous-bassins du Rhône selon leur potentiel de production - Tests Q, H et M

Les surfaces les plus sensibles (potentiel de production fort et très fort) (Tableau 8) sont : l'Arve, l'Isère et la Durance pour les tests H et Q et l'Ardèche, l'Arve et l'Isère pour le test M. Ces tests font bien ressortir l'information du Tableau 7 que le Gier et la Saône contribuent peu aux apports de MES au Rhône.

Tableau 8 : Bassins les plus sensibles à l'érosion selon les tests Q, H et M

Surfaces sensibles	Test H	Test Q	Test M
Ardèche	4,1	8,1	39,3
Arve	27,1	35,5	24,3
Isère	25,8	34,8	21,9
Durance	8,9	14,8	7,8
Fier	3,3	9,2	3,9
Gier	0	0	0,0
Saône	0	0	0,0

Le test qui correspond le plus aux flux moyens de MES par km² calculés et représentés en figure 35 est le test Q plaçant les bassins du plus au moins producteur de MES dans l'ordre suivant : Arve, Isère, Durance, Fier, Ardèche, Gier, Saône. Les flux moyens calculés proposaient la hiérarchie suivante : Arve, Fier, Ardèche, Isère, Durance, Gier, Saône. Il a été fait le choix de considérer les flux moyens sur l'ensemble des années de suivi (en t/s), soit la quantité moyenne transportée chaque seconde durant laquelle ce bassin a été suivi. L'ensemble des données disponibles ont été utilisées. Il aurait été plus judicieux de considérer les flux moyens annuels et de considérer des données au pas de temps de l'heure. En effet, il est probable que la hiérarchisation des flux présentés en figures 34 et 35 n'accorde pas assez de poids à l'apport en MES de la Saône au Rhône et qu'elle surestime l'apport de l'Arve au Rhône. La dominance des critères climat et topographie n'est peut-être

pas aussi marquée et un résultat tel que celui issu du test F (dominante géologie, climat, pédologie et topographie) serait peut-être plus proche de la réalité.

Ce protocole de validation s'est ainsi appuyé sur des données de flux de MES calculées à partir de la turbidité et du débit mesuré en sept stations. Ces informations quantitatives et la hiérarchisation qui en a découlé ont été croisées avec les données quantitatives de production sédimentaire sur deux bassins versants de petite taille. Il a également s'agit d'intégrer des avis d'experts ainsi que les différentes informations fournies par la littérature. Ci-dessous est une figure présentant la localisation des sept stations ainsi que des deux sous-bassins suivis (Figure 41).

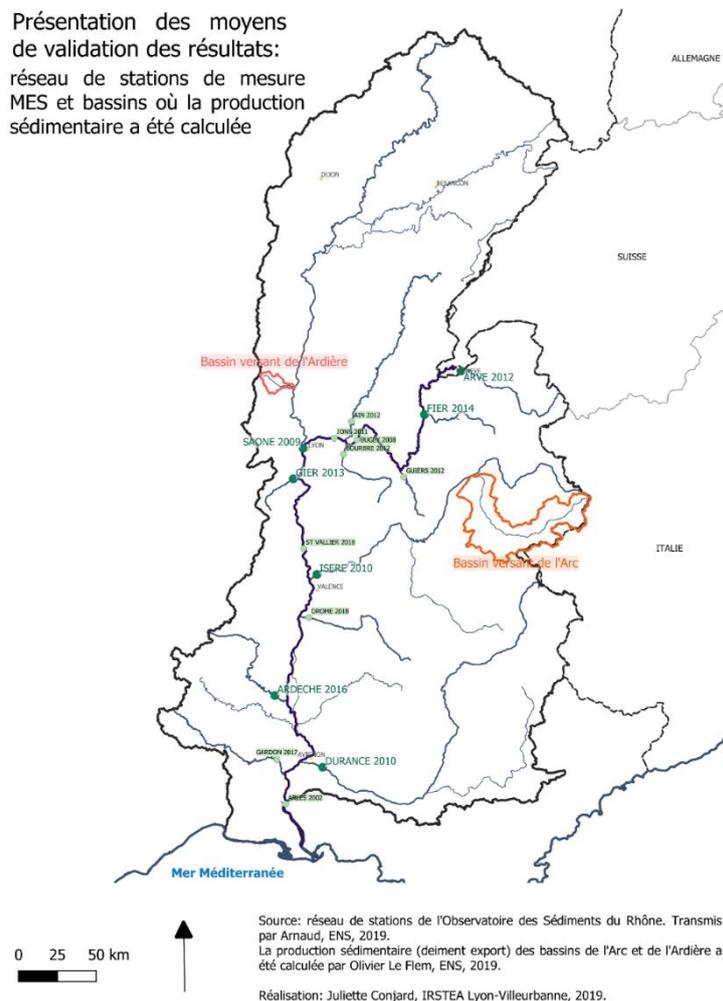


Figure 41 : Présentation des sept stations et deux sous-bassins suivis

Conclusion

Il existe de multiples méthodes permettant d'estimer la production sédimentaire d'un bassin. L'approche quantitative du calcul des flux de matières en suspension issus de la mesure des concentrations de matières en suspension dans le cours d'eau est fiable mais ponctuelle dans l'espace et le temps. Elle ne prend pas assez en compte la dimension spatiale de la production sédimentaire et se concentre essentiellement sur les exutoires des cours d'eau. D'autres approches quantitatives tentent de prendre en compte l'entièreté du bassin versant dans leur caractérisation de la production sédimentaire de la zone. Néanmoins, ces approches se heurtent aux mêmes contraintes techniques et économiques impliquant un manque de données. Estimer quantitativement la production en sédiments fins d'un bassin versant en tous points ne peut se faire que sur des bassins instrumentés, donc généralement de petite taille, comme celui de l'Arc ou de l'Ardière par exemple. A l'échelle du bassin versant du Rhône, une méthode différente a ici été proposée sous la forme d'une analyse multicritère spatiale par combinaison de facteurs pondérés. Cette méthode ne prétend pas quantifier la production sédimentaire mais l'évaluer qualitativement en hiérarchisant ses zones de production. Elle permet de mettre en exergue les zones qui, par leurs caractéristiques physiographiques (topographiques, géologiques, pédologiques) et les facteurs externes auxquels elles sont soumises (précipitations intenses, précipitations neigeuses) sont plus vulnérables à l'érosion hydrique et ainsi au détachement de sédiments fins. Pour cela, il a s'agit de sélectionner des critères et de déterminer de leur influence sur la production de sédiments fins. Les données utiles ont été collectées et traitées. Là, certains critères ont été écartés ou regroupés pour insuffisance de données ou résolution trop basse. Ensuite, des catégories sont définies et les valeurs des critères sont reclassifiées au sein de ces catégories. Critères, sous-critères et classes sont représentés en arborescence, par niveaux. Pour finir, les critères sont pondérés entre eux par une Analyse Hiérarchique des Procédés et une somme pondérée est effectuée. 24 résultats sont issus de cette pondération et une méthode d'analyse des résultats est nécessaire. Pour cela, il a été fait le choix de considérer des données quantitatives. Tout d'abord ont été pris en compte les résultats du modèle de transfert sédimentaire Invest sur les bassins versants de l'Arc (Maurienne) et de l'Ardière (Beaujolais). Ensuite, les résultats de l'analyse ont été comparés aux flux de matières en suspension estimés à partir de mesures de turbidité et de débit en sept stations jugées représentatives de la diversité des apports sédimentaires des affluents. Des avis d'expert et les estimations contenues dans la littérature ont été pris en compte. Cette méthodologie est rélicable sur tout type de bassin versant en considérant des données à toute résolution spatiale. Seule la cohérence des résolutions spatiales doit être respectée. Intégrée au logiciel libre QGis, elle est accessible à tous mais peut néanmoins être mise en place très facilement sur ArcGIS. Il serait très intéressant de poursuivre ce travail par la modélisation hydro-sédimentaire du bassin versant du Rhône. Cela permettrait notamment de prendre en compte l'important impact des ouvrages hydro-sédimentaires. Plus largement, cela permettrait de considérer la dimension spatiale du transfert de sédiments fins, et de particules fines.

Bibliographie et webographie

- Antoine, G., Jodeau, M., Camenen, B., Esteves, M., Nemery, J., Lauters, F., 2013. Estimation of the suspended matter fluxes during the Arc River flushing events of 2006 to 2011. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau* 4, 43–49. <https://doi.org/10.1051/lhb/2013032>
- Bascopé, R., 2015. Analyse multicritère pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale aux séismes: exemple de Mendoza (Argentine). Laboratoire Pacte.
- Bassono, C., 2016. Développement d'une méthode d'analyse multicritère pour le choix variétal en betterave sucrière.
- Béguin, E., Lorinquer, E., Pavie, J., Ferrand, M., 2012. Analyse environnementale multicritères et voies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) des systèmes d'exploitation bovins lait. Réseau d'Élevage Bovin lait de Normandie - Institut de l'Élevage, Amiens.
- Belcourt, O., Salze, D., Colin, C., 2016. Roches métamorphiques.
- Ben Hammadi, M., 2005. Modélisation de l'érosion hydrique sur deux parcelles de vigne à itinéraires culturaux différents en milieu méditerranéen. Université de Montpellier 2, Montpellier.
- Bertrand, M., 2009. 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. (Mémoire de Master 2 SIG et Gestion de l'Espace.). CEMAGREF Lyon ; Université Jean Monnet, Saint-Etienne.
- Bethemont, J., Bravard, J.-P., 2016. Pour saluer le Rhône. Editions Libel, Lyon.
- Birgand, F., Lefrancois, T., Grimaldi, C., Novince, E., Gilliet, N., Gascuel Odoux, C., 2004. Mesure des flux et échantillonnage des matières en suspension sur de petits cours d'eau. *Ingénieries - E A T* 21–35.
- Boulvain, F., Dumont, P., 2019. Lexique de géologie sédimentaire.
- Bravard, J.-P., Clémens, A., 2008. Le Rhône en 100 questions, GRAIE (Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau). ed.
- Brochot, S., 1998. Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle - Apports des versants et production de sédiments. *Ingénieries - E A T* 61–78.
- Caloz, R., Collet, C., 2011. Analyse spatiale de l'information géographique, Science & ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes [diff. Geodif], Lausanne [Paris].
- Canellas, C., Gibelin, A.-L., Lassègues, P., Kerdoncuff, M., Dandin, P., Simon, P., 2014a. The 1981-2010 Aurelhy gridded climate normals [WWW Document]. URL <https://doi.org/10.4267/2042/53750>
- Chevallier, M., 2015. Mise en œuvre d'un outil SIG et d'un processus d'analyse multicritère semi-automatisé pour l'aménagement du territoire : application dans le cadre de la révision du SCoT des Vosges Centrales (other). Syndicat mixte du SCoT des Vosges Centrales, 4 rue Meyer, 88190 Golbey.
- Delmas, M., Cerdan, O., Mouchel, J.-M., Garcin, M., 2009. A method for developing a large-scale sediment yield index for European river basins. *Journal of Soils and Sediments* 9, 613–626. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0126-5>
- Dequincey, 2019. Plan d'aplatissement, plans de schistosité (S) et plans de cisaillement (C) —

- Planet-Terre [WWW Document]. URL <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/schisto-cisailt.xml> (accessed 4.24.19).
- Dumas, P., 2010. Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta - Bouloupari (Nouvelle-Calédonie). *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux* 63, 567–584. <https://doi.org/10.4000/com.6123>
- El Hage Hassan, H., Charbel, L., Touchart, L., 2015. Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqôra. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement* 141–156. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4572>
- Gilliet, N., Fovet, O., Grimaldi, C., Ndom, M., 2018. Mesure en continu de la concentration en matières en suspension dans des petits cours d'eau par turbidimétrie 15.
- Håkanson, L., Mikrenska, M., 2005. Suspended particulate matter (SPM) *in* rivers: Empirical data and models. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.030>
- IUSS Working Group WR, 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015 - International soil classification system for naming soils and creating legend for soil maps. FAO, Rome.
- Joly, F., 1967. La cartographie des formations superficielles, d'après Yvette Dewolf. *Annales de géographie* 76, 78–79.
- Kummert, M., Delaloye, R., 2018. Regional-scale inventory of periglacial moving landforms connected to the torrential network system. *Geographica Helvetica* 73, 357–371. <https://doi.org/10.5194/gh-73-357-2018>
- Kummert, M., Delaloye, R., Braillard, L., 2018. Erosion and sediment transfer processes at the front of rapidly moving rock glaciers: Systematic observations with automatic cameras in the western Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 29, 21–33. <https://doi.org/10.1002/ppp.1960>
- Lagadec, L.-R., 2017. Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire (thesis). Grenoble Alpes.
- Latulippe, C., Peiry, J.-L., 1996. 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* 84, 29–44. <https://doi.org/10.3406/rga.1996.3856>
- Launay, M., 2014. Flux de matières en suspension, de mercure et de PCB particulières dans le Rhône, du Léman à la Méditerranée (thesis). Lyon 1.
- Le Bescond, C., Le Coz, J., Coquery, M., Thollet, F., Panay, J., Lagouy, M., Buffet, A., Dugué, V., Poulier, G., Dabrin, A., Masson, M., Miège, C., Dramais, G., Grisot, G., Gairoard, S., Radakovitch, O., Delanghe, E., Angeletti, B., Gattacecca, J., Raimbault, P., Fornier, M., Lepage, H., 2017a. Rapport sur le fonctionnement du réseau OSR d'observation des flux de matières en suspension et de contaminants particuliers et sur la bancarisation des données pour l'année 2016 (OSR4). Observatoire des Sédiments du Rhône.
- Le Bescond, C., Thollet, F., Poulier, G., Gairoard, S., Lepage, H., Branger, F., Jamet, L., Raidalet, N., Radakovitch, O., Dabrin, A., Coquery, M., Le Coz, J., 2017b. Des flux d'eau aux flux de matières en suspension et de contaminants associés : gestion d'un réseau de stations hydro-sédimentaires sur le Rhône [WWW Document]. URL https://irsteadoc.irstea.fr/exl-php/getvue/p_recherche_publication (accessed

4.3.19).

- Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., Bardet, C., Thorette, J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Institut Français de l'Environnement 106.
- Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., Jamagne, M., Lambert, J.J., Le Bas, C., King, D., Cerdan, O., Leonard, J., Bresson, L.-M., Jones, R.J.A., 2005. Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database using pedotransfer rules. *Advances in Environmental Modelling and Monitoring* 2.
- Le Gouée, P., Delahaye, D., Bermond, M., Marie, M., Douvinet, J., Viel, V., 2010. SCALES : a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (Northern-Western France). *Earth Surface Processes and Landforms* 887–901.
- Le Roux, J.J., Newby, T.S., Sumner, P.D., 2007. Monitoring soil erosion in South Africa at a regional scale: review and recommendations. *South African Journal of Science* 103, 329–335.
- Lefrançois, J., 2007. Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits bassins versants agricoles sur schiste (phdthesis). Université Rennes 1.
- Legoût, C., 2015. Erosion et transferts hydrosédimentaires dans les bassins versants : apports de la caractérisation physique des particules pour la compréhension et la modélisation des processus (thesis). Université de Grenoble.
- Lehoux, N., Vallée, P., 2004. Analyse multicritère. URL https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance_publique/files/files/documents/performance/controle_gestion/qualite_et_CG/Analyse_multicriteres/1_Multi_criteres2004.pdf
- Lemercier, B., Walter, C., 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols.
- Libes, Y., n.d. Les eaux usées et leur épuration 17.
- Macary, F., 2013. Évaluation des risques de contamination des eaux de surface sur des bassins versants agricoles. Approches multiscalaires par modélisation spatiale et analyse multicritère pour l'aide à la décision (thesis). Toulouse, INPT.
- Macary, F., Morin, S., Probst, J.-L., Saudubray, F., 2014. A multi-scale method to assess pesticide contamination risks in agricultural watersheds. *Ecological Indicators* 36, 624–639.
- Mano, V., 2008. Processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues - optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique - (Thèse). Grenoble 1.
- Martin, C., 1975. L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal : les enseignements d'une station expérimentale. *Revue de Géomorphologie Dynamique* XXIV, 49–63.
- Mohamed, E.A.S., Mohamed, R., El Idrissi, A., 2017. Integration of gis and multicriterial hierarchical analysis for aid in urban planning: Case study of khemisset province, Morocco. 1 71–90. <https://doi.org/10.6018/geografia/2017/280211>
- Nicod, J., 1995. Carte géomorphologique des karsts de France. Notice d'une maquette au 1/3 000 000 environ. *Karstologia* 25, 21–34. <https://doi.org/10.3406/karst.1995.2351>
- Pajon-Perrault, N., 2018. Métamorphisme : l'essentiel de ce qu'il faut savoir — Eduterre [WWW Document]. URL <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/metamorphisme/generalites-lessentiel-de-ce-quil-faut-savoir> (accessed 4.24.19).
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L.,

- Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Patault, E., Alary, C., Franke, C., Gauthier, A., Abriak, N.-E., 2017. Analyse multi-échelle des processus d'érosion et de transfert de sédiments sur le bassin versant de la Canche, in: XIV Th International Symposium on Environment, Catalysis and Process Engineering. IMT Lille Douai, Douai, France.
- Petelet-Giraud, E., Negrel, P., 2007. Apport de matières en suspension à la Méditerranée : le rôle des crues dans le bilan des exportations du bassin-versant de l'Hérault. *Techniques Sciences Méthodes* 2007, 55.
- Probst, J.-L., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. *Persée - Portail des revues scientifiques en SHS*.
- Raymond, S., 2011. Incertitudes des flux transportés par les rivières (Matière en suspension, nutriments, sels dissous) Vers un système expert d'optimisation des méthodes de calcul (phdthesis). Université François Rabelais - Tours.
- Tacnet, J.M., Batton-Hubert, M., Dezert, J., 2010. Analyse multicritères et fusion d'information pour l'expertise et la gestion intégrée des risques naturels en montagne, in: Colloque LambdaMu 17. La Rochelle, France, p. 10 p.
- Tockner, K., Uehlinger, U., Robinson, C.T., 2009. *Rivers of Europe*, Elsevier. ed, Rivers of Europe. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369449-2.X0001-X>
- Université de Laval, 2019. Faculté des sciences et de génie - département de géologie et de génie géologique.
- Van Der Knijff, J., Jones, R.J., Montanarella, L., 2000. Soil Erosion Risk Assessment in Europe. - ESDAC - European Commission.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Walling, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology, Scale Problems in Hydrology* 65, 209–237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Wasson, J.-G., Chandèsris, A., Pella, H., Blanc, L., 2002. Les hydro-écorégions de France métropolitaine - Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. *Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative*, Lyon.
- Yan, C., 2018. Analyse multicritère pour évaluer les options de chauffage des communautés isolées du Nunavik (masters). École de technologie supérieure.

Différentes listes et tables (figures, tableaux, photos)

Liste des figures

Figure 1: Classes sédimentaires en fonction du diamètre des particules _____	6
Figure 2 : Présentation générale du bassin versant du Rhône _____	9
Figure 3: Lône de la basse vallée de l'Ain. Source: Conservatoire d'espaces naturels Rhône-Alpes _	10
Figure 4: Arc, affluent de l'Isère. La Chambre (73) _____	10
Figure 5: Gestion sédimentaire du Buëch, affluent de la Durance. Source : Le Dauphiné. _____	10
Figure 6: Gorges du Chassezac, affluent principal de l'Ardèche Source: cevennes-ardeche.com ____	10
Figure 7: Nature de l'occupation du sol simplifiée _____	11
Figure 8: Opérations de gestion sédimentaire sur le Haut-Rhône à Seyssel. Compagnie Nationale du Rhône, 2016. _____	12
Figure 9 : Bennes à sédiments type Van Veen pour extraction du haut d'un pont - SDEC _____	13
Figure 10: Principe de mesure d'un turbidimètre. Source : Gilliet et al., 2018 _____	14
Figure 11: Échelle de comparaison par paires selon Saaty (1980) in Chevallier, 2007 _____	23
Figure 12: Classification simple des grandes formes du relief. Source: www.esrifrance.fr/sig2008/asconit.htm _____	27
Figure 13 : Répartition des zones karstiques du bassin versant du Rhône _____	30
Figure 14 : Structure des roches et degré de métamorphisme des roches du bassin versant du Rhône – au 1/1 000 000 _____	31
Figure 15: Zones sismiques de France. Source: www.cnews.fr/france/2016-04-28/ou-sont-les-zones-sismiques-en-france-728341 _____	32
Figure 16: Ouvrages hydroélectriques de faible et moyenne ampleur sur le bassin versant du Rhône _____	36
Figure 17: Répartition des zones de précipitations neigeuses sur le bassin versant du Rhône _____	38
Figure 18: Répartition des zones de précipitations intenses (hors période nivale) sur le bassin versant du Rhône _____	39
Figure 19: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de l'inclinaison de la pente _____	40
Figure 20: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la courbure de la pente _____	41
Figure 21: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la lithologie _____	43
Figure 22: Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la nature physico- chimique des sols _____	45
Figure 23 : Potentiel de production de matières en suspension en fonction de la nature de l'occupation du sol _____	47
Figure 24 : Schéma des facteurs permettant de déterminer le potentiel de production de MES ____	49
Figure 25: Potentiel production de matières en suspension lié à la topographie _____	50
Figure 26 : Potentiel de production de matières en suspension lié à la pédologie _____	51
Figure 27: Potentiel de production de matières en suspension en fonction du forçage hydro- climatique _____	52
Figure 28: Pondérations des différents critères et tests associés (en %) _____	53
Figure 29 : Potentiel de production de MES général - Test F : dominante géologie, climat, pédologie et topographie _____	54

Figure 30: Sediment export sur le bassin de l'Ardière _____	55
Figure 31: Sediment Export sur le bassin de l'Arc _____	55
Figure 32: Graphique des correspondances sur l'Arc _____	56
Figure 33: Graphique des correspondances sur l'Ardière _____	56
Figure 34 Disponibilité des chroniques de flux de MES dans la BDOH pour chacune des stations instrumentées par année _____	57
Figure 35 : Flux moyens de MES des affluents principaux du Rhône par km ² _____	58
Figure 36 : Flux moyens de MES des affluents principaux du Rhône issus des mesures en stations _____	58
Figure 37 : Potentiel de production de MES global - Test Q : dominantes climat, topographie, géologie et pédologie _____	59
Figure 38 : Potentiel de production de MES global - Test M : dominantes climat, géologie, pédologie et topographie. _____	59
Figure 39 : Potentiel de production de MES global - Test H : dominantes topographie, climat, géologie et pédologie _____	59
Figure 40: Comparaison des surfaces de sous-bassins du Rhône selon leur potentiel de production - Tests Q, H et M _____	60
Figure 41 : Présentation des sept stations et deux sous-bassins suivis _____	61

Liste des tableaux

Tableau 1 : Indice aléatoire en fonction du nombre de critères dans le cadre d'une AHP.....	24
Tableau 2: Classification des degrés de métamorphismes en fonction de leur propension à produire des matières en suspension	31
Tableau 3: Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction de l'inclinaison de la pente.....	40
Tableau 4: Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction des courbures de la pente	41
Tableau 5 : Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols.....	45
Tableau 6 : Classification du potentiel de production du bassin versant du Rhône en fonction de l'occupation du sol	46
Tableau 7 : Bassins fournisseurs de MES selon la littérature.....	57
Tableau 8 : Bassins les plus sensibles à l'érosion selon les tests Q, H et M	60

Table des matières

Introduction – problématique	6
1. Contexte : présentation de l'espace d'étude : le bassin versant du Rhône	9
1.1 - Contexte géographique et hydrographique	9
1.2 - Contexte climatique	10
1.3 - Contexte géologique	11
1.4 - Contexte lié à l'utilisation anthropique des sols	11
1.5 - Contexte – aménagements du fleuve	12
2. Méthodes d'estimation de la production sédimentaire dans les cours d'eau	12
2.1 - Méthodes quantitatives appliquées au cours d'eau	12
2.1.1. Méthodes de détermination des concentrations en MES	13
2.1.2. Méthodes d'estimation des flux de MES	15
2.2 - Méthodes quantitatives appliquées au bassin versant :	15
2.2.1. Sediment Delivery Ratio	15
2.2.2. Modélisation hydro-sédimentaire : simulation de la production sédimentaire	16
2.3 - Méthodes qualitatives et semi-quantitatives appliquées au bassin versant	18
2.3.1. Analyse spatiale et production sédimentaire	19
2.3.2. Analyse multicritère et production sédimentaire	19
2.3.3. Analyse multicritère à dimension spatiale	21
3. Mise en place de la méthode d'analyse spatiale multicritère sur le bassin versant du Rhône	25
3.1 - Facteurs de production de MES : quels critères pour le bassin versant du Rhône ?	25
3.1.1. Influence de la géomorphologie	25
3.1.2. Influence des facteurs liés aux substrats géologiques	27
3.1.3. Influence des sols (pédologie)	32
3.1.4. Influence des aménagements anthropiques	34
3.1.5. Implication du forçage hydro-climatique	36
3.2 - Mise en place de la classification des valeurs	40
3.2.1. Classifications des critères liés à la géomorphologie	40
3.2.2. Classifications des critères liés à la géologie	41
3.2.3. Classifications des critères liés à la pédologie	44
3.2.4. Classification des critères liés au forçage hydro-climatique	48
3.3 - Test et pondération des paramètres : résultats globaux	48
3.3.1. Pondération intercritère : niveau 2	50

3.3.2. Tests de pondération des critères et résultats	52
4. Mise en place d'une méthodologie d'analyse et de validation des résultats	55
4.1 - Comparaison avec données quantitatives (Sédiment Export) de deux sous-bassins	55
4.2 - Comparaison avec des données quantitatives de stations	57
Conclusion	62
Liste des figures	67

Table des annexes

Annexe 1 : Outils de mesure des concentrations de MES - schémas explicatifs
Annexe 2 : Détails supplémentaires sur l'utilisation de la turbidité pour qualifier les concentrations en MES
Annexe 3 : Tableau récapitulatif des méthodes quantitatives d'estimation de la production sédimentaire
Annexe 4 : Typologie des approches multicritère opérationnelles et des méthodes d'analyse. Source : Maystre <i>et al.</i> , 1994 in Macary, 2013
Annexe 5 : Point sur les outils statistiques utilisables dans le cadre d'une analyse multicritère
Annexe 6 : Formalisation de l'information géographique en donnée spatiale
Annexe 7 : Recensement de 63 indices morphométriques par Douvinet <i>et al.</i> (2008) dans leur revue bibliographique
Annexe 8 : Localisation et capacité nominale des stations d'épurations des eaux usées du bassin versant du Rhône
Annexe 9 : Code R pour calculer les moyennes journalières interannuelles des précipitations
Annexe 10 : Tableau des critères et des données utilisées pour chacun d'entre eux
Annexe 11: Sensibilité à l'érosion du bassin versant du Rhône en fonction de la nature de la lithologie – au 1/250 000 selon la classification d'Alain Chandesris (2002)
Annexe 12 : Etat de l'art des classifications des lithologies utilisées
Annexe 13 : Classification des lithologies et formations superficielles en fonction de leur potentiel de production de matières en suspension dans le bassin versant du Rhône.
Annexe 14 : Classification détaillée mise au point pour les départements Alpes de Haute-Provence, Bouches du Rhône et Vaucluse
Annexe 15 : Classification des caractéristiques pédogénétiques appliquée dans cette analyse
Annexe 16 : Pourcentage de perte en sol par Panagos, 2015.
Annexe 17 : Exemple de mise en place de la méthode AHP – vérification de la cohérence des jugements
Annexe 18 : Règles de reclassification pour tester la correspondance entre les valeurs du Sédiment export et les tests
Annexe 19 : Flux moyens de MES des affluents principaux du Rhône (au total et par km ²)

Annexes numérotées

Annexe 1 : Outils de mesure des concentrations de MES - schémas explicatifs

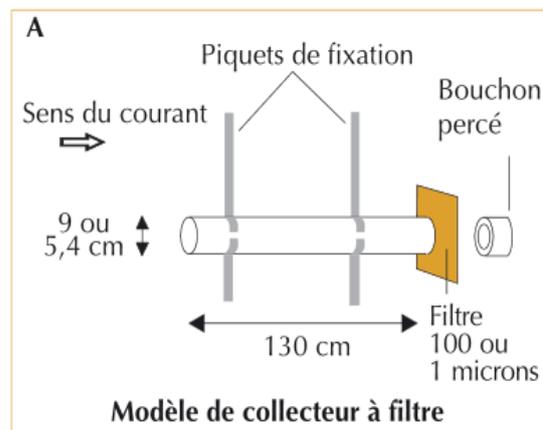
Annexe 1a : Principe de mesure d'un échantillonneur automatique d'eau.

Source: Patault, 2017.

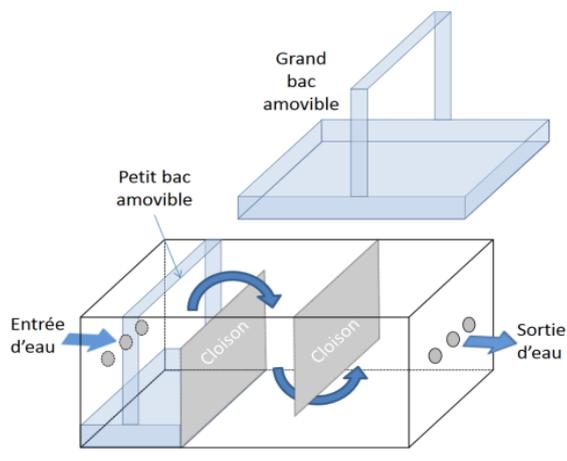


Annexe 1b : Principe de mesure d'un collecteur de MES à filtre

Source: Birgand, 2004.



Annexe 1c : Principe de mesure d'un piège à particules immergé en inox. Source : OSR4 2015-2017.

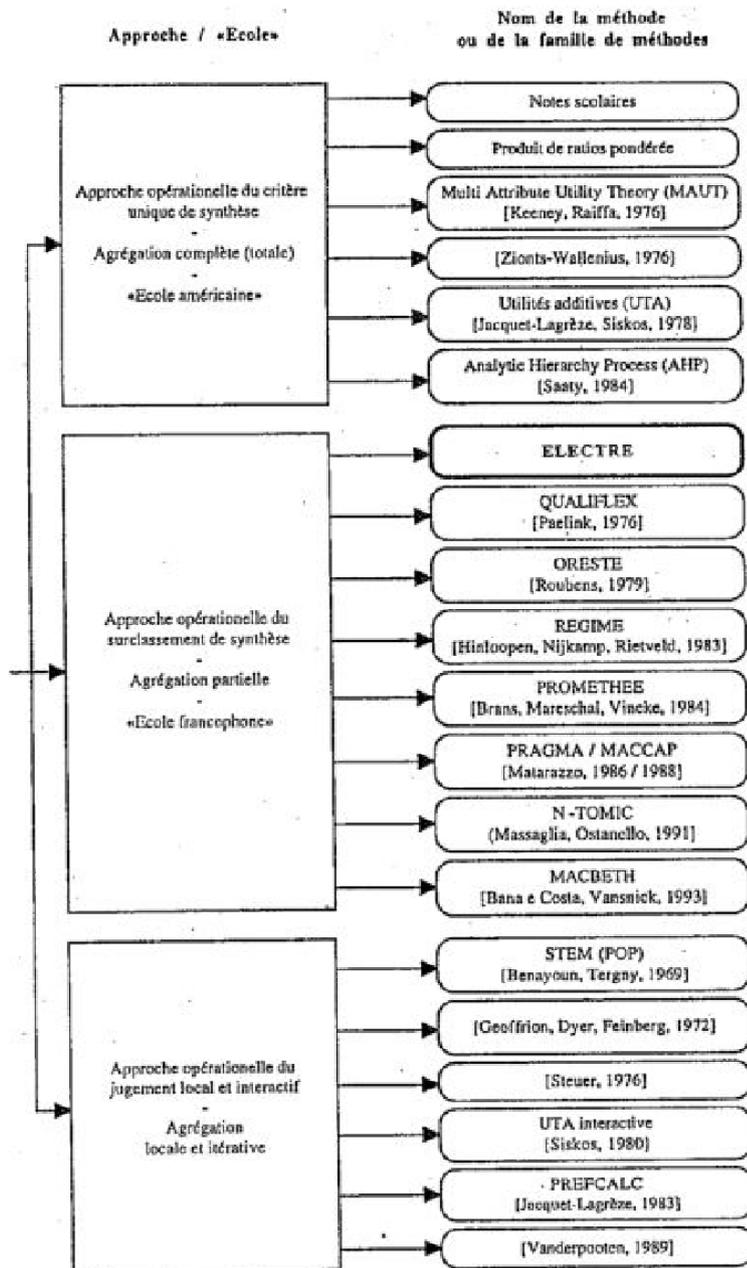


Annexe 2 : Détails supplémentaires sur l'utilisation de la turbidité pour qualifier les concentrations en MES

L'utilisation d'un turbidimètre repose sur l'hypothèse d'une relation relativement stable entre les valeurs de turbidité et les concentrations en MES et nécessite de ce fait une corrélation entre ces valeurs pour établir la relation (Birgand, 2004). La corrélation est vérifiée par des prélèvements manuels (Birgand, 2004) puis est mise en place une courbe de régression linéaire (courbe de calibration du capteur) entre les concentrations en MES et la turbidité, en prenant soin d'afficher les incertitudes (Birgand, 2004 ; Le Bescond, 2018, Gilliet et al, 2018). Cette relation, une fois extrapolée, permet de convertir les données de turbidité mesurées en continu en concentration en MES (Antoine, 2013). La courbe de calibration peut être construite à partir du logiciel Baratin (Le Coz *et al.*, 2014 *in* Le Bescond, 2018). Une fois l'appareil calibré, les données sont enregistrées en continu à un pas de temps proche de 10 minutes (Le Bescond, 2018 ; Birgand, 2004). Néanmoins, il est à noter que les mesures nécessitent une correction en raison de dysfonctionnements intrinsèques des raclours, menant à un encrassement des optiques et à une augmentation structurelle des valeurs de turbidité (Birgand, 2004).

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des méthodes quantitatives d'estimation de la production sédimentaire

Num.	Type de méthode	Type de prélèvements	Détail prélèvements	Nature de la donnée MES	Nom de la méthode	Matériel	Avantages	Inconvénients	Localisation	Type de méthode
1		Manuel	Prélèvement puis filtration/pesée		Prélèvement de surface	Seau	Peu d'intermédiaire et d'appareil.	Prélèvements locaux car contraintes physiques, économiques et techniques à l'entretien et la collecte.		
2	Mesure	Automatique	Prélèvements calibrés puis filtration/pesée	Discontinue	Crépine d'aspiration	Crépine d'aspiration dans la colonne d'eau et pompe	Nomage en volume, prélèvements réguliers et précis	Prélèvements locaux car entretien et collecte chers pour déploiement global.	En rivière	Quantitative
3		Automatique	Prélèvements calibrés puis filtration/pesée		Collecteur de MES	i.e. tube de PVC avec un filtre en tissu à mailles calibrées + banc de filtration	Facile à installer et relever.	Peut facilement être obturé (chroniques de données incomplètes); Prélèvements locaux car entretien et collecte chers.		
4			Prélèvements décantés puis pesés		Piège à particules	i.e. boîte en inox percée avec système de décantation forcée	Maintenance aisée et peu coûteuse	Prélèvements locaux car entretien et collecte chers pour déploiement global.		
6	Estimation	Automatique	Mesure de la turbidité par rétrodiffusion	Continue	Capteur de turbidité	Capteur de turbidité ou turbidimètre	Mesure de la turbidité moins coûteuse en temps, énergie ou personnel.	Nécessite de vérifier la corrélation turbidité/concentrations en MES par des prélèvements manuels. Dysfonctionnements intrinsèques des raclors; nécessité de corrections des données brutes.	Sur le fleuve ou à la confluence fleuve/affluent	Quantitative
7	Estimation		Rapport entre l'érosion produite sur l'ensemble du bassin versant et le flux spécifique de sédiments à l'exutoire du bassin versant. En fonction de facteurs environnementaux & géomorphologiques		Sediment Delivery Ratio (SDR)		Représentatif de l'ensemble du bassin versant et pas seulement de l'exutoire.	Nécessite flux spécifique de sédiments à l'exutoire du bassin versant. Difficile prise en compte de l'aire du bassin.	Un bassin en particulier	Semi-quantitative ; quantitative
8	Modélisation		Description de l'érosion hydrique du bassin et les facteurs influençant ces processus, dans le temps et/ou dans l'espace.		Modélisation hydro-sédimentaire		Caractériser le transfert des sédiments (barrages) à court et à moyen terme (étude prospective); en tout points du bassin	Beaucoup d'incertitude.	Toute échelle.	Semi-quantitative ; quantitative



Annexe 4 :
Typologie des approches multicritère opérationnelles et des méthodes d'analyse.
 Source : Maystre et al., 1994 in Macary, 2013

Annexe 5 : Point sur les outils statistiques utilisables dans le cadre d'une analyse multicritère

L'analyse de corrélation permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux variables. Elle est couramment utilisée.

La régression analyse la relation d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres. Lefrancois (2007) utilise la régression linéaire, la régression polynomiale ainsi que les logarithmes des données.

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse multivariée permettant l'étude simultanée d'un grand nombre de variables dont l'information totale ne peut pas être visualisée à cause d'un espace à plus de trois dimensions. Cette méthode permet de préciser les relations entre les variables et les phénomènes à l'origine de ces relations. L'objectif est d'avoir une information concentrée sur un minimum d'axe (Mouissi et Alayat, 2016).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classement itérative utilisée en analyse des données. Son but est de partitionner une population d'individus en différentes classes ou sous-groupes

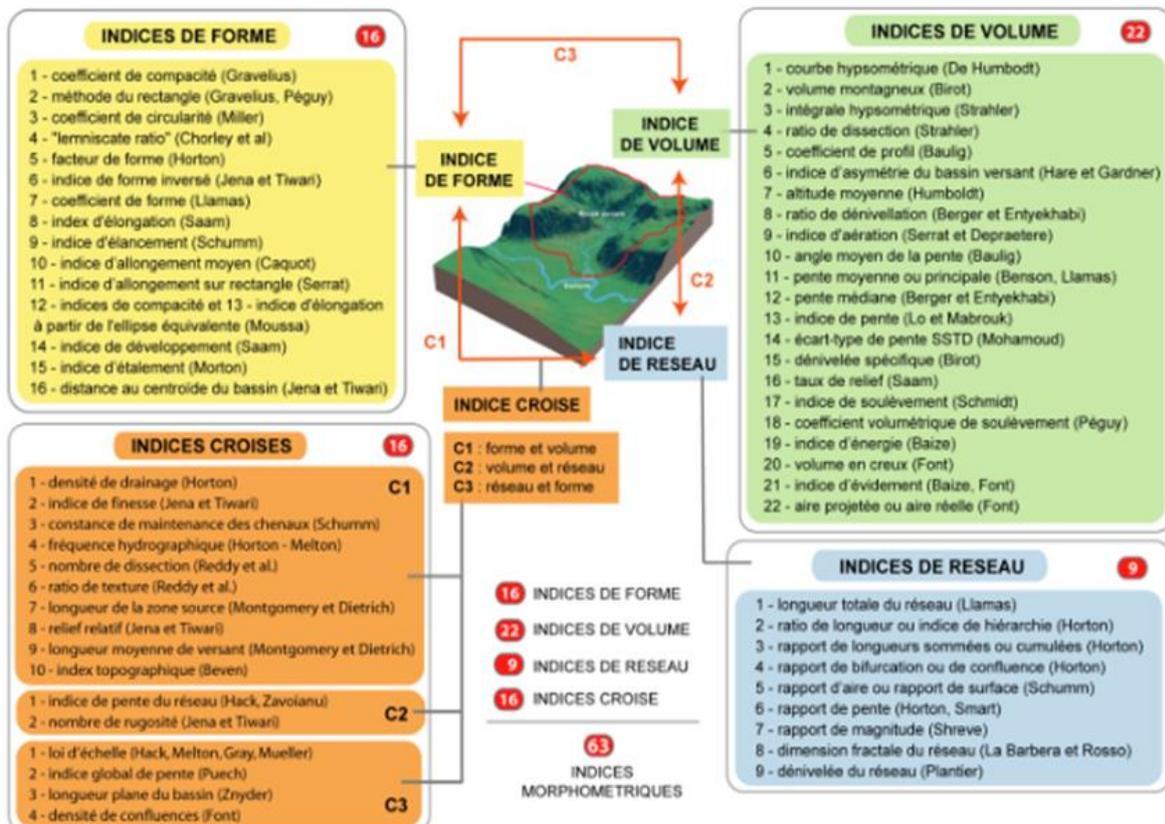
Source : Mouissi, S, et H Alayat. « Utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour la Caractérisation Physico-Chimique des Eaux d'un Ecosystème Aquatique: Cas du Lac Oubéira (Extrême NE Algérien) ». *Laboratoire Agriculture et Fonctionnement des Ecosystèmes Université Chadli Bendjedid 36000 Algérie*, 2016, 2214-2210.

Annexe 6 : Formalisation de l'information géographique en donnée spatiale

Une base de données spatiales est un ensemble, structuré et optimisé, d'informations possédant une géométrie. Une même information à caractère spatial peut être stockée sous deux formats : vecteur et raster. Sous format vecteur, l'information est reliée à un objet référencé géographiquement qui peut prendre plusieurs formes : points, lignes, polygones. Chaque objet géométrique possède des caractéristiques codées et stockées en tant qu'attributs dans des tables attributaires. Chaque thème d'information est représenté par une couche vecteur, ensemble d'objets élémentaires de même nature.

Le format raster implique un échantillonnage régulier de l'espace. D'un point de vue numérique, cela correspond à la création d'une grille de valeurs, une matrice de pixels. Chaque pixel stocke la valeur de la variable. Là où le format vecteur peut contenir les informations de plusieurs caractéristiques (plusieurs colonnes), le format raster ne contient les informations que d'une seule et unique variable, stockée sous forme numérique. Cette forme de la donnée peut toutefois être liée à des caractérisations qualitatives, par le biais d'un transcodage. L'ensemble des pixels auxquels on a attribué une valeur sur une certaine étendue est appelée couche raster.

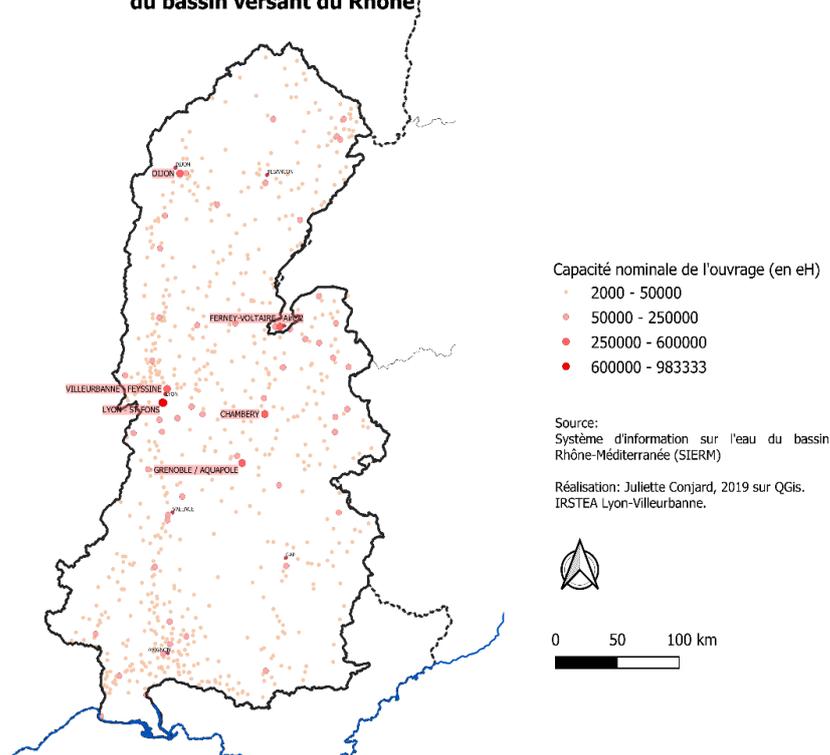
Annexe 7 : Recensement de 63 indices morphométriques par Douvinet et al. (2008) dans leur revue bibliographique



Source : Johnny Douvinet, Daniel Delahaye et Patrice Langlois, « Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurale », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 412, mis en ligne le 15 février 2008, consulté le 15 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/16103> ; DOI : 10.4000/cybergeo.16103

Annexe 8 : Localisation et capacité nominale des stations d'épurations des eaux usées du bassin versant du Rhône

Systèmes de Traitement des eaux usées principaux du bassin versant du Rhône



Annexe 9 : Code R pour calculer les moyennes journalières interannuelles des précipitations

```
install.packages("stringr")
library("stringr")
options(OutDec = ",")

precip=read.csv2("C:\\Users\\juliette.conjard\\Documents\\Donnees_SIG\\Donnes_climatiques\\preci
pitations_essai_sous_r.csv",sep=";",skip=9,header=T,fill=T,dec = ",")#colClasses="character",quote=""
liste=unique(str_sub(precip[7:(nrow(precip)-2),1], 1,5))
Final = matrix(nrow=length(liste),ncol=(ncol(precip)-2))

for(c in 3:ncol(precip)){
  for(j in 1:length(liste)){
    M = mean(as.numeric(precip[which(str_sub(precip[,1],1,5) == liste[j]),c]))
    Final[j,c] = M
  }
}
view(M)

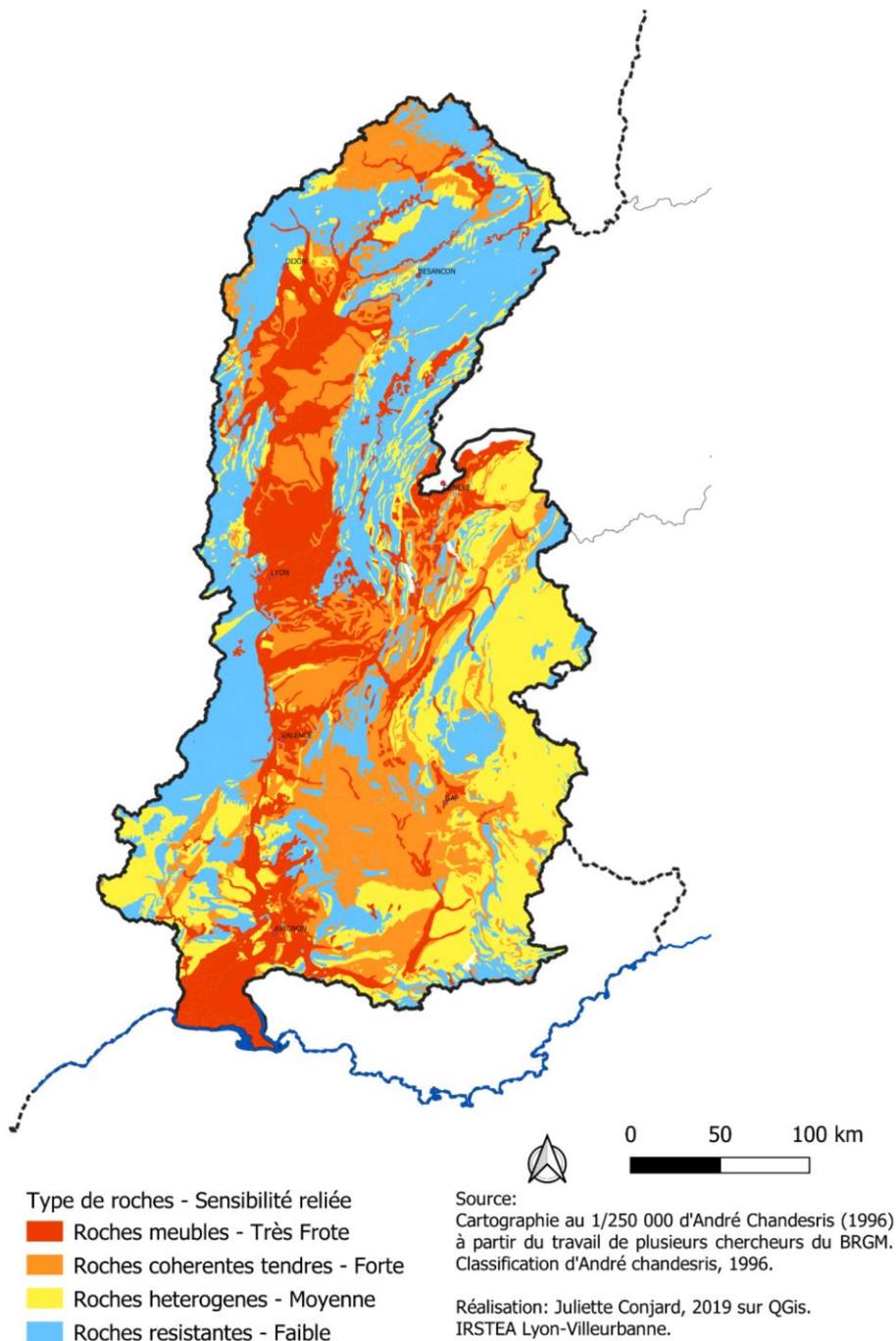
Final = cbind(liste,Final)
setwd("C:/Users/juliette.conjard/Documents/Donnees_SIG/Donnes_climatiques/Issu_de_R")
write.table(Final,"Final_precip.csv", sep=";",header=T,fill=T,dec = ",")
```

Annexe 10 : Tableau des critères et des données utilisées pour chacun d'entre eux

Numéro	Critère	Statut	Type de donnée	Résolution	Fournisseur donnée	Format
1	Inclinaison de la pente	Utilisé	MNT	25m	IGN	Raster
2	Courbure de la pente	Utilisé	MNT	25m	IGN	Raster
3	Lithologie	Utilisé	Carte géologique départementale	50m	BRGM	Vecteur
4	Formations superficielles	Intégré au critère lithologie	/	/	/	/
4 bis	Glaciers rocheux	Ecarté	Inventaire alpin	/	RTM	Vecteur
5	Nature karstique de la roche	Ecarté / Intégré	Inventaire national	50m	SIE	Vecteur
6	Nature métamorphique de la roche	Intégré au critère lithologie	Carte géologique	1000m	BRGM	Vecteur
7	Tectonique	Ecarté	/	/	/	/
8	Pédogénèse	Utilisé	BD Européenne des sols	/	Commission européenne et European Soil Bureau Network	Vecteur
9	Nature de l'occupation du sol	Utilisé	BD CLC Européenne	/	CLC	Vecteur
10	Stations d'épuration	Ecarté	Inventaire ouvrages	/	SIERM	Vecteur
11	Ouvrages hydroélectriques	Ecarté	Inventaire ouvrages	/	SIOUH	Vecteur
12	Précipitations intenses	Utilisé	Données SAFRAN	/	Météo France	Raster
13	Proportion de précipitations neigeuses	Utilisé	Données SAFRAN	/	Météo France	Raster
14	Jours de gel	Ecarté	Données SAFRAN	/	Météo France	Raster

**Annexe 11: Sensibilité à l'érosion du bassin versant du Rhône en fonction de la nature de la lithologie
– au 1/250 000 selon la classification d'Alain Chandesris (2002)**

**Sensibilité à l'érosion du bassin versant du Rhône en
fonction de la nature de la lithologie - 1/250 000**



Annexe 12 : Etat de l'art des classifications des lithologies utilisées

Annexe 12a: Classification des principaux types de roches selon leur sensibilité moyenne à l'érosion mécanique.

Classification de Dubus ¹(1989) à partir de Trewartha et al. (1967) et Chorley et al. (1984). Présentée dans Probst (1992).

Dubus 1989	
Application : grands bassins fluviaux du monde	
Types de roches	Coefficient
Roches métamorphiques anciennes et roches plutoniques associées	1
Roches volcaniques	2
Roches sédimentaires consolidées	4
Différents types de roches en zones plissées et faillées	10
Roches sédimentaires non consolidées	32
Alluvions récentes	40

Marie, 1984		
Application : bassin versant de la Maurienne, haute montagne.		
Type de substrats	Description	Classification
Formations rocheuses cohérentes	Micaschistes, gneiss, calcaires, calcschistes, grès, microdiorites, roches vertes	1 – Très faible
Formations rocheuses fracturées	Dolomies, conglomérats, quartzites, grès, calcaires marneux, calcschistes et schistes, brèches	2 - Faible
Formations rocheuses peu cohérentes	Marnes, schistes et grès en association, gypse et cargneule	3 - Moyen
Formations meubles cohérentes	Moraines, alluvions, éboulis	4 – Forte
Formations meubles peu cohérente	Éboulements, terrains glissés, coulées boueuses	5 – Très forte

Annexe 12b : Classification des substrats selon leur aptitude à fournir des matériaux. Classification de Marie (1984).

¹Présentée dans Brochat (1998). Marie, R., CEMAGREF, 1984. Méthodologie de programmation des actions de Restauration des terrains en montagne. Phase d'élaboration des éléments techniques d'aide à la décision. Le cas de la Maurienne,

El Hage Hassan et al., 2014	
Application : Nord-Est Liban ; région montagnarde	
Type de roches	Classification sensibilité érosion
Calcaires durs de l'Aptien supérieur, dolomies et calcaires dolomitiques du Cénomanién	1 – Faible
Grès (argileux ou non), calcaires marneux de l'Aptien inférieur (argileux ou non)	2 – Moyen
Formations peu perméables : Quaternaire, marnes de l'Albien et supérieur	3 – Forte

¹ Dubus P. (1989) - Paramétrisation des grands bassins fluviaux du monde. Modélisation de l'érosion mécanique et de l'érosion chimique des continents. Mém. DEA, Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 30 p.

Latulippe, Peiry, 1996		
Application : bassin versant d'un grand cours d'eau : l'Isère		
Type de roches	Roches ou séries stratigraphiques retenues	Classification érodabilité
Schistes lustrés	Calcaires et marnes (SLci), « black shales » (SLcm) et schistes lustrés non différenciés (SL).	Forte
Flysch tertiaire	Séries schisteuse et calcaire.	
Lias calcaires	Calcaires séparés d'interlits marneux de l'étage Héttangien, Sinémurien et Carixien.	
Gypses et cargneules du Trias	Gypses et Cargneules.	
Formations quaternaires	Dépôts morainiques, dépôts fluvio-glaciaires, zone de glissement de terrain et ancienne coulée boueuse.	Très forte
Terres noires du Jurassique	Marnes noires de l'Oxfordien.	
Lias schisteux	Schistes noirs très fissiles des étages du Domérien, du Toarcien et de l'Aalénien	
Houiller briançonnais	Schistes noirs et versicolores, grès et conglomérat (Toutes les séries du houiller).	

Annexe 12c : Caractéristiques des formations géologiques les plus érodables sur le bassin-versant de l'Isère.

A partir de la notice de la carte géologique de la France au 1/ 250 000* : Ancecy). Présentée dans Latulippe et Peiry, 1996.

Annexe 12d: Classification des sensibilités à l'érosion des roches à l'échelle du bassin versant sur l'ensemble du Maghreb, à partir de Sogreah, 1983. Utilisée pour mettre en relation avec le drainage. Probst, 1992.

Probst, 1992		
Application : 153 bassins versants de tailles différentes au Maghreb (à partir de Sogreah, 1983), région semi-aride.		
Type de roches	Types de roches	Sensibilité à l'érosion
Roches dures	Micaschistes, calcaires, grès et granites	Faible
Roches moyennes	Marno-calcaires, shales et pélites	Moyen
Roches tendres	Marnes et marno-grès	Fort

Annexe 12e: Classification des matériaux selon leur érodabilité. Proposée par Montier, Daroussin, King (1998)

Montier et al., 1998			
Application : France			
Matériau	Erodabilité	Niveau de confiance	
Alluvions	Forte	Faible	
Calcaire marneux		Moyen	
Marnes		Élevé	
Sable alluvial ou glacio-fluvial, matériaux sableux et graveleux		Élevé	
Sable éolien, dépôts locaux		Élevé	
Limons		Élevé	
Flysch, molasse		Élevé	
Schiste		Moyen	
Ardoise		Moyen	
Sédiments fluviatiles anciens (tertiaires)		Moyenne	Moyen
Terrasses			Moyen
Craie			Moyen
Craie secondaire			Moyen
Argiles			Moyen
Sables	Moyen		
Limons pierreux	Moyen		
Schistes	Moyen		
Matière organique	Moyen		
Roches calcaires	Faible		Élevé
Matériaux argileux			Moyen
Argiles primaires, secondaires et tertiaires			Moyen
Roches argileuses			Faible
Roche sableuse			Élevé
Formations détritiques, Arkose		Faible	
Roches cristallines		Élevé	
Roches volcaniques		Faible	
Autres roches		Faible	

Bertrand, 2009	
Application : bassin versant de l'Arc en Maurienne, haute-montagne (Alpes).	
Lithologie	Sensibilité
Alluvions fluviales, dépôts lacustres actuels	Très forte
Dolomies, cargneules et gypses (Trias)	Très forte
Flysch noir' subbriançonnais (Eocène)	Très forte
Flysch ultra-helvétique et flysch des aiguilles d'Arves	Très forte
Gypses triasiques (Keuper)	Très forte
Houiller (Stéphanien et Stéphano-Autunien)	Très forte
Marnes (Aalérien et Lias supérieur)	Très forte
Pélites manganésifères (Crétacé supérieur)	Très forte
Schistes lustrés indifférenciés	Très forte
Terrains glissés, coulées boueuses	Très forte
Terres Noires, marnes (Oxfordien)	Très forte
Calcaires et dolomies (Trias moyen)	Forte
Calcaires et grès à Nummulites (Lutécien à Priabonien)	Forte
Calcaires marneux (Jurassique moyen)	Forte
Calcaires marneux (Jurassique moyen)	Forte
Eboulements en masse	Forte
Micaschistes chloriteux, série verte supérieure	Forte
Prasinities (« Roches vertes » des Schistes lustrés)	Forte
Serpentines (« Roches Vertes » des Schistes lustrés)	Forte
Calcaires (Jurassique – Crétacé indifférencié)	Moyenne
Calcaires (Lias indifférencié)	Moyenne
Calcaires à Calpionelles (Tithonique)	Moyenne
Calcaires à zones siliceuses	Moyenne
Conglomérat de base pour les flysch ultra-helvétiques	Moyenne
Moraines wurmiennes	Moyenne
Tithonique subalpin	Moyenne
Calcschistes planctoniques (Néocrétacé-Pélocène)	Faible
Gneiss (blastomylonites) de Cheserys	Faible
Gneiss (Permien métamorphique du Briançonnais interne)	Faible
Gneiss et micaschistes à grain fin (Gneiss Minuti)	Faible
Gneiss et micaschistes du « rameau interne » et externe	Faible
Leptynites micacées	Faible
Roches volcaniques : dacites, rholites, etc...	Faible
Amphibolites	Très faible
Granites	Très faible
Granites, blastomylonites	Très faible
Migmatites et amphibolites	Très faible
Orthogneiss, blastomylonites	Très faible
Quartzites (Trias inférieur)	Très faible
Socle cristallin ancien polymétamorphique, indifférencié, gneiss	Très faible

Annexe 12h : Classification de Chandesris établie à partir de Derruau, 1974, Rogers et Wasson, 1995. Présentée dans

Chandesris, 2002		
Application : 153 bassins versants de tailles différentes au Maghreb (à partir de Sogreah, 1983), région semi-aride.		
Type de roches	Types de roches	Sensibilité à l'érosion
Roches résistantes	Roches basaltiques	Basalte, basanite, hawaïte, mugéarites, trachyte, phonolites
	Roches cristallines	Granite, granodiorite, rhyolite, diorite, gabbros Roches métamorphiques cristallines : amphibolite, anatexite – Gneiss, Migmatites, micaschistes
	Roches détritiques et sédimentaires	Grès indurés, arkose, quartzites, conglomérats, meulière, calcaires massifs (karst)
Roches hétérogènes	Séries carbonatées	Alternances roches calcaires/marnes + séries secondaires/tertiaire et dolomies
	Flyschs	Flyschs sédimentaires éventuellement métamorphisés
	Schistes sédimentaires	Schistes primaires, schistes houillers, micaschistes
Roches cohérentes, tendres	Roches sédimentaires	Marnes, craies, gypses.
Roches peu consolidées	Roches détritiques	Molasses, argiles, alluvions anciennes
	Formations particulières	Sables, moraines, alluvions (fluvio-glaciaires ou fluviales). Roches volcaniques de type cinérites.

Annexe 13 :

Classification des lithologies et formations superficielles en fonction de leur potentiel de production de matières en suspension dans le bassin versant du Rhône.

Juliette Conjard, 2019.

Potentiel de production de MES	Lithologie		
Très forte	boulers	marne siliceuse	sable grossier argileux
	déchets d'industries extractives	moraine	sable moyen
	gaize	olistolites	sable siliceux
	graviers	petits cailloux	sable très grossier
	lahar	remblais	schiste noir
	lave	sable	silt
	limon	sable ferrugineux	tourbe
	loess	sable fin	vase
Forte	marne sableuse	sable grossier	
	alluvions	calcarénite	marne (33%<CO3<66%)
	altérite	calcarénite fine	marne bioclastique
	argile à graviers	calcschiste	marne détritique
	argile carbonatée	carneule	marne gypseuse
	argile ferrugineuse	chl oritoschiste	marne silteuse
	argile ligniteuse	colluvions	oolite ferrugineuse
	argile sableuse	craie	pélite
	argile silto-sableuse	diatomite	prasinite
	argilite carbonatée (10%<CO3<33%)	flysch	sable argileux
	argilite carbonatée silteuse	galéts	sable argilo-silteux
	argilite schisteuse	glace	sable calcaire
	arkose	grès feldspathique	sable glauconieux
	calcaire argileux (80%<CO3<90%)	grès ferrugineux	schiste
	calcaire glauconieux	grès moyen	schiste gréseux
	calcaire lumachellique	gypse	schiste tacheté
calcaire marneux	lignite	schistes ampéliteux	
calcaire micritique	lumachelle	terrassements	
Moyen	argile	calcaire grumeleux	grèze
	argile calcaire	calcaire sableux	jaspé
	argile glauconieuse	calcaire siliceux	marne calcaire (66<CO3%<80)
	argile sableuse carbonatée	charbon	marne glauconieuse
	argilite (CO3<10%)	conglomérat meuble à clastes jointifs	micaschiste
	bauxite	conglomérat meuble à matrice dominante	microbrèche
	blocs	conglomérat monogénique	microconglomérat
	brèche polygénique	conglomérat polygénique	radiolarite
	calcaire à chailles	dolocrète	schiste ardoisier
	calcaire à débris	dolomie	schiste bitumineux (métamorphique)
	calcaire ampéliteux	dolomie fine	schiste bleu
	calcaire argilo-silteux	fer	schiste carbonaté
	calcaire biodastique	grès	schiste carboné
	calcaire bioturbé	grès argileux	schiste siliceux
	calcaire coquillier	grès calcaire	séridoschiste
	calcaire détritique	grès calcaireux	silt argileux
	calcaire graveleux	grès fin	silt sableux
	calcaire grenu	grès glauconieux	siltite
	calcaire gréseux	grès grossier	siltite argilo-carbonatée
Faible	ankérite	carbonatite	mylonite
	argile plastique	conglomérat	opicalcite
	argilite calcaréo-dolomitique	conglomérat (volcano-séd.)	péridotite
	brèche	cornéenne	phylonite
	brèche auto-dastique	dacite	poudingue
	brèche basaltique	dolomie cristalline	pouzzolane
	brèche monogénique	grauwacke	pyroclastite
	brèche volcanoclastique	grès à ciment siliceux	roche intermédiaire
	calcaire	grès conglomératique	silex
	calcaire à biostromes	grès micacé	spilite
	calcaire à silex	grès quartzite	trachyandésite
	calcaire concrétionné	grès siliceux	trondhjemite
	calcaire construit	leptynite	tuf
	calcaire dolomitique	méta-sédiment	tuf à cristaux
	calcaire fossilifère	méta-siltite	tuf ignimbritique
	calcaire lithographique	méta-trondhjemite	tuf lithique
	calcaire noduleux	micaschiste à silicates d'alumine	tuf rhyolitique
	calcaire oolithique	micaschiste feldspathique	tuf soudé
	calcaire organique	migmatite	tuf vitrodastique
calcite			
Très faible	amphibolite	gneiss oillé	microleucogranite
	anatexite	granite	monzogranite
	andésite	granite porphyroïde	monzonite quartzifère
	aplite	granitoïde	monzosyérite
	basalte	granodiorite	néphéline
	basalte à olivine	ignimbrite	orthogneiss
	basalte alcalin	kératophyre	paragneiss
	basalte tholéitique	lamprophyre	pegmatite
	basanite	latite	pépérite
	blastomylonite	leucogranite	phonolite
	calcaire récifal	marbre	plagiogranite
	calcaire spathique (ou cristallin)	méta-basalte	pyroxénite
	calcaire sublithographique	méta-basite	quartz
	dipolin	méta-conglomérat	quartz filonien
	diabase	méta-diorite	quartz minéralisé
	diorite	méta-gabbro	quartzite
	diorite quartzifère	méta-granite	rhyodacite
	dolérite	méta-grauwacke	rhyolite
	édogte	méta-rhyolite	serpentinite
	gabbro	méta-tuf (volcanique)	skarn
	gneiss	méta-volcanite	syénite
	gneiss à silicates d'alumine	microdiorite	syénodiorite
	gneiss basique	microgabbro	tonalite
gneiss leptynitique	microgranite	trachyte	
gneiss migmatitique	microgranodiorite	travertin	

Annexe 14 : Classification détaillée mise au point pour les départements Alpes de Haute-Provence, Bouches du Rhône et Vaucluse

Description détaillée	Potentiel production MES
Aalénien : marnes et calcaires noduleux	3
Aalénien : marnes et mamo-calcaires	3
Aalénien inférieur : calcaires argileux	4
Aalénien supérieur : marnes et mamo-calcaires	4
Aalénien-Callovien : calcaires mameux à Cancellophycus	4
Albien : grès des Bruyères (lentille dans l'Albien supérieur)	3
Albien : grès glauconieux à ciment calcaro-argileux, marnes sablo-micacées	3
Albien : marnes et calcaires glauconieux et Clansayésien : marnes noires (non séparés)	4
Albien : marnes noires	5
Albien : sables ocreux	5
Albien-Cénomaniens : schistes noirs du Col de Vars et schistes à blocs	5
Albien-Cénomaniens ou Cénomaniens seuls : marno-calcaires à Orbitolines et à Exogyres	3
Albo-Aptien : sidérolitique du Coulon	3
Alluvions récentes : cailloutis, graviers, sables et limons (Quaternaire)	5
Alluvions tourbeuses récentes (Quaternaire)	5
Amphibolites massives ou rubanées et gneiss amphibolitiques	1
Andésites	1
Anisien-Ladiniens inférieurs : calcaires massifs	1
Aptien : marnes grises	4
Aptien supérieur (Gargasien) : marnes bleu-noir	5
Aptien supérieur-Albien : marnes sableuses et grès	4
Aptien supérieur-Cénomaniens : marnes noires	5
Aptien-Albien : Marnes noires à patine verdâtre	5
Aptien-Albien : schistes noirs	5
Aquitaniens : couche saumâtre de base de Lambert	3
Aquitaniens-Burdigaliens : molasse marine grés-conglomératique	2
Aquitaniens-Helvétiques : marnes et calcaires lacustres	4
Argiles de décalcification remplissant des poches karstiques (Quaternaire)	5
Argoviens (et bas du Rauraciens) : marnes foncées avec intercalations de bancs calcaréo-mameux	4
Argoviens-Kimméridgiens : calcaires et marnes	4
Argoviens-Oxfordiens supérieurs : calcaires noduleux	2
Astien (Plaisancien) : argiles et sables littoraux, milieu saumâtre	4
Astien (Plaisancien) : conglomérats fluviatiles polygéniques à galets impressionnés, marnes	3
Bajociens : "Terres noires"	5
Bajociens : calcaires à silex	2
Bajociens : calcaires dolomitiques et dolomie	2
Bajociens : calcaires oolithiques	2
Bajociens : mamo-calcaires à Cancellophycus	3
Bajociens et Bathoniens inférieurs : mamo-calcaires à Cancellophycus	3
Bajociens-Bathoniens : calcaires massifs et calcaires oolithiques	2
Bajociens-Calloviens inférieurs : marno-calcaires à Cancellophycus	3
Barémien : récifs	1
Barémien : calcaires à Rudistes (faciès urgonien)	1
Barémien : calcaires à silex	2
Barémien : calcaires argileux	4
Barémien : calcaires bioclastiques	3
Barémien : calcaires fins	3
Barémien : calcarénites blanches à faciès urgonien	4
Barémien : klippes sédimentaires crétacées	2
Barémien : olistolites de calcaires	5
Barémien supérieur-Bédoulien : mamo-calcaires et calcaires à silex	3
Barémien-Bédoulien (faciès urgonien) : calcaires à Rudistes, récifs	1
Barémien-Bédoulien : calcaires gris en gros bancs	1
Barémien-Bédoulien : calcarénites fines (faciès urgonien), récifs, calcaires bioclastiques, silex	4
Barémien-Bédoulien : calcaires argileux en dalles à silex bruns, dits "de Vaison"	3
Bartoniens : argiles de la Rouquette	3
Bartoniens : argiles vertes à attapulgités de Moimoiron	3
Bartoniens : conglomérats à galets urgoniens	2

Bartonien : marnes barriolées, calcaires blancs à silice	3
Bartonien : marnes sableuses marmorisées et encroûtements polyphasés de la Font du Loup	5
Bartonien : marnes vertes de la Débruge	4
Bartonien : quartzites de Lioux	1
Bartonien : sables rouges à gravillons latéritiques	3
Bartonien ; grès de Pinfol et complexe de Saint-Clément	3
Bartonien terminal - Ludien inférieur : marnes du Jonquier	4
Bartonien terminal-Rupélien : croûtes de calcarénites à microcodium, argiles rouges	4
Bartonien-Auverisien : calcaires à nummulithes, poudingues à galets perforés, poudingues à Microcodium. (autochtone)	2
Basalte doléritique	1
Basaltes	1
Bathonien : calcaires bioclastiques gris	3
Bathonien : calcaires gris	2
Bathonien : calcaires massifs à Rhynchonelles	1
Bathonien : marnes noires et calcaires en plaquettes	5
Bathonien non différencié : "Terres noires"	5
Bathonien supérieur-Oxfordien inférieur : "Terres noires"	5
Bathonien-Argovien : marno-calcaire	3
Bathonien-Callovien : calcaires bruns, marno-calcaires et marnes noires	4
Bathonien-Callovien : calcaires massifs et en plaquettes	1
Bathonien-Oxfordien : "Terres noires"	5
Bauxite (Aptien-Albien sur Aix; encaissant du Jurassique au Turonien sur Aubagne, entre Hauterivien sup ou Barrémien et Fuvélien; Salon : mur Hauterivien sup ou Barrémien, toit Rognacien; Pertuis : mur Hauterivien sup	3
Bédoulien : calcaires à Rudistes, Urgonien sensu stricto, récifs	1
Bédoulien : calcaires à silice	2
Bédoulien : calcaires à silice noirs de Tavel, Rochefort, Lirac, Truel	2
Bédoulien : calcaires argileux	4
Bédoulien : calcaires bioclastiques inférieurs, récifs	2
Bédoulien : calcaires bioclastiques supérieurs	3
Bédoulien : calcaires fins, faciès de transition	3
Bédoulien : calcaires gris à silice de Chateauneuf-du-Pape	2
Bédoulien : marnes à H. deshayesi	4
Bédoulien terminal : calcaires marneux	4
Berriasien : calcaires argileux, calcaires sublithographiques, conglomérats	3
Berriasien : calcaires argileux grumeleux et calcaires sublithographiques	3
Berriasien : calcaires gris argileux noduleux, calcaires à silice et calcaires blancs	2
Berriasien-Valanginien : calcaires et marnes	3
Buntsandstein (?) : grès quartzitiques	1
Burdigalien - Langhien : marnes et grès	4
Burdigalien : calcaires argileux consolidés	3
Burdigalien : calcaires grossiers bioclastiques à Cellopora	3
Burdigalien : calcaires marneux (passage latéral de m1bl)	4
Burdigalien : calcaires à Bryozaires de Pomerat	4
Burdigalien : conglomérat de Pierre-Longue	3
Burdigalien : marnes bleues	3
Burdigalien : marnes et calcaires argileux gris beige	4
Burdigalien : marnes et grès marins à Lamellibranches, conglomérats	4
Burdigalien : marnes rutilantes et conglomérats fluviatiles à Microcodium	4
Burdigalien : marnes sableuses et molasses calcaires et quartzo-calcaires	3
Burdigalien : molasse calcaire	3
Burdigalien : molasse calcaire de Ménerbes	3
Burdigalien : molasse inférieure de Saumane, en feuillets	4
Burdigalien : molasse sablo-gréseuse	4
Burdigalien : molasse sablo-gréseuse argileuse à Chlamys	4
Burdigalien : molasse sablo-marneuse	4
Burdigalien : molasse supérieure de Saumane, bancs massifs	3
Burdigalien : niveaux de calcarénites blanches à Lithothamnium	4
Burdigalien : sables marneux de la Cluse de Lourmarin	3
Burdigalien : sables verts gris à galets surmonté de molasses coquillière	4

Burdigalien supérieur : calcarénite blanche à Chlamys praescabriuscula	4
Burdigalien : calcaires à Lithothamnées et calcaire à Celloporidae	2
Cailloutis résiduels (Quaternaire)	3
Callovien : "Terres noires"	5
Callovien : calcaires	2
Callovien : mames	4
Callovien et oxfordien non différenciés : calcaires et calcaires mameux	4
Callovien-Oxfordien : "Terres noires"	5
Callovien supérieur-Oxfordien inférieur : "Terres noires"	5
Campanien : calcaires noirs riches en Corbicules, Unios, marnes; argilites ligniteuses, argiles gréseuses	3
Campanien : mamo-calcaires	3
Carixien : alternance de calcaires noirs à patine grise et de mames brunes	3
Carixien : calcaires à silex	2
Carixien supérieur-Domérien basal (?) : calcaires roux à silex	2
Carixien-Aalénien : calcaires et mames	3
Cé nomanien : calcaires mameux	4
Cé nomanien : grès et grès calcaires, passés ligniteuses, mames	3
Cé nomanien : klippe sédimentaires crétaées	2
Cé nomanien : mames et calcaires glauconieux	4
Cé nomanien : mames grises et calcaires jaunes à miches	4
Cé nomanien inférieur : grès et sables bariolés à faciès de Pied Bousquet	4
Cé nomanien inférieur : grès et sables, calcaires gréseux, mames sableuses	4
Cé nomanien inférieur : sables, faciès d'altération	5
Cé nomanien moyen : grès glauconieux et grès à Exogyra	3
Cé nomanien supérieur : mames et calcaires mameux à Inocérames	4
Cé nomanien supérieur : mames grises	4
Cé nomanien supérieur ou Turonien : sables blancs et grès siliceux	4
Cé nomanien supérieur-Campanien : calcaires et calcaires mameux	4
Cé nomanien-Coniacien : calcaires mameux et mames néocrétaées	4
Cé nomanien-Turonien : calcaires	3
Cé nomanien-Turonien : mames, calcaires mameux, schistes siliceux	4
Cé nomanien-Turonien ? : "Complexe de base", schistes noirs et versicolores, intercalations gréseuses	5
Cé nomanien-Turonien ? : brèches et blocs ophiolitiques	2
Cé nomanien-Turonien ? : schistes noirs et brèches siliceuses	5
Chattien : sables, conglomérat, brèches	3
Chattien : calcaires massifs à Helix ramondi	1
Chattien : conglomérats à éléments de Néocomien et mames rouges	3
Clansayésien : mamo-calcaires	3
Clansayésien : sables et grès verts et faciès rutilant	4
Colluvions d'âge indéterminé : limons, cailloutis (Quaternaire)	5
Cône de déjection Quaternaire indifférencié	5
Cône de déjection récents (Quaternaire)	5
Cône tomentiel récent : sables, graviers, galets	5
Coniacien : calcaires crayeux blancs	3
Coniacien : sables gréseux grossiers	4
Coniacien et Santonien : calcaire argileux à Rudistes	4
Coniacien et Santonien : calcaires quartzeux à Rudistes et Polypiers	1
Coniacien et Santonien : calcaires quartzeux de Momas	1
Coniacien et Santonien : sables, argiles, mames à lignites	4
Coniacien inférieur : sables de Brenon	3
Coniacien-Campanien : calcaires mameux	4
Coniacien-Santonien : calcaires crayeux blancs	3
Couloirs et cônes d'avalanche	4
Crétacé : calcschistes	4
Crétacé inférieur non différencié : calcaires et calcaires argileux	4
Crétacé supérieur-Eocène : calcaires planctoniques et brèches basales	2
Crétacé supérieur-Eocène : calcaires planctoniques ("Marbres en plaquettes") et brèches basales	1
Crétacé supérieur-Eocène : faciès argileux sombres, parfois à microbrèches	3
Crétacé supérieur-Eocène : marbres en plaquettes	1

Dépôts anthropiques, remblais	5
Dépôts limoneux marins	5
Dogger : calcaires et calcaires détritiques	3
Dogger : calcaires massifs et calcaires oolithiques	2
Dogger : calcaires à Cancellophycus	2
Dogger : calcaires noirs oolithiques ou graveleux	2
Dogger-Crétacé : schistes, calcschistes, jaspes, calcaires	3
Domérien : calcarénites siliceuses et marnes micacées	3
Domérien inférieur calcaréo-marneux	4
Domérien moyen : calcaires crinoïdiques roux	3
Domérien moyen : marnes micacées à Amalthées	3
Domérien moyen : marnes micacées et calcaires crinoïdiques roux	3
Domérien supérieur : marnes, calcaires et calcaires à silex	3
Domérien-Aalénien : marnes et calcaires roux	3
Domérien-Toarcien basal : marnes noires	5
Eboulis anciens : haut glaci	3
Eboulis récents	3
Eboulis récents (Quaternaire)	3
Eocène : calcaires à petites nummulithes	2
Eocène : flysch noir schisteux	5
Eocène : marnes blanches sans fossiles	3
Eocène : schistes à blocs	3
Eocène indifférencié : marnes à Microdium	4
Eocène indifférencié : sables et grès	4
Eocène indifférencié : sables ferrugineux à débris de cuirasse latéritique	5
Eocène inférieur (probablement Crétacé supérieur) : sables et argiles colorées	4
Eocène inférieur : sables argileux bariolés	4
Eocène inférieur : sables versicolores	4
Eocène inférieur et moyen : calcaires lacustres, marnes argileuses et sables	4
Eocène inférieur et moyen : surface calcaire corrodée à Microdium	3
Eocène moyen-supérieur : flysch noir	5
Eocène moyen-supérieur : schistes à blocs et à olistolites et grès basal	4
Eocène-Oligocène : marnes rouges et conglomérats	4
Eocène-Oligocène : mégabrèches	3
Formation de Valensole (Miocène terminal)	4
Gargasien : marnes bleu-noir	5
Gargasien-Cénomanién : marnes bleues	3
Glissement de la combe du Pétard (Quaternaire)	5
Glissements en masse, mégabrèches	5
Haut glaci de Saint-Estève (Quaternaire ancien)	3
Hauterivien : calcaires à chailles, calcaires noduleux, calcarénites blanches, calcaire lithographique	3
Hauterivien : calcaires à faciès urgonien ((partie supérieure), marnes et calcaires argileux (partie inférieure))	3
Hauterivien : marnes grises et calcaires argileux	4
Hauterivien inférieur : (La Montagnette) alternance rythmique marno-calcaire	3
Hauterivien inférieur : calcaires biodastiques	3
Hauterivien inférieur : calcaires légèrement argileux beige en bancs réguliers	3
Hauterivien moyen : alternance de calcaire et calcaire marneux	3
Hauterivien moyen : calcaires marneux et marnes en feuilletés	4
Hauterivien supérieur : (La Montagnette) calcaires argileux et marnes calcaires en plaquettes	4
Hauterivien supérieur : calcaire "bicolore"	3
Hauterivien supérieur : calcaire compact	3
Hauterivien supérieur : calcaires à intercalations marneuses	4
Hauterivien supérieur : calcaires à silex, alternance de calcaires et de calcaire argileux	3
Hauterivien supérieur : calcaires en gros bancs (dalles) ou bien stratifiés	2
Hauterivien supérieur-Barrémien : calcaires lités glauconieux	4
Hauterivien supérieur-Barrémien inférieur : calcaire gris du Luberon	3
Hauterivien terminal : (La Montagnette) calcaires argileux à spicules de spongiaires et à rognons de sileux au sommet	4
Hauterivien-Aptien inférieur (?) : calcaires noirs lités	3
Hauterivien-Barrémien : ensemble rythmique marno-calcaire et calcaires en gros bancs	3

Hauterivien-Barrémien : faciès de transition, calcaires argileux, calcaires à silex, calcaires mameux noduleux	3
Helvétien	4
Helvétien : calcaires lacustres de s Chambons	4
Helvétien : conglomérats	2
Helvétien : marne sableuse micacée	4
Helvétien : marnes continentales, calcaires lacustres et conglomérats blancs et gris	3
Helvétien : marnes sableuses et intercalations biodastiques	4
Helvétien : marnes sableuses, grès, calcarénites jaunes, rousses ou gris bleuté	4
Helvétien : molasse de Lauris	4
Helvétien : molasse rouge graveleuse	4
Helvétien : passées saumâtres calcaire blanc à lits ligniteux et sapropéliques	2
Helvétien continental : sables de Vinon	5
Helvétien inférieur : molasse de Grignan	4
Helvétien lacustre : calcaires blancs	2
Helvétien supérieur : marnes sableuses, grès, calcarénites jaunes, rousses ou gris bleuté	4
Helvétien-Tortonien : calcaires d'Aiguines	4
Helvétien-Tortonien : marnes grises gypsifères	4
Hettangien : calcaires gris clair avec gros bancs	1
Hettangien : calcaires noirs en gros bancs, niveaux oolithiques	2
Hettangien : dolomies cendrées et intercalations de marnes	3
Hettangien-Pliensbachien : calcaires biodastiques oolithiques	2
Hettangien-Sinemurien : calcaires en petits bancs ondulés à Ammonites, Lamellibranches,	2
Holocène : limons	5
Holocène : limons fluviatiles et palustres ("faciès mixte")	5
Holocène : limons palustres	5
Holocène : limons, silts et sables	5
Holocène : sables	5
Holocène : sables coquilliers (Cardium)	5
Holocène : tourbes	5
Holocène : vase s	5
Holocène : vase s de s étangs	5
Houiller : grès micacés, pélites, conglomérats	3
Infralias, Rhétien et Hettangien : lumachelles et dolomies	4
Infra-pliocène? : sables à cailloutis et blocs	5
Jurassique - Crétacé? : Mégabèche du col du Longet	3
Jurassique : schistes noirs	5
Jurassique dolomitique	3
Jurassique supérieur : métasédiments et metabasaltes	1
Keuper : dolomies et argilites versicolores	3
Kimméridgien : calcaires fins	3
Kimméridgien : calcaires fins bien stratifiés	3
Kimméridgien dolomitique	3
Kimméridgien supérieur-Tithonien inférieur dolomitique	3
Kimméridgien supérieur-Tithonique inférieur : calcaires fins, conglomérats	2
Kimméridgien-Bemasién inférieur : calcaires	2
Langhien-Tortonien : marnes et grès continentaux	4
Langhien-Tortonien : molasse marine à Cérithes	4
Lias : calcaires à silex	2
Lias : calcaires micritiques ou dolomictes	4
Lias : calcaires noirs à silex, calcaires à entroques, etc	2
Lias : calcaires noirs et roux dolomitiques	2
Lias dolomitique	3
Loess	5
Lotharingien : calcaires et calcaires mameux à silex	3
Ludien (Eocène supérieur) : argiles sableuses	4
Ludien (Eocène supérieur) : argiles sableuses, formation détritique	4
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à Algues et lignites de s Bastides	3
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à Cyrènes	2
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à débris de Microcodium de Sénanque	3

Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à grains de quartz, à Cyrènes et Potamides de Caromb	1
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à Plantes de Devençel	3
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires blancs de Saint-Jacques	2
Ludien (Eocène supérieur) : calcaires massifs du Vas	1
Ludien (Eocène supérieur) : conglomérat de Quillon-la-Brave	3
Ludien (Eocène supérieur) : gypse	4
Ludien (Eocène supérieur) : lignites et calcaires de Graveson	3
Ludien (Eocène supérieur) : lignites et calcaires de Méthamis	3
Ludien (Eocène supérieur) : mames beiges à débris de silex de Sénanque	2
Ludien (Eocène supérieur) : mames blanches à oncholites de Murs	4
Ludien (Eocène supérieur) : mames et dolomies blanches à sépiolite de Blauvac	3
Ludien (Eocène supérieur) : mames et dolomies blanches de la Débruge, gypse	3
Ludien (Eocène supérieur) : mames jaunes et calcaires à Limnées de Méthamis	3
Ludien (Eocène supérieur) : mames rouges à paléosols de Femère	4
Ludien (Eocène supérieur) : niveaux calcaires	3
Ludien (Eocène supérieur) : sables blancs à quartz rose de Sénanque	3
Ludien (Eocène supérieur) : sables et argiles verts à smectites de Moimoiron	5
Ludien : mé gabrèches et olistolites (Cénomani en et Turonien)	3
Lutétien : calcaires	2
Lutétien : calcaires et mames	3
Lutétien : calcaires lacustres blancs ou gris à Characées	4
Lutétien : calcaires oncholitiques à Microcodium et à Bulimus hopei	2
Lutétien : grès à grandes Nummulites	2
Lutétien : mames, sables fluviatiles et conglomérats à Microdium	4
Lutétien supérieur-Priabonien : conglomérats et grès	3
Lutétien supérieur-Priabonien marins ou saumâtres : mames à Cerithium diaboli et calcaires ligniteux	4
Lutétien terminal-Priabonien : calcaires de base	2
Lutétien terminal-Priabonien : calcaires intermédiaires à nummulithes	2
Lutétien-Priabonien : flysch indifférencié	4
Maestrichtien inférieur : calcaires et mames	3
Maestrichtien supérieur : argiles et grès à lentilles calcaires	4
Maestrichtien supérieur : argiles et grès, au nord-est du département brèches	3
Maestrichtien supérieur : argiles, grès, calcaires indifférenciés	3
Maestrichtien supérieur : bancs de calcaires lacustres	4
Malm - Néocomien ? : calcaires blancs et calcaires à cherts mamorisés (Malm - Néocomien ?)	1
Malm : calcaires	2
Malm : calcaires blancs et marbres	1
Malm : calcaires briannonnais	1
Malm : calcaires récifaux de Soléanes	1
Malm-Oréacé supérieur : calcaires clairs mamorisés (série de la Oula)	1
Malm-Oréacé supérieur : calcaires, schistes et brèches (série de l'Alpet)	2
Malm-Oréacé supérieur : marbres versicolores	1
Malm-Néocomien : calcaires à lits siliceux	3
Marais salants	5
Mégablocs de dolomite triasique	2
Métabasaltes et métabrèches basaltiques	1
Métabrèches de serpentinites (ophicaldites)	1
Métagabbros, métabrèches de gabbros	1
Mindel : alluvions anciennes	4
Mindel : glaciais (cailloutis)	3
Mindel : haute terrasse	4
Miocène continental : mames et grès jaunes stériles	4
Miocène moyen : grès roux du Comtat	4
Miocène moyen : mames gréseuses	4
Miocène moyen : sables et grès molassiques ("safres helvétiques")	4
Miocène supérieur- Pliocène terminal (Conglomérats de Valensole) : mames dominantes	3
Miocène supérieur- Villafanchien : lentilles de limons et de mames rouges	5
Miocène supérieur : grès et mames sableuses de Gaubert et de Préfaissal	4
Miocène terminal continental : conglomérats, brèches, mames rouges	3

Miocène terminal continental : faciès de Font-de-Pré, mames gréseuses et travertins	2
Miocène terminal continental à limons dominants (Tortonien supérieur continental = "Pontien supérieur")	4
Miocène terminal continental conglomératique (Tortonien supérieur continental = "Pontien supérieur")	3
Mio-Pliocène (Conglomérats de Valensole) : conglomérats à éléments d'origine exclusivement subalpine	3
Mio-Pliocène (Conglomérats de Valensole) : conglomérats comportant une proportion appréciable de galets d'origine lointaine	3
Mio-pliocène : argiles rouges de Moustiers	4
Mio-pliocène : conglomérats	2
Mio-Pliocène : formation de Valensole indifférenciée, poudingues	2
Mio-pliocène : mames blanches de Puimoisson	4
Mio-pliocène : mames et sables ocre	5
Mio-Pliocène : mames rouges d'Ajonc	4
Mio-pliocène : travertin de Ségries	1
Montien (Vitrollien) : argilites carbonatées et argilites gréseuses	4
Montien-Spamacien : argilites et brèches	2
Moraines	4
Muschelkalk : calcaires détritiques et calcaires lumachelliques	3
Muschelkalk : calcaires dolomitiques et calcaires lumachelliques	2
Muschelkalk : calcaires dolomitiques ocre, dolomies noires	2
Muschelkalk : gypses inférieurs	4
Néocomien : mames et mammo-calcaires, uniquement dans les klippes sédimentaires de l'Oligocène	3
Néocomien : mammo-calcaire indifférencié	3
Néocomien non différencié : calcaires et calcaires argileux	4
Néocrétacé-Eocène : marbres en plaquettes avec niveaux de grès	2
Néocrétacé-Eocène : calcaires planctoniques, niveau à Nummulites, conglomérats	2
Néocrétacé-Eocène : calcschistes planctoniques	3
Néocrétacés : calcaires	4
Niveau sommital du Plateau de Valensole : terrasse et glaci	4
Oligocène : Brèches et poudingues à éléments calcaires locaux	2
Oligocène : complexe de Suzette à cargneules et à gypse	4
Oligocène : conglomérat	2
Oligocène : Mames rouges et bariolées	4
Oligocène : Molasse verte à conglomérats polygéniques	4
Oligocène : Molasses gréseuses rouges	4
Oligocène indifférencié : conglomérats, mames et mames sableuses	4
Oligocène inférieur : brèches calcaires et dolomitiques	2
Oligocène inférieur : calcaires en plaquettes	3
Oligocène inférieur : calcaires lacustres blancs, localement mames, argiles et grès verts	4
Oligocène inférieur : mégnabèche à blocs de Lutétien et de Turonien bréchiq	3
Oligocène moyen : calcaire lacustres (d'Eguilles, de la Trévaresse)	4
Oligocène moyen : calcaires en plaquettes et marnes à gypse	4
Oligocène moyen : formation des Milles : argiles plus ou moins sableuses à passées microconglomératiques; 5 passées conglomératiques à ciment argilo-sableux	4
Oligocène moyen : sables siliceux (des Figons)	5
Oligocène non différencié : cailloutis grossiers isométriques émoussés à élément néocomiens	3
Oligocène non différencié : argilites rouges à intercalations de lentilles conglomératiques	4
Oligocène non différencié : argilites rouges, calcaire blanc	3
Oligocène supérieur : "Série grise", couches lacustres à vertébrés	4
Oligocène supérieur : "Série saumon", mames, grès et conglomérats fluviaux	3
Oligocène supérieur : grès verts à serpentinite détritique	2
Oligocène terminal : calcaires de la Trévaresse, lithographiques, beige clair	2
Oligocène terminal : sable des Figons, sable très fins argileux à lentilles gréseuses	5
Oligo-Miocène non différencié : formation continentale de s Toumiais et conglomérats polygéniques de s Toumiais et d'Ainac	3
Oxfordien (et base de l'Argovien) : mames noires (terres noires)	5
Oxfordien : "Terres noires"	5
Oxfordien inférieur-Oxfordien s.s. : mames gris-bleues	3
Oxfordien moyen (Argovien) : calcaires sublithographiques, calcaires noduleux, calcaires argileux, mames	2
Oxfordien moyen et supérieur : mames et calcaires à patine jaune	3
Oxfordien supérieur : calcaires	2

Oxfordien supérieur (Argovien) : calcaires noduleux, calcaires argileux, marnes	3
Oxfordien supérieur (Oxfordien s.s.) : marnes noires ou gris bleu	5
Oxfordien supérieur (Séquanien) : calcaires sublithographiques	1
Oxfordien supérieur à Tithonique : calcaires	2
Oxfordien supérieur-Kimméridgien : calcaires et marnes	3
Oxfordien-Berriasien : calcaires noduleux rouges "Marbre de Guillestre" (Oxfordien-Kimméridgien) ; calcaires blancs (Tithonien-Berriasien)	2
Oxfordien-Crétacé moyen : schistes noirs et brèches, calcaires à Cancellophycus	4
Paléocène/Eocène continental : "conglomérat d'Argens"	3
Pegmatitoïde (Plagioclases et augite)	1
Permien : arkoses conglomératiques, méta-arkose du Plan de Phazy	1
Permien : schistes conglomératiques pourprés	3
permien volcano-détritique : Schistes non différenciés	3
Permo-Trias : quartzites conglomératiques "Verrucano"	1
Permo-Trias : schistes et quartzites conglomératiques	1
Plaisancien : marnes, marnes sableuses marines	5
Plaisancien marin : marnes bleutées	3
Pliocène : sables	5
Pliocène : sables marins et saumâtres, marnes, argiles micacées	4
Pliocène terminal : formation olistolithique terminale de Tanaron,	5
Ponto-Pliocène (?) : marnes, sables, conglomérats terminaux	3
Portlandien : calcaires gris à grain fin (faciès de transition)	2
Portlandien : dolomites	3
Portlandien : faciès tithonique, calcaires sublithographiques	1
Portlandien-Berriasien : calcaires marmoréens	1
Portlandien-Berriasien : faciès dolomitique	3
Post-Würm : tourbière	5
Poudingues infra-nummulitiques à galets perforés	2
Poudingues infra-nummulitiques d'Argens à Microcodium	2
Prabonien-Sannoisien : "Marnes bleues"	3
Priabonien : "Grès de Castellane"	3
Priabonien : "grès d'Annot"	4
Priabonien : calcaires à zones siliceuses	3
Priabonien : calcaires argileux et marnes à globigérines	4
Priabonien : calcaires nummulitiques	2
Priabonien : complexe conglomératique basal	2
Priabonien : flysch schisto-gréseux, grès à Nummulithes	4
Priabonien : schistes à globigérines	3
Priabonien : schistes noirs	5
Purbeckien : calcaires blancs massifs et marnes vertes	3
Quaternaire : : alluvions récentes (cailloutis, graviers, sables et limons)	5
Quaternaire : alluvions fluviatiles récentes : sables, limons, graviers, galets	5
Quaternaire : argiles de décalcification remplissant des poches karstiques	5
Quaternaire : colluvions d'âge indéterminé (limons, cailloutis)	5
Quaternaire : colluvions récentes	4
Quaternaire : cône de déjection récents	5
Rauracien-Kimméridgien inférieur : calcaires fins et marnes en bancs réguliers	3
Remblai-décharge	5
Remblais, dépôts artificiels	5
Réseau hydrographique	1
Réseau hydrologique, lacs, étangs	1
Rhétien : Alternances de calcaires lithographiques gris fumées avec lumachelle, de marnes, de marno-calcaires jaunes et de fausses cargneules jaunâtres	4
Rhétien : dolomies grises à patine jaune, calcaires (lumachelles), argilites esquilleuses vertes et noires, grès à pistes	3
Rhétien : dolomies, argiles, lumachelles	4
Rhétien : grès, schistes, dolomies, lumachelles à Avicula	3
Rhétien-Toarcién : calcaires gréseux, calcaires à entroques, calcaires dolomitiques	3
Riss : alluvions de la moyenne terrasse	4
Riss : alluvions de la moyenne terrasse (cailloutis et graviers)	4
Riss : alluvions fluviatiles	5

Riss : alluvions fluviales et torrentiels avec cônes de déjection	5
Riss : alluvions glacio-lacustres	5
Riss : colluvions	4
Riss : cône de déjection torrentiel	5
Riss : éboulis	3
Riss : Epandages locaux, colluvions (limons et cailloutis)	5
Riss : moraines externes	4
Riss-Würm : tufs inter-glaciaires	2
Rognacien : calcaires, grès, argillites rouges	3
Rupélien : conglomérats à éléments de Crétacé supérieur, marnes et grès jaunâtres	3
Sannoisien : calcaire de Taulanne	4
Sannoisien : formation de Patatonis, calcaires bitumineux et marnes sableuses	4
Sannoisien : formation de Patatonis, niveau salifère	4
Sannoisien : grès de Sénez	3
Sannoisien : marnes et grès bistres	3
Sannoisien inférieur : argile du Maronnier	4
Sannoisien inférieur : calcaires à Cyrènes	2
Sannoisien inférieur : sables glauconieux	4
Sannoisien marin : conglomérats à Natica crassatina, de Barrême, St Lions et de Clumanc	2
Sannoisien marin : grès de Ville, grès de Barrême	3
Sannoisien marin : marnes sableuses grises et marnes bleutées	5
Sannoisien supérieur : calcaire de la Fayette	2
Sannoisien supérieur : faciès gréseux dans le niveau de Pradengue	4
Sannoisien supérieur : niveau de Pradengue et niveau de la Mort d'Imbert	5
Sannoisien-Stampien : argiles montmorillonitiques versicolores sableuses à lentilles de conglomérats et de gypse, intercalations de calcaire lacustre à silex blonds	4
Santonien : calcaires argileux	4
Santonien-Campanien : calcaires marneux	4
Scythien : argillites et grès dolomitiques	4
Scythien : quartzites blancs	1
Scythien supérieur : grès carbonatés et pélites	3
Sénonien (?) : flysch à blocs et écailles	4
Sénonien : "flysch dissocié"	4
Sénonien : flysch à Helminthoïdes du Parpaillon	4
Sénonien : flyschs exotiques	4
Sénonien : grès de l'Embrunais	3
Sénonien inférieur et localement Campanien : calcaires	3
Sénonien-Paléocène : flysch à Helminthoïdes	4
Séquanien indifférencié - Portlandien : Calcaires sublithographiques en bancs minces riches en ammonites	1
Séquano-Kimméridgien : dolomies ou calcaires	3
Serpentinites	1
Sinémurien : calcaires marneux à Gryphées	4
Sinémurien : calcaires rognoneux noirs en petits bancs	2
Sinémurien-Carixien : calcaires noduleux et calcarénites	3
Sinémurien-Domérien : calcaires noirs et calcaires argileux	4
Sinémurien-Lotharingien non différenciés	3
Stampien : "Molasse rouge inférieure"	4
Stampien : "Molasse rouge supérieure"	4
Stampien : calcaire de Campagne Calavon et de Montfuron	3
Stampien : calcaire de Campagne Cavalon, de Fontaine de Vauduse et de Montfuron	2
Stampien : calcaire de Reillanne	2
Stampien : calcaires à Brotia laurae	2
Stampien : calcaires bréchiques des Pâtis	2
Stampien : calcaires de l'Isles-sur-Sorgues et de Velleron, niveaux gypseux	3
Stampien : calcaires de Vachères	2
Stampien : calcaires de Velleron	2
Stampien : calcaires des Mourres	3
Stampien : calcaires du sommet de la Débruge	2
Stampien : calcaires et lignites de la Tour-de-Pinet	3
Stampien : calcaires massifs du Vallon de la Nesque	1

Riss : alluvions fluviales et torrentiels avec cônes de déjection	5
Riss : alluvions glacio-lacustres	5
Riss : colluvions	4
Riss : cône de déjection torrentiel	5
Riss : éboulis	3
Riss : Epandages locaux, colluvions (limons et cailloutis)	5
Riss : moraines externes	4
Riss-Würm : tufs inter-glaciaires	2
Rognacien : calcaires, grès, argillites rouges	3
Rupélien : conglomérats à éléments de Crétacé supérieur, marnes et grès jaunâtres	3
Sannoisien : calcaire de Taulanne	4
Sannoisien : formation de Patatonis, calcaires bitumineux et marnes sableuses	4
Sannoisien : formation de Patatonis, niveau salifère	4
Sannoisien : grès de Sénez	3
Sannoisien : marnes et grès bistres	3
Sannoisien inférieur : argile du Maronnier	4
Sannoisien inférieur : calcaires à Cyrènes	2
Sannoisien inférieur : sables glauconieux	4
Sannoisien marin : conglomérats à Natica crassatina, de Barrême, St Lions et de Clumanc	2
Sannoisien marin : grès de Ville, grès de Barrême	3
Sannoisien marin : marnes sableuses grises et marnes bleutées	5
Sannoisien supérieur : calcaire de la Fayette	2
Sannoisien supérieur : faciès gréseux dans le niveau de Pradengue	4
Sannoisien supérieur : niveau de Pradengue et niveau de la Mort d'Imbert	5
Sannoisien-Stampien : argiles montmorillonitiques versicolores sableuses à lentilles de conglomérats et de gypse, intercalations de calcaire lacustre à silex blonds	4
Santonien : calcaires argileux	4
Santonien-Campanien : calcaires marneux	4
Scythien : argillites et grès dolomitiques	4
Scythien : quartzites blancs	1
Scythien supérieur : grès carbonatés et pélites	3
Sénonien (?) : flysch à blocs et écailles	4
Sénonien : "flysch dissocié"	4
Sénonien : flysch à Helminthoïdes du Parpaillon	4
Sénonien : flyschs exotiques	4
Sénonien : grès de l'Embrunais	3
Sénonien inférieur et localement Campanien : calcaires	3
Sénonien-Paléocène : flysch à Helminthoïdes	4
Séquanien indifférencié - Portlandien : Calcaires sublithographiques en bancs minces riches en ammonites	1
Séquano-Kimméridgien : dolomies ou calcaires	3
Serpentinites	1
Sinémurien : calcaires marneux à Gryphées	4
Sinémurien : calcaires rognoneux noirs en petits bancs	2
Sinémurien-Carixien : calcaires noduleux et calcarénites	3
Sinémurien-Domérien : calcaires noirs et calcaires argileux	4
Sinémurien-Lotharingien non différenciés	3
Stampien : "Molasse rouge inférieure"	4
Stampien : "Molasse rouge supérieure"	4
Stampien : calcaire de Campagne Calavon et de Montfuron	3
Stampien : calcaire de Campagne Cavalon, de Fontaine de Vauduse et de Montfuron	2
Stampien : calcaire de Reillanne	2
Stampien : calcaires à Brotia laurae	2
Stampien : calcaires bréchiques des Pâtis	2
Stampien : calcaires de l'Isles-sur-Sorgues et de Velleron, niveaux gypseux	3
Stampien : calcaires de Vachères	2
Stampien : calcaires de Velleron	2
Stampien : calcaires des Mourres	3
Stampien : calcaires du sommet de la Débruge	2
Stampien : calcaires et lignites de la Tour-de-Pinet	3
Stampien : calcaires massifs du Vallon de la Nesque	1

Stampien : calcaires plissotés de Fontaine-de-Vauduse	2
Stampien : conglomérats	2
Stampien : conglomérats à galets urgoniens	2
Stampien : faciès gréseux dans niveau de Caseneuve	3
Stampien : laminites à poissons de Murs	3
Stampien : marnes à paléosols et calcaires palustres	3
Stampien : marnes de Viens	4
Stampien : marnes de Viens passage latéral aux calcaires et lignites de Sigonce	4
Stampien : marnes et calcaires de Venasque	3
Stampien : marnes et grès verts de Murs	4
Stampien : marnes sableuses versicolores de la Grande-Bastide	5
Stampien : molasse indifférenciée	4
Stampien : niveau de Caseneuve et niveau de Bois d'Asson	4
Stampien : niveau de Caseneuve et niveau de Bois d'Asson, argiles et grès verts, intercalations calcaires	4
Stampien : sables et grès verts de la Valette-de-Pernes	4
Stampien inférieur : argilites saumon et grès micacés rouges ou bleutés	3
Stampien inférieur : lentilles de conglomérats	3
Stampien moyen : calcaires et marnes de Sainte- Marguerite	3
Stampien supérieur : calcaires de la Gavois	2
Stampien supérieur : gypse de Notre Dame de Groseau	4
Stampien supérieur et moyen non différenciés : conglomérats, marnes, grès, gypse, montmorillonite, calcaires	3
Stampien supérieur et moyen non différenciés : alternances de calcaires marneux et de marnes calcaires	4
Stampien-Aquitainien : marnes, conglomérats et calcaires lacustres	3
Stéphaniens moyen-supérieur (?) : conglomérats de la Blachière	2
Thanétiens : calcaires argileux, marnes, argiles calcaires rouges ou bariolées, calcaire silicifié au NE du département	4
Thanétiens : lentilles de brèches au NE du département	3
Tithonien allochtone : calcaires à silex brun rouge	2
Tithonien inférieur à Tithonien moyen : calcaires à faciès dolomitique	3
Tithonien inférieur à Tithonien moyen : calcaires à faciès récifal	1
Tithonien inférieur à Tithonien moyen : calcaires biodétritiques	3
Tithonien inférieur à Tithonien moyen : calcaires massifs blancs faciès tithonique	1
Toardien : calcaires et marnes	3
Toardien inférieur : marnes noires	5
Toardien inférieur et moyen calcaréo-marneux	3
Toardien moyen : calcaires à nodules phosphatés	2
Toardien supérieur : marnes noires	5
Toardien-Aalénien : calcaires à entroques, "encrinites"	2
Toardien-Aalénien inférieur : marnes	4
Tortonien : marnes et grès, marnes à Ostrea crassissima, intercalation molassique	4
Tortonien : marnes jaunes et grès, conglomérats annonçant la formation de Valensole	3
Tortonien : marnes vertes gypsifères	4
Tortonien : molasse sableuse de Pied d'Aulun	4
Tortonien lacustre : calcaire blancs ou gris	2
Tortonien lacustre : calcaires, marnes	4
Tortonien lacustre : marnes dominantes et sables	4
Tortonien marin : marnes bleues de St-Pantaléon	3
Tortonien marin : marnes de Cabrières	3
Tortonien marin : marnes, sables, molasse sableuses	4
Tortonien marin : molasse de Cucuron	4
Tortonien marin : molasses, sables molassiques, poudingues et marnes	3
Tortonien supérieur conglomératique : sables à galets, conglomérats	3
Trias : cargneules	4
Trias : cargneules, dolomies, gypse	4
Trias : gypses	4
Trias : gypses et cargneules non séparés	4
Trias : Keuper-Rhétien non séparés	3
Trias : spilites triasiques	2
Trias moyen : calcaires et dolomies non différenciés	3
Trias supérieur : calcaires dolomitiques massifs et argilites	3

Tufs anciens	2
Tufs anciens (Quaternaire)	2
Tufs récents	2
Turonien : calcaire marneux, bioclastiques, bréchiq ues, à Exogyres	3
Turonien : calcaires blancs à niveaux marneux	3
Turonien : calcaires crayeux à spicules d'éponges, sil ex et mames grises	3
Turonien : calcaires gréseux et grès	3
Turonien : grès de Boncava il	2
Turonien : grès et sables de Montmout	4
Turonien : mames à S. pilula	4
Turonien-Campanien inférieur : calcaires néocrétacés	4
Turonien-Coniacien : calcaires à Echinodermes et Spongiaires, mames grises	3
Turonien-Paléocène supérieur : calcaires planctoniques	2
Turonien-Paléocène supérieur : calcaires planctoniques et flysch du Pelat	3
Turonien-Sénonien : olistolites ophiolitiques	5
Valanginien : calcaire	2
Valanginien : calcaire argileux	2
Valanginien : calcaires, calcaires argileux, marnes	4
Valanginien : mames et calcaires	3
Valanginien : mames et calcaires fins	3
Valanginien inférieur : calcaires et marnes	3
Valanginien supérieur - Hauterivien inférieur : série calcaire	3
Valanginien-Hauterivien marneux indifférenciés	3
Villafanchien : alluvions fluviales (graviers et galets à intercalations sableuses et limoneuses)	4
Villafanchien : alluvions fluviales : (graviers et galets à intercalations sableuses et limoneuses)	5
Villafanchien : alluvions fluviales de la Petite Crau (graviers et galets à intercalations sableuses et limoneuses)	5
Vindobonien : brèches	2
Vindobonien : argile calcaire bleue , grès calcaires	3
Vindobonien : calcaire coquillier (molasse provençale)	3
Vindobonien : calcaires et marno-calcaires	3
Vindobonien : calcaires sableux, sables, calcirudites	4
Vindobonien : marnes noduleuses	3
Vindobonien : sables et galets	4
Vindobonien indifférencié : Calcaires et marnes sableuses	4
Vraconien : marnes et calcaires gréseux, grès	3
Weféni en = Sôthien supérieur et/ou Carnien : carneules triasiques	4
Westphalien - Stéphanien (?) : schistes charbonneux de Barbein	3
Wûm : alluvions de la basse terrasse (cailloutis, graviers, sables)	4
Wûm : alluvions fluviales	5
Wûm : Alluvions glacio-lacustres	5
Wûm : cailloutis, graviers, sables	4
Wûm : colluvions	4
Wûm : cônes de déjection	5
Wûm : éboulis	3
Wûm : éboulis soliflués	3
Wûm : épandages locaux, colluvions (cailloutis, limons)	5
Wûm : épandages locaux, colluvions cailloutis, limons	5
Wûm : loess	5
Wûm : Moraines internes	4
Wûm ? : formations glaciaires et assimilables	5

Annexe 15 : Classification des caractéristiques pédogénétiques appliquée dans cette analyse

Code sol	Type de sol WRB-Full	Potentiel de production de MES	Potentiel de production de MES – chiffré
ABha	Haplic Albeluvisol	Forte	4
ANdy	Dystric Andosol	Forte	4
CMca	Calcaric Cambisol	Faible	2
CMcr	Chromic Cambisol	Faible	2
CMdy	Dystric Cambisol	Forte	4
CMeu	Eutric Cambisol	Faible à Forte	2 à 4
CMmo	Mollic Cambisol	Faible	2
CMvr	Vertic Cambisol	Moyenne	3
FLca	Calcaric Fluvisol	Faible	2
FLdy	Dystric Fluvisol	Forte	4
FLeu	Eutric Fluvisol	Moyenne	3
GLdy	Dystric Gleysol	Forte	4
GLEu	Eutric Gleysol	Forte	4
HSdy	Dystric Histosol	Très faible	1
LPca	Calcaric Leptosol	Faible	2
LPdy	Dystric Leptosol	Forte	4
LPeu	Eutric Leptosol	Moyenne	3
LPha	Haplic Leptosol	Moyenne	3
LPrz	Rendzic Leptosol	Faible	2
LVab	Albic Luvisol	Forte	4
LVar	Arenic Luvisol	Forte	4
LVcr	Chromic Luvisol	Faible	2
LVgl	Gleyic Luvisol	Forte	4
LVha	Haplic Luvisol	Moyenne	3
PZha	Haplic Podzol	Forte	4
PZle	Leptic Podzol	Forte	4
SCha	Haplic Solonchak	Très forte	5
1 1 11 1	Town	Très faible	1
2 2 22 2	Soil disturbed by man	Très faible	1
3 3 33 3	Water body	Très faible	1
4 4 44 4	Marsh	Très faible	1
5 5 55 5	Glacier	Forte	4

Annexe 16 : Pourcentage de perte en sol par Panagos, 2015.

