

Projet DHySed-7

IDENTIFICATION DES SPECIFICITES DES DYNAMIQUES HYDRO-SEDIMENTAIRES DANS
LES CEVENNES

Rapport d'activités 2021-2023

Rédacteurs : Margot CHAPUIS (ESPACE), Pierre-Alain AYRAL (ESPACE), Juliette CERCEAU (IMT Mines Alès), Nathalie DUBUS (ESPACE), Didier JOSSELIN (ESPACE), Caroline LE BOUTEILLER (IGE), Cédric LEGOUT (IGE).

Contributeurs : Laurent APRIN (IMT Mines Alès), Pierre-Alain AYRAL (ESPACE), Brice BOUDEVILLAIN (IGE), Mathieu BRUN (IMT Mines Alès et UGA), Juliette CERCEAU (IMT Mines Alès), Margot CHAPUIS (ESPACE), Anne CLEMENS (ZABR), Thomas De Almeida (IGE et UPEC), Mathilde DELAIRE (ESPACE et AU), Louise DEKEYSER (ESPACE/IMT Mines Alès et UPJV), Jean-Marc DOMERGUE (ESPACE), Nathalie DUBUS (ESPACE), Nadine GRARD (ESPACE), Camille IMBERT (ESPACE et USMB), Didier JOSSELIN (ESPACE), Caroline LE BOUTEILLER (IGE), Cédric LEGOUT (IGE), Christian LOPEZ (IMT Mines Alès), Pierre-Alain MANNONI (ESPACE), Quentin MORABO (ESPACE et IMT Mines Alès), Guillaume NORD (IGE), Lise PETRI (ESPACE et ENSIL-ENSCI), Ghita SERRHINI-NAJI (IMT Mines Alès et UTC), Fabien SEVE (IGE et ENGEES), Benoît TERRIER (AERMC).

Pour citer ce rapport : : Chapuis M., Ayral P.-A., Cerceau J., Dubus N., Josselin D., Le Bouteiller C., Legout C., 2023. Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes. Rapport d'activité 2021-2023. Zone Atelier Bassin du Rhône et Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 46 p.

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	4
1 Résumé	5
2 Le projet DHySed-7	7
2.1 Contexte et enjeux	7
2.2 Problématique et questions scientifiques	8
2.3 Objectifs scientifiques et opérationnels	8
2.4 Partenaires et personnels associés	9
2.5 Méthodologie générale	10
2.6 Méthodologie détaillée	12
2.6.1 Volet « SHS » : Identifications des pratiques de prélèvement et d'aménagement liées au transport solide et des services écosystémiques associés sur les bassins versants cévenols	12
2.6.1.1 Objectif « SHS »	12
2.6.1.2 Méthodologie « SHS »	12
2.6.2 Instrumentation et analyse des chroniques pluies-débits-érosion-MES	13
2.6.2.1 Objectifs « pluies-débits-érosion-MES »	13
2.6.2.2 Méthodologie « pluies-débits-érosion-MES »	14
2.6.3 Mise en place d'une base de données spatio-temporelle avec production des données en libre accès avec DOI et indicateurs de qualité et de robustesse	15
2.6.3.1 Objectifs « Bases de données et robustesse »	15
2.6.3.2 Méthodologie « Bases de données et robustesse »	15
3 Résultats	17
3.1 Pratiques de prélèvements solides et pratiques d'aménagement liées au transport solide et services écosystémiques associés sur les bassins versants cévenols	17
3.1.1 Introduction	17
3.1.2 Sur les Gardons cévenols	19
3.1.3 Sur les « spécificités » cévenols	21
3.2 Relations pluies-débits-érosion-MES dans les Cévennes	23
3.2.1 Apports méthodologiques	23
3.2.2 Apports thématiques	29
3.3 Base de données spatio-temporelles des données de pluie, débits et MES des bassins versants cévenols	33
3.3.1 Les bases de données	33
3.3.2 Production automatisée des modèles RUSLE et GUSLE	34
3.3.3 Analyses de robustesse sur les chroniques de données	35

3.4	Recommandations à destination de différents observatoires travaillant avec des données hydrologiques et relatives aux MES	37
3.5	Valorisation, diffusion et transfert des résultats auprès des acteurs scientifiques et des praticiens	39
4	Perspectives scientifiques et opérationnelles	41
5	Bibliographie.....	44
6	DOI.....	45
7	Annexes	46

Liste des figures

Figure 1.	Contexte et objectifs du projet DHySed-7 (cf. présentation auprès de la ZABR du 23/09/2020)	7
Figure 2.	Les 4 bassins versants étudiés : Ardèche, Gardons, Bléone, Gapeau (Open Street Map)	8
Figure 3.	Méthodologie générale du projet DHySed-7	11
Figure 4.	Le sédiment, un objet interdisciplinaire (source : Serrhini Naji, 2021, Annexe 2)	18
Figure 5.	Frise chrono-systémique de l'histoire extractive des sédiments en Cévennes, depuis le XVII ^{ème} siècle (modifié d'après Serrhini Naji, 2021 : Annexe 2).....	20
Figure 6.	Conséquences des extractions par secteur sur le bassin versant des Gardons (source : Serrhini Naji, 2021 : Annexe 2).....	21
Figure 7.	Installation des GEACOS sur le site du Rieu, source : Imbert, 2021, Annexe 4	24
Figure 8.	Les sites expérimentaux en Cévennes.....	25
Figure 9.	Application des modèles RUSLE (a.) et GUSLE (b.) (P.-A. Mannoni in Petri, 2023, Annexe 7)	28
Figure 10.	Synthèse des paramètres caractéristiques obtenus pour les deux plus grandes crues identifiées sur chaque bassin versant étudié (source : Petri, 2023, Annexe 7)	30
Figure 11.	Bassin versant de la Lieure, affluent du Garon de Saint-Jean Amont suite à la crue du 19/09/2020 – Cumul de pluie supérieur à 600 mm en 24h (Crédit photo : P.-A. Ayrat).....	32
Figure 12.	Utilisation des données par le modèle GUSLE (M. Delaire, 2021 : Annexe 6)	35
Figure 13.	Indicateurs croisés de qualité et de robustesse des données de petits échantillons	37

Liste des tableaux

Tableau 1.	Partenaires et personnels associés.....	9
Tableau 2.	Stagiaires impliqués et structures d'appartenance	9
Tableau 3 :	Méthodologie envisagée pour l'analyse des chroniques pluies-débits-érosion-MES : détail par objectif.	14
Tableau 4 :	Méthodologie envisagée pour la mise en place d'une base de données spatio-temporelles : détail par objectif.....	16
Tableau 5.	Synthèse de l'instrumentation mise en place dans le cadre du projet	25
Tableau 6.	DOI du Mont Lozère.....	34

1 Résumé

Le projet DHySed-7 avait pour objet de dégager des spécificités du fonctionnement hydro-sédimentaire cévenol, et de poursuivre la démarche de comparaison inter-bassins versants entreprise au sein des réseaux OZCAR et eLTER pour le volet hydrologique et sédimentaire. Cette démarche s'est basée sur l'exploitation de chroniques de données déjà en grande partie existantes sur le périmètre d'étude (antenne cévenole de l'UMR ESPACE ; sites cévenols du SNO OHM-CV gérés par l'IGE), et a abouti à confirmer le domaine cévenol comme étant particulièrement soumis à l'aléa « précipitations intenses à l'automne » (résultat conforme à la littérature existante), tout en suggérant un potentiel d'export de matières en suspension (MES) modéré par rapport aux autres bassins versants étudiés, et en particulier par rapport au bassin de la Bléone (bassin « de référence » en termes de forte productivité sédimentaire).

De manière plus détaillée, il s'est agi 1/ d'améliorer notre compréhension des usages associés aux flux hydro-sédimentaires passés, présents et futurs, 2/ d'approfondir notre compréhension du lien entre pluies, débits, érosion et transport sédimentaire, dans une logique d'emboîtement d'échelles spatiales et temporelles sur 4 bassins versants (Gardons, Ardèche, Bléone, Gapeau), en valorisant les chroniques de données acquises depuis plus de 30 ans au sein du réseau OZCAR.

Le volet concernant les usages associés aux flux hydro-sédimentaires a été renforcé par rapport au projet déposé initialement, et a donné lieu à trois stages dont l'un (G. Serrhini-Naji, IMT Mines Alès) a débouché sur une thèse en cours sur un sujet connexe en région nîmoise. L'objet de ce volet « SHS » était d'évaluer « les interactions socio-écologiques entre transport sédimentaire et activités anthropiques, les impacts de cinquante ans de politiques d'aménagements hydrauliques et d'extractions massives, ainsi que les perspectives de valorisation des sédiments qui se dessinent à l'ère d'une « post-nature hybride » (Morizot, 2017) » (G. Serrhini-Naji, 2021). Les travaux menés ont permis de mettre en évidence l'ambivalence de la considération accordée à la charge sédimentaire grossière lors des opérations de restauration morphologique : élément clef de ces opérations de restauration, la charge graveleuse cristallise les difficultés techniques (incertitude quant à « faire ou laisser faire » vis-à-vis du cours d'eau) et l'acceptabilité économique et politique de telles opérations de restauration. La poursuite des travaux par L. Dekeyser a permis d'approfondir l'aspect quantitatif de la perception des sédiments dans les cours d'eau étudiés. Les résultats de l'étude pointent une « invisibilité » des sédiments dans la perception des habitants du territoire des Gardons, par opposition à la perception d'un déficit sédimentaire dans le bassin de l'Ardèche. En termes de gestion des cours d'eau, l'étude identifie qu'un équilibre reste à trouver entre un optimum écologique de non-intervention et l'inquiétude sociale liée aux crues sur les Gardons, alors que sur l'Ardèche une logique non interventionniste semble s'imposer. Il se dégage donc une situation contrastée entre les bassins des Gardons et de l'Ardèche, mettant à mal un essai d'identification de spécificités cévenoles en termes de perception des sédiments. En revanche, l'approche SHS a démontré tout son intérêt pour comprendre certains mécanismes en jeu dans l'appropriation par les habitants des politiques territoriales de restauration des cours d'eau.

Le volet concernant les liens entre pluies, débits, érosion et transport sédimentaire a donné lieu à six stages qui ont eu pour objectifs 1/ d'évaluer la faisabilité d'un suivi de la charge sédimentaire (MES, grossiers) dans les cours d'eau cévenols, 2/ de contribuer à caractériser les spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes (Gardons, Ardèche) par rapport à deux autres bassins représentatifs des Alpes du Sud (Bléone) et du régime méditerranéen (Gapeau) et 3/ entamer une réflexion sur les dynamiques de végétation associées à ces dynamiques sédimentaires (Bléone, stage

à l'interface avec le projet ANR CLIMBAD). Concernant l'instrumentation, les travaux menés ont permis de renforcer la méthodologie concernant le suivi de la charge en suspension et l'implémentation de capteurs low-cost, et de la charge grossière par analyse d'images. Concernant la caractérisation des éventuelles particularités climatiques, météorologiques, hydrologiques et sédimentaires des bassins cévenols par rapport à des bassins influencés par un régime méditerranéen ou des Alpes-du-Sud, les travaux menés ont permis d'une part de valider l'exploitation de chroniques de données acquises au sein de l'antenne cévenole du laboratoire ESPACE et au sein du réseau OZCAR, dans une logique de régionalisation et d'inter-comparaison des bassins, ainsi que de pointer la spécificité du fonctionnement hydrologique du bassin des Gardons, et du fonctionnement sédimentaire du bassin de la Bléone (Galabre).

Les Gardons ressortent donc comme un bassin très réactif, y compris à large échelle, avec des intensités maximales de précipitations bien supérieures aux autres bassins versants : jusqu'à 234 mm/h à Anduze en 2002, et une plus grande susceptibilité à subir des précipitations à l'automne. Il ressort cependant que l'importance des premières pluies d'automne (ou « pluies d'imbibition ») pour réhydrater les sols et les saturer est prépondérante, quel que soit le bassin versant. Du point de vue sédimentaire, et en accord avec les sensibilités à l'érosion des lithologies dominantes sur les différents bassins versants, le Galabre (bassin de la Bléone) ressort comme présentant des concentrations en matières en suspension 4 à 24 fois plus élevées par rapport aux valeurs maximales obtenues sur le Gazel et la Claduègne (domaine cévenol). Ceci se traduit par des exports sédimentaires bien plus importants sur le Galabre que sur les autres bassins étudiés. En première approximation, la modélisation théorique (GUSLE) suggère par ailleurs un potentiel d'export modéré de MES dans le domaine cévenol.

Dans le cadre de ce programme de recherche, une instrumentation dédiée au suivi des flux hydro-sédimentaires a été mise en place et/ou renforcée sur deux bassins versants expérimentaux dans les Cévennes (Gardons et Ardèche). Des réflexions méthodologiques ont également été amorcées (Brun, 2022) pour suivre sur certains sites les sédiments grossiers. Ce suivi va se poursuivre avec la labellisation de ces activités et des sites d'observation dans le cadre du SNO OHM-CV.

Plus généralement, le projet DHySed-7 a pleinement rempli ses objectifs de partage de données et de savoir-faire dans une démarche « intersites » du réseau OZCAR : les collaborations entre les quatre équipes ZABR (ESPACE, IMT Mines Alès, IGE et INRAE) se sont renforcées et de nouvelles interactions ont émergé entre les différents sites, tant sur les thématiques « techniques » (mesure des MES) que sur le volet SHS (perceptions des sédiments).

2 Le projet DHySed-7

Nous présentons ci-après le projet DHySed-7 de manière synthétique. Le détail du projet déposé auprès de la ZABR est repris en Annexe 1 (cf. section 7).

Annexe 1 : Descriptif du projet déposé

2.1 Contexte et enjeux

Les bassins versants cévenols ont surtout fait l'objet d'études hydrologiques (épisodes de crue éclair : ANR FloodScale, ou plus récemment basses eaux : [HydroPop 2](#)). Cependant cette hydrologie a été peu explorée dans la perspective d'une meilleure compréhension des flux sédimentaires associés.

Par ailleurs, des chroniques de données sont acquises, parfois depuis plusieurs dizaines d'années, sur des sites du périmètre cévenol et méditerranéen, récemment fédérés au sein du réseau OZCAR : antenne cévenole de l'UMR ESPACE ; sites cévenols du SNO OHM-CV gérés par l'IGE, SNO Draix-Bléone (IGE et INRAE) et Réal Collobrier (INRAE). Dans une démarche de recherche eLTER, qui se propose « d'harmoniser la surveillance des sites, les protocoles et l'émergence de synergies », l'intérêt d'une approche régionale de comparaison hydro-sédimentaire inter-BV a émergé, ainsi que le renforcement d'une collaboration intersites sur 3 observatoires (OHM-CV, Réal Collobrier et Draix-Bléone).

Contexte et objectifs

Un contexte physique spécifique

- épisodes cévenols intenses vs. très basses eaux
- BV plutôt forestiers (feux, exploitation → processus érosifs spécifiques)
- des dynamiques hydro-sédimentaires mal connues

Les sites d'observation des bassins versants cévenols

- des chroniques hydrologiques (pluie, débits...) sous-exploitées
- une approche croisée "processus physiques" et "SHS"

Objectifs:

- identifier des signaux hydrologiques et d'érosion
- par comparaisons inter-BV: (Alpes du Sud: ORE Draix-Bléone) et influence méditerranéenne (Real Collobrier): dégager des **spécificités du fonctionnement hydro-sédimentaire cévenol**



Figure 1. Contexte et objectifs du projet DHySed-7 (cf. présentation auprès de la ZABR du 23/09/2020)

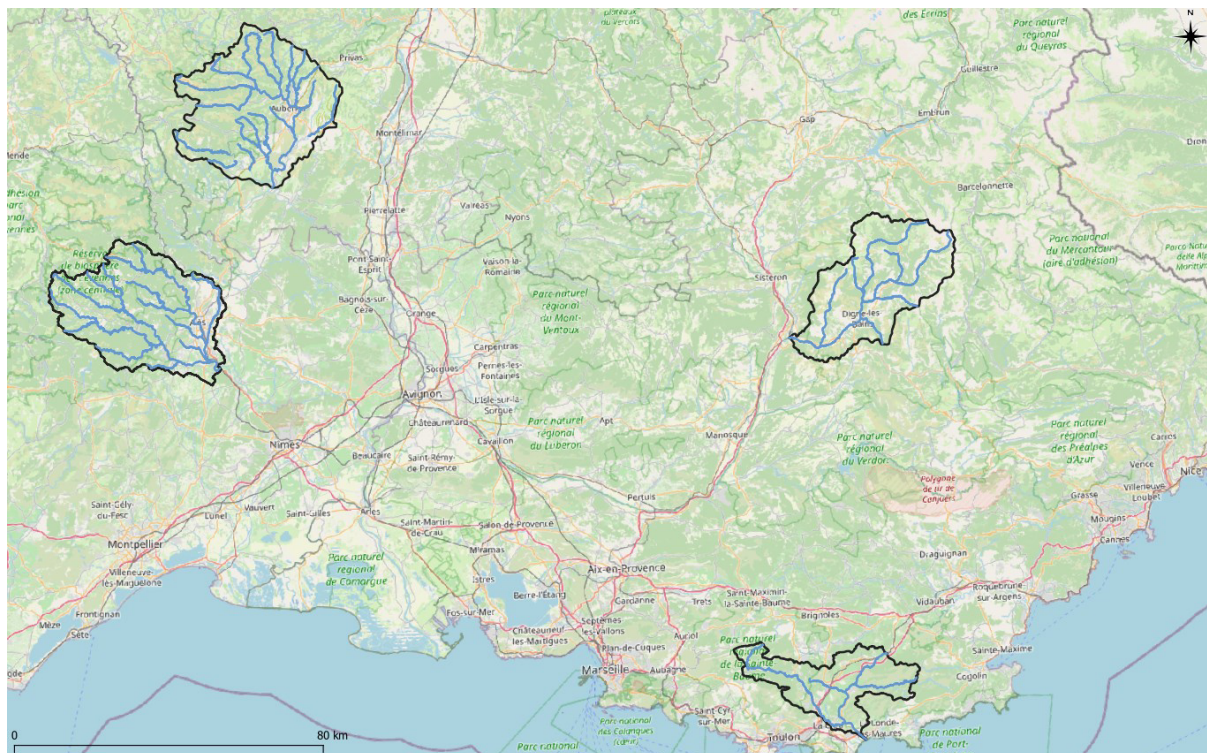


Figure 2. Les 4 bassins versants étudiés : Ardèche, Gardons, Bléone, Gapeau (Open Street Map)

2.2 Problématique et questions scientifiques

À partir de chroniques de données déjà en grande partie existantes sur le quart Sud-Est des territoires de piémont (périmètre cévenol, méditerranéen et des Alpes-du-Sud), nous avons eu pour objectif d’approfondir notre compréhension du lien entre pluies, débits, érosion et transport sédimentaire, dans une logique d’emboîtement d’échelles spatiales et temporelles.

La problématique abordée dans ce projet concerne les flux sédimentaires des rivières cévenoles, et se décline en questions liées à la fois à la quantification de ces flux et de leur variabilité spatiale et temporelle, à la comparaison de ces flux à l’échelle régionale, et aux usages et perceptions liés à ces flux :

- Quel est le comportement sédimentaire des bassins versants cévenols ? Quels sont les flux, de sédiments fins et grossiers, et comment varient-ils au cours du temps et en fonction des échelles spatiales d’observation ? Comment les mesurer ? La dynamique de ces flux sédimentaires est-elle similaire à celle d’autres régions du Sud-Est de la France, ou présente-t-elle des caractéristiques spécifiques ? Quels sont les facteurs qui contrôlent cette dynamique ?
- Comment ces flux sédimentaires sont-ils perçus du point de vue de la société et des usagers ? Quels sont les usages et enjeux passés, présents et futurs liés à ces flux ? Ces usages et perceptions présentent-ils des spécificités régionales ?

2.3 Objectifs scientifiques et opérationnels

- Etudier de façon comparative les pratiques de prélèvement des sédiments liés aux transports solides et les aménagements associés dans les bassins versants cévenols.

- Mieux comprendre les relations pluies-débits-érosion-transport solide : dans une logique régionale d'emboîtement d'échelles spatiale et temporelle.
- Développer le réseau de mesures des flux sédimentaires existant dans la zone cévenole : suite des programmes Terrisc (2003-2006) et FloodScale (2012-2015), via la mise en place d'une instrumentation concernant la mesure des flux de MES et un protocole de mesure de la charge grossière.
- Renforcer le partage de données et de savoir-faire avec les SNO Draix-Bléone et OHM-CV, ainsi qu'avec les partenaires institutionnels (EPTB Gardons notamment).

2.4 Partenaires et personnels associés

Tableau 1. Partenaires et personnels associés

Equipe			Personnels associés (porteur)
Equipe de recherche ZABR	CNRS UMR 7300		M. Chapuis, P.-A. Ayral, J.-
	ESPACE		M. Domergue, N. Dubus, D. Josselin, P.-A. Mannoni
	IMT Mines Alès		P.-A. Ayral, L. Aprin, J. Cerceau, C. Lopez
	IGE		B. Boudevillain, S. Boubkraoui, C. Legout, G. Nord
	INRAE (unité ETNA*)		C. Le Bouteiller, S. Klotz, F. Liébault
Autres partenaires	Recherche	SNO OHM-CV	Portage IGE, implication UMR ESPACE et IMT Mines Alès
		SNO Draix-Bléone	cf. implication de l'IGE
		Atelier transferts particuliers d'OZCAR	cf. implication C. Legout (IGE)
	Institutionnel	EPTB Gardons	

* l'unité ETNA d'INRAE a fusionné en 2023 avec l'IGE

Tableau 2. Stagiaires impliqués et structures d'appartenance

Stagiaires	Année	Structure d'accueil	Etablissement d'origine	Rapport en annexe
Mathilde Delaire	2021	ESPACE	Avignon Université	Annexe 6
Camille Imbert	2021	ESPACE	Université Savoie Mont-Blanc	Pour un aperçu synthétique de la démarche concernant les relations pluies-débits-érosion-transport solide, on se reportera utilement au résumé accepté à la conférence SHF de juin 2023 . Les apports du projet sont de

				type méthodologique, et de type thématique.
				Annexe 4
Ghita Serrhini Naji	2021	IMT Mines Alès	Université de Technologie de Compiègne	Annexe 2
Fabien Seve	2021	IGE	ENGES	Annexe 8
Mathieu Brun	2022	IMT Mines Alès	Université Grenoble Alpes	Annexe 5
Quentin Morabo	2022	ESPACE	Université de Pau et des Pays de l'Adour	Pas de rapport
Louise Dekeyser	2023	ESPACE et IMT Mines Alès	Université de Picardie Jules Verne	Annexe 3
Lise Petri	2023	ESPACE	ENSIL-ENSCI	Annexe 7
Thomas De Almeida	2023	IGE	Université Paris Est-Créteil Val de Marne	Annexe 9

2.5 Méthodologie générale

Une comparaison inter-BV avec ceux de l'Observatoire Draix-Bléone et du Réal Collobrier (INRAE), a permis de 1/ dégager certaines spécificités du fonctionnement hydro-sédimentaire cévenol et 2/ poursuivre la démarche de comparaison inter-BV entreprise au sein du réseau OZCAR pour le volet hydrologique et sédimentaire. Ce projet interdisciplinaire (hydrologie, géomorphologie, géographie, SHS...) s'est intéressé en particulier aux gradients locaux des forçages hydro-météorologiques et sédimentaires. Enfin, une approche chrono-systémique inter-BV a permis aux chercheurs d'ESPACE et de l'IMT Mines Alès d'acquérir une meilleure compréhension des usages associés aux flux hydro-sédimentaires passés, présents et futurs.

Ainsi le cœur du projet porte sur les Cévennes (bassins des Gardons et de l'Ardèche). Nous avons ensuite mené une approche de régionalisation pour évaluer les spécificités du domaine cévenol, par rapport à deux autres bassins : l'un représentatif des Alpes du Sud (Bléone), et l'autre du régime méditerranéen (Gapeau).

Concernant le volet « SHS » du projet sur les pratiques de prélèvements et les aménagements associés, les travaux se sont appuyés d'une part sur l'élaboration d'une frise chrono-systémique par BV pour représenter les interactions socioécologiques entre flux hydro-sédimentaires, usages associés au cours du temps et milieux (approche qui rejoint celle développée à l'OSR), et d'autre part sur des enquêtes de terrain auprès des usagers des cours d'eau, visant à obtenir une quantification objective des usages et perceptions des cours d'eau étudiés.

Concernant les relations pluies-débits-érosion-transport solide, le cœur de l'analyse a consisté à exploiter les chroniques de pluie, débits et concentrations en MES qui ont été compilées depuis les différentes bases de données existantes ([BDOH](#) et [HydroPortail](#)). En particulier, les données issues de l'antenne cévenole de l'UMR ESPACE ont été numérisées et référencées à l'aide d'un DOI au sein de la BDOH. À partir de la littérature existante et des partages de savoir-faire des différents partenaires, nous avons développé une instrumentation concernant la mesure des flux de MES et un protocole de mesure de la charge grossière. Enfin, pour mener les analyses concernant les relations pluies-débits-érosion-transport solide, nous avons adopté une logique régionale d'emboîtement d'échelles spatiale et temporelle :

- à échelle fine et « temps long », par exemple sur le bassin de Valescure (4 km²) vs. Gazel (3 km²) (cf. Annexe 7)
- à plus large échelle spatiale et sur le « temps court » : , par exemple sur le bassin des Gardons : Valescure (4 km²) vs. Saint-Jean-du-Gard (150 km²) vs. Anduze (543 km²) vs. Ners (1100 km²).

Enfin, avec l'appui méthodologique et technique du consortium de recherche, un suivi des flux hydro-sédimentaires fins et grossiers a été mis en place dans les Cévennes. En s'appuyant sur les sites cévenols suivis dans le cadre du SNO OHM-CV, le choix a été fait d'équiper les bassins versants expérimentaux de Valescure et du Rieu. Le dispositif d'observations comprend une combinaison d'instruments robustes (turbidimètres, échantillonneurs) et de dispositifs *low cost* (échelles à bouteille, pièges photographiques). Pour les sédiments grossiers, un travail en laboratoire a permis de développer un *workflow* visant à suivre par imagerie (sol et drone) les bancs de galets « *in situ* ». Cette méthodologie est en cours de test sur les mêmes bassins versants.

Un schéma de la méthodologie générale du projet DHySed-7 est présenté en Figure 3. Pour plus de détail, on se reportera utilement à la méthodologie présentée ci-après, qui a été reprise par rapport à celle élaborée lors du dépôt du projet (Annexe 1).

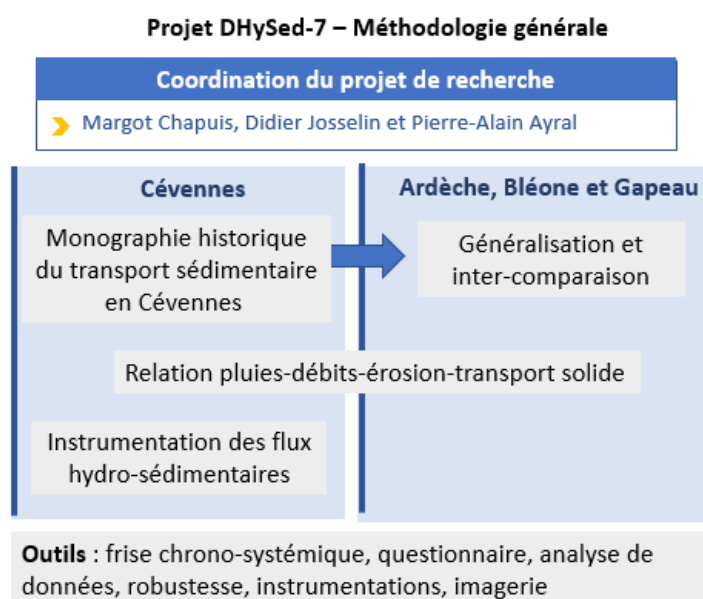


Figure 3. Méthodologie générale du projet DHySed-7

Notons dès à présent la position particulière des sables. Dans la partie « SHS », nous avons plutôt travaillé sur la dichotomie « sédiments fins vs. sédiments grossiers », sans préciser dans quelle catégorie tombe la fraction sableuse (le sable se comporte alternativement comme des matières en suspension – MES, ou comme la charge grossière, suivant les conditions d'écoulement). Au regard des enjeux relatifs à cette classe, on l'assimilera plutôt aux sédiments grossiers dans le volet « SHS », puisqu'ils ont fait l'objet d'une exploitation historique sur les Gardons : c'est une fraction sédimentaire qui est plutôt perçue positivement par les populations (usage pour la construction, pour la baignade).

A contrario dans le volet « pluies-débits-érosion-MES », on assimilera plutôt le sable aux MES car du point de vue comportement physique dans les bassins versants étudiés, le sable est plutôt mobile en suspension lors des événements pluvieux intenses générant des crues éclair. D'un point de vue méthodologique, il est à la fois intégré au suivi *low cost* des MES via les GEACOS (cf. section 3.2.1.1), mais aussi dans le suivi de la charge grossière via les mesures topographiques.

2.6 Méthodologie détaillée

Le projet DHySed-7 peut se découper en 3 volets, pour lesquels sont précisés les objectifs et la méthodologie utilisée.

2.6.1 Volet « SHS » : Identifications des pratiques de prélèvement et d'aménagement liées au transport solide et des services écosystémiques associés sur les bassins versants cévenols

Ce volet a été porté par J. Cerceau (IMT Mines Alès), N. Dubus et P.-A. Ayrat (ESPACE), et a donné lieu à plusieurs stages (cf. Tableau 2).

2.6.1.1 Objectif « SHS »

Etudier de façon comparative les pratiques de prélèvement des sédiments liés aux transports solides et les aménagements associés dans les bassins versants cévenols.

Ces pratiques et aménagements ont été observés pour le BV des Gardons dans une perspective :

- Spatiale et historique : identification et évolution des usages des sédiments au cours du temps, types d'aménagement associés et situation dans les bassins-versants, appréhension des impacts économiques, sociaux et environnementaux, perception de ces pratiques par les acteurs locaux.
- Systémique : analyse, à dire d'acteurs, des représentations concernant les interactions socioécologiques entre sédimentation/prélèvement/aménagement, transformation des milieux, création de nouveaux paysages, structures des écosystèmes et biodiversité, etc.

Ont également été identifiées les potentielles phases d'exploitation des sédiments au cours du temps (régimes et transitions), les enjeux socioécologiques associés et les perspectives pour le futur. La dynamique du système transport solide / exploitation des sédiments été représentée, les services écosystémiques assurés par ces flux hydro-sédimentaires ont été mis en avant.

Une étude comparative a été menée, notamment avec le BV de la Claduègne (Ardèche), avec pour cible l'analyse des perceptions actuelles de ces sédiments, de leurs usages et de leur utilité, afin de mettre en avant d'éventuelles particularités cévenoles.

2.6.1.2 Méthodologie « SHS »

- Recherche bibliographique : état de l'art sur le domaine d'étude, archives historiques (écrits, photos) sur les pratiques de prélèvement et d'aménagement dans les bassins-versants ciblés, évolution de la réglementation, évolution des paysages et des milieux.
- Entretiens : identification de personnes ressources, réalisation d'un guide d'entretien avec éléments de spatialisation, réalisation des entretiens, retranscription et analyse croisée et lexicométrique.
- Etablissement d'une frise chrono-systémique par BV (Gardons) pour représenter les interactions socioécologiques entre flux hydro-sédimentaires, usages associés au cours du temps et milieux. Cette approche rejoint celle développée à l'OSR.

- La généralisation et intercomparaison avec le bassin versant de la Claduègne (Ardèche) et des sous-bassins versants instrumentés de la Bléone (Bouinenc et Galabre, Alpes de Haute-Provence) était projetée mais n'a pu être réalisée que partiellement par le biais d'une enquête menée sur ces différents bassins versants.

2.6.2 Instrumentation et analyse des chroniques pluies-débits-érosion-MES

Ce volet a été porté principalement par P.-A. Ayrat, D. Josselin et M. Chapuis (ESPACE), C. Le Bouteiller (INRAE), G. Nord, B. Boudevillain et C. Legout (IGE) (voir Tableau 3 pour le détail des implications). Il a donné lieu à plusieurs stages (cf. Tableau 2).

2.6.2.1 Objectifs « pluies-débits-érosion-MES »

Mieux comprendre les relations pluies-débits-transport sédimentaire en région cévenole, en analysant d'une part les chroniques pluies-débits, et d'autre part en faisant le lien entre chroniques de débits et flux (érosion et MES) :

- I. Etude des chroniques pluies-débits
 - a. Valider le « caractère cévenol » des bassins cévenols étudiés (Gardons et Ardèche), c'est-à-dire valider le fait qu'ils présentent les spécificités climatiques/météorologiques/hydrologiques du régime cévenol : précipitations intenses, crues rapides...
 - b. Spécifier les éventuelles particularités climatiques/météorologiques/hydrologiques de ces bassins cévenols (gradients locaux du forçage météorologique).
 - c. La même démarche a été menée sur les bassins choisis comme typiques 1/ des Alpes du Sud (Observatoire Draix-Bléone : système Bléone-Galabre) et 2/ du régime méditerranéen (système Gapeau-Réal Collobrier).
- II. Etude des chroniques débits-MES
 - a. Faire le lien entre chroniques hydrologiques (débits ou hauteurs d'eau) et flux de MES, pour dégager des spécificités du fonctionnement des bassins versants étudiés.
 - b. Régionalisation : par comparaison avec les BV de la Bléone et du Gapeau, identifier dans quelle mesure les bassins étudiés (Gardons et Ardèche) peuvent être qualifiés de représentatifs des bassins versants cévenols en termes de dynamiques (hydro-sédimentaires : type (lithologie et granulométrie) et disponibilité de la fourniture sédimentaire, dynamique des flux (en crue et hors crue)...
 - c. Compléter le dispositif de suivi de la charge sédimentaire fine dans la région cévenole. Une approche *low-cost* a été développée en complément des dispositifs existants. Une approche à distance (*remote sensing*) reste envisagée pour s'adapter aux conditions d'observation difficiles.
 - d. Définir un protocole de suivi de la charge sédimentaire grossière en région cévenole (*remote sensing* envisagé).

En lien étroit avec les préoccupations des structures locales de gestion (EPTB Gardons, CLE des Gardons), les connaissances acquises restent encore à décliner en détail en termes d'impacts sur la biocénose (risque de colmatage des frayères, circulation hyporhéique...) au vu des faibles flux de MES observés jusqu'à présent (manque de crues morphogènes). L'impact du changement climatique à l'échelle du bassin méditerranéen sera développé qualitativement à brève échéance (début 2024) via une démarche de modélisation conceptuelle (Cévennes vs. Alpes du Sud vs. Méditerranée).

Enfin, le partage de données et de savoir-faire s'inscrit dans une démarche « intersites » du réseau OZCAR. En particulier, le projet DHySed-7 et l'atelier « transferts particuliers » d'OZCAR se sont nourris mutuellement :

- Les travaux menés à ESPACE se sont imprégnés des méthodologies de comparaisons des BV mises en place dans les stages OZCAR (O. Ka sur les comparaisons hydrologiques inter-BV des BV OZCAR, A. Flouriou sur les tendances des chroniques longues observées de plusieurs sites OZCAR ; A. Hosseinzadeh et F. Seve sur les comparaisons des comportements hydrosédimentaires des différents BV des IRs OZCAR et RZA) ;
- À l'inverse, le projet DHySed-7 s'est intéressé à des gradients régionaux plus « locaux » que dans OZCAR (forçage météo et régime hydrosédimentaire différents entre OHM-CV, Réal Collobrier et Galabre), en insistant sur les gradients locaux du forçage météorologique. Cette dimension a été peu abordée dans l'atelier transferts particuliers d'OZCAR, qui pourra donc s'inspirer du projet DHySed-7 pour poursuivre cette réflexion.

2.6.2.2 Méthodologie « pluies-débits-érosion-MES »

cf. Tableau 3

Pour les BV cévenols (Gardons et Ardèche), les sites d'étude ont été choisis et analysés en fonction des chroniques de données disponibles :

- À échelle fine et « temps long » : BV de Valescure (4 km² ; pluies et débits : depuis 2003) et Gazel (3 km² ; débits et MES : 2011-2014)
- À plus large échelle spatiale et sur le « temps court » : Claduègne (43 km² ; débits et MES : 2011-2014), Saint-André de Valborgne (30 km² ; pluies : depuis 2003 ; débits : depuis 2015) puis St Jean-du-Gard (130 km² ; débits : depuis 2015).

Tableau 3 : Méthodologie envisagée pour l'analyse des chroniques pluies-débits-érosion-MES : détail par objectif.

Objectifs concernés	Méthodologie	Personnes impliquées
I.a ; II.a	Analyse de chroniques sous R, sur des séries temporelles les plus longues possibles, au pas de temps horaire. Nous nous sommes concentrés sur les épisodes de crue pour identifier : temps de concentration, intensité et durée des pics, liens entre pics de précipitations, pics de crue et pics de MES. L'exploitation de vidéos (cf. ANR FloodScale) reste envisagée pour définir une fréquence annuelle de MES	M. Chapuis (R), P.-A. Ayral (R), D. Josselin (R), J.-M. Domergue (séries ESPACE), S. Boubkraoui (séries SNO OHM-CV), B. Boudevillain (séries SNO OHM-CV), C. Legout (séries Observatoire Draix-Bléone), S. Klotz (séries Observatoire Draix-Bléone), C. Le Bouteiller (séries Observatoire Draix-Bléone), stagiaires : F. Seve (IGE), L. Petri (ESPACE)
I.b ; II.c	Synthèse bibliographique et lien avec les résultats issus de l'étude des séries longues issues d'OZCAR (cf. stages OZCAR d'A. Flouriou, O. Ka et A. Hosseinzadeh)	Idem ci-dessus
II.b	Alimentation (et/ou exploitation) de la BD spatio-temporelle constituée pour identifier les caractéristiques physiques des bassins versants (données lithologiques spatialisées, exploitation de MNT et de photographies aériennes pour caractériser les zones de fourniture sédimentaire, évolution du profil en long, évolution de l'occupation du sol...) : mise en œuvre de la modélisation spatialisée GUSLE	D. Josselin, M. Chapuis, J.-M. Domergue, P.-A. Ayral, P.-A. Mannoni, M. Delaire, L. Petri
II.c	Partage de savoir-faire avec les SNO Draix-Bléone et OHM-CV	D. Josselin, M. Chapuis, J.-M. Domergue, L. Aprin, P.-A. Ayral, L. Aprin, P. Lauret, C. Lopez, S. Boubkraoui, B. Boudevillain,

		G. Nord, C. Legout, S. Klotz, C. Le Bouteiller, C. Imbert, M. Brun, L. Petri
II.d	(i) En lien avec les acteurs (EPTB Gardons, CLE des Gardons, OSR), priorisation des enjeux relatifs au transport grossier sur les rivières cévenoles et élaboration d'une stratégie de suivi (l'exploitation de vidéos issues de l'ANR FloodScale est envisagée, ainsi que l'utilisation de géophones) (ii) Développement d'une instrumentation <i>low cost</i> ; initialement prévu : un outil de suivi couplé des MES et des hauteurs d'eau via un LiDAR aéroporté à bas coût ; le suivi <i>low cost</i> inclut finalement autant la charge fine que la charge grossière, et une évaluation de son intérêt est prévue dès son déploiement.	D. Josselin, J.-M. Domergue, P.-A. Ayrat, L. Aprin, P. Lauret

2.6.3 Mise en place d'une base de données spatio-temporelle avec production des données en libre accès avec DOI et indicateurs de qualité et de robustesse

Ce volet a été porté par D. Josselin et P.-A. Ayrat (ESPACE), et a impliqué plusieurs stagiaires (cf. Tableau 2 et Tableau 4).

2.6.3.1 Objectifs « Bases de données et robustesse »

- I. Produire une base de données spatio-temporelle des bassins versants cévenols, qui a permis de produire de manière automatisée des cartes thématiques (méthodologie GUSLE, dérivée du modèle RUSLE)
 - a. Constituer une base de données spatiale, en complément de la BDO existante qui présente une dimension uniquement temporelle
 - b. Mettre en place une procédure de mise à jour automatisée de cette base de données spatio-temporelle
 - c. Produire de manière automatisée des cartes thématiques à destination d'utilisateurs-cible (recherche)
- II. Produire une série d'indicateurs de qualité et de robustesse des séries temporelles (données hydrologiques et MES), à destination également des gestionnaires des autres observatoires hydro-météorologiques (*a minima* Observatoire Draix-Bléone, Réal Collobrier)
 - a. Mettre en place une procédure de vérification/complétion/estimation des données erronées ou manquantes ;
 - b. Développer des outils facilement manipulables permettant de caractériser la qualité et la robustesse de séries hydrologiques et MES.

2.6.3.2 Méthodologie « Bases de données et robustesse »

cf. Tableau 4

Tableau 4 : Méthodologie envisagée pour la mise en place d'une base de données spatio-temporelles : détail par objectif.

Objectifs concernés	Méthodologie	Personnes impliquées
I.a	(i) Préparation et publication des données en libre accès sous DOI avec métadonnées spatiales et géolocalisation des sites où les séries sont récoltées et exploitées. (ii) Evaluation des différentes options techniques open-source (GitHub, PostGIS, Python, GeoPandas). (iii) Création d'une base de données spatio-temporelle des données de pluie, débits et MES des bassins versants cévenols à partir des données existantes (issues de la BDOH et HydroPortail).	J.-M. Domergue, D. Josselin, P.-A. Ayral, M. Chapuis, M. Delaire, L. Petri
I.b	(i) Mise en place d'une procédure automatisée de mise à jour de la base pour chaque nouveau jeu de données. (ii) Création et mise à jour automatisée d'un tableau de bord des données.	J.-M. Domergue, D. Josselin, P.-A. Ayral
I.c	Production automatisée de cartes thématiques, initialement prévues à destination des gestionnaires (EPTB Gardons notamment). L'approche exploratoire développée ne s'est pas révélée transférable aux gestionnaires.	D. Josselin, P.-A. Ayral, M. Chapuis, M. Delaire, L. Petri
II.a	(i) Travail bibliographique sur les méthodes et les outils d'évaluation de la qualité et des données de séries chronologiques (robustesse des méthodes d'analyse face aux données manquantes ou incertaines, estimation de données manquantes en fonction du contexte dans les séries, résistance aux valeurs extrêmes) (ii) Elaboration d'une procédure de vérification/complétion/estimation des données erronées ou manquantes par croisement entre les informations de débit, de pluviométrie et de mesure de MES (et éventuellement d'autres chroniques disponibles : insolation...): leur cohérence et leurs éventuelles concordances temporelles devrait permettre de lever certaines incertitudes lors de la vérification des données.	D. Josselin, L. Petri
II.b	Développement et production (sous Excel) d'un outil (i) d'évaluation de la qualité et de la complétion des données hydrologiques et des MES, (ii) d'estimation de la robustesse des méthodes d'analyse des séries chronologiques : outil d'analyse de séries temporelles basé sur des fenêtres mobiles et des agrégations statistiques à pas de temps variable ; adaptation aux séries traitées dans le projet ; détection de tendances, de ruptures, recherche de signaux faibles.	D. Josselin

3 Résultats

3.1 Pratiques de prélèvements solides et pratiques d'aménagement liées au transport solide et services écosystémiques associés sur les bassins versants cévenols

Annexe 2 : Monographie historique du transport sédimentaire en Cévennes : une approche par les hybrides (rapport Ghita Serrhini Naji, IMT Mines Alès et UTC, 2021)

Annexe 3 : Enquête sur les différents rôles du sédiment dans les modes d'habiter des bassins versants méditerranéens (rapport Louise Dekeyser, ESPACE/IMT Mines Alès et UPJV, 2023)

Points-clefs

- Identification des potentielles phases d'exploitation des sédiments au cours du temps (régimes et transitions), des enjeux socioécologiques associés et des perspectives pour le futur sur les bassins cévenols
- Élaboration de frise chrono-systémique par BV sur les bassins cévenols pour représenter les interactions socioécologiques entre flux hydro-sédimentaires, usages associés au cours du temps et milieux
- Généralisation et intercomparaison avec le bassin versant de la Claduègne (Ardèche) et les sites suivis du bassin versant de la Bléone (Alpes de Haute-Provence).

3.1.1 Introduction

Dans leur acception commune, les sédiments sont des dépôts qui proviennent de l'altération des versants et qui sont transportés par les rivières et les fleuves jusqu'à la mer. Sur la base d'entretiens menés auprès de chercheurs et d'acteurs de la gestion de l'eau sur le bassin versant des Gardons en 2021, nous avons pu mettre en évidence qu'il **n'existe pas une mais bien de multiples définitions des sédiments** (Figure 4).

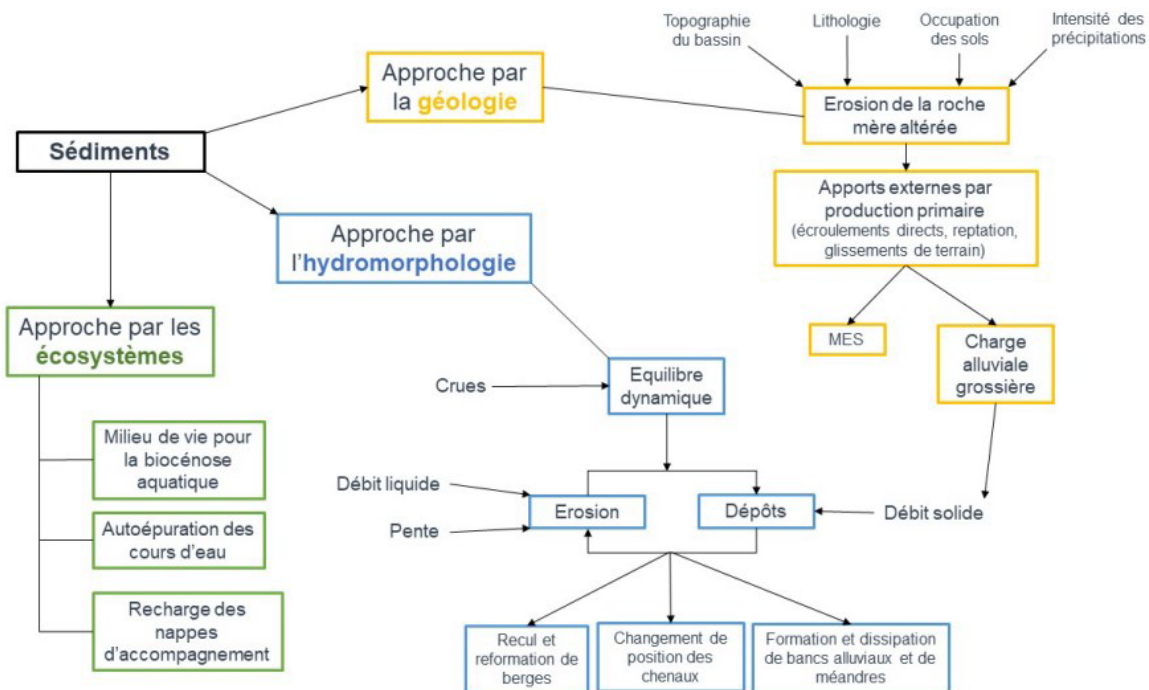


Figure 4. Le sédiment, un objet interdisciplinaire (source : Serrhini Naji, 2021, Annexe 2)

En géologie/géomorphologie, c'est un **marqueur temporel** de l'histoire de la Terre. En hydromorphologie, c'est un **acteur de la formation du lit alluvial** par les dynamiques croisées entre charge solide et charge liquide. En écologie, il constitue un **écosystème** à part entière jouant un rôle dans le maintien des milieux de vie et l'autoépuration des cours d'eau. Ce constat nous a permis d'écarter dès le départ la possibilité de les considérer comme de la matière inerte.

Il est ainsi possible de **définir le sédiment comme un hybride**, en soulignant l'influence croisée des processus biophysiques et des activités anthropiques sur le transport sédimentaire. Autrement dit, l'origine et le transport des sédiments sont déterminés par des processus biophysiques mais ils sont également largement conditionnés par les activités humaines, de manière directe (régulation des flux sédimentaires par les barrages par exemple) ou indirecte (influence des terrasses sur les flux).

Considérer les sédiments comme hybrides, c'est donc à la fois admettre le déterminisme matériel et environnemental dans lequel s'insèrent nos organisations sociales de gestion des cours d'eau tout en reconnaissant l'influence de ces organisations sur les faits dits « naturels ». De cet assemblage émergent des **équilibres dynamiques**, de **nouvelles formes fluviales** (par exemple, le reméandrage) et des **effets de rétroaction** (par exemple la relation entre érosion et accentuation de la pente du lit). Les activités humaines et les choix en termes de gestion peuvent donc affecter l'évolution des cours d'eau, mais elles doivent composer avec les dynamiques environnementales en jeu (on pense par exemple aux efforts d'aménagement du lit pour lutter contre des inondations imprévisibles).

Cette approche par les hybrides nous a ainsi conduit à formuler des **hypothèses** qui ont guidé notre travail de recherche :

- Le sédiment comme **marqueur** : il existe différentes représentations et pratiques du sédiment selon les territoires, et celles-ci évoluent avec le temps.

- Le sédiment comme **acteur** : le sédiment a une influence sur les représentations et les pratiques des habitants sur le territoire.
- Le sédiment comme **vecteur** : les représentations du sédiment influencent les pratiques de gestion des cours d'eau et du transport sédimentaire.

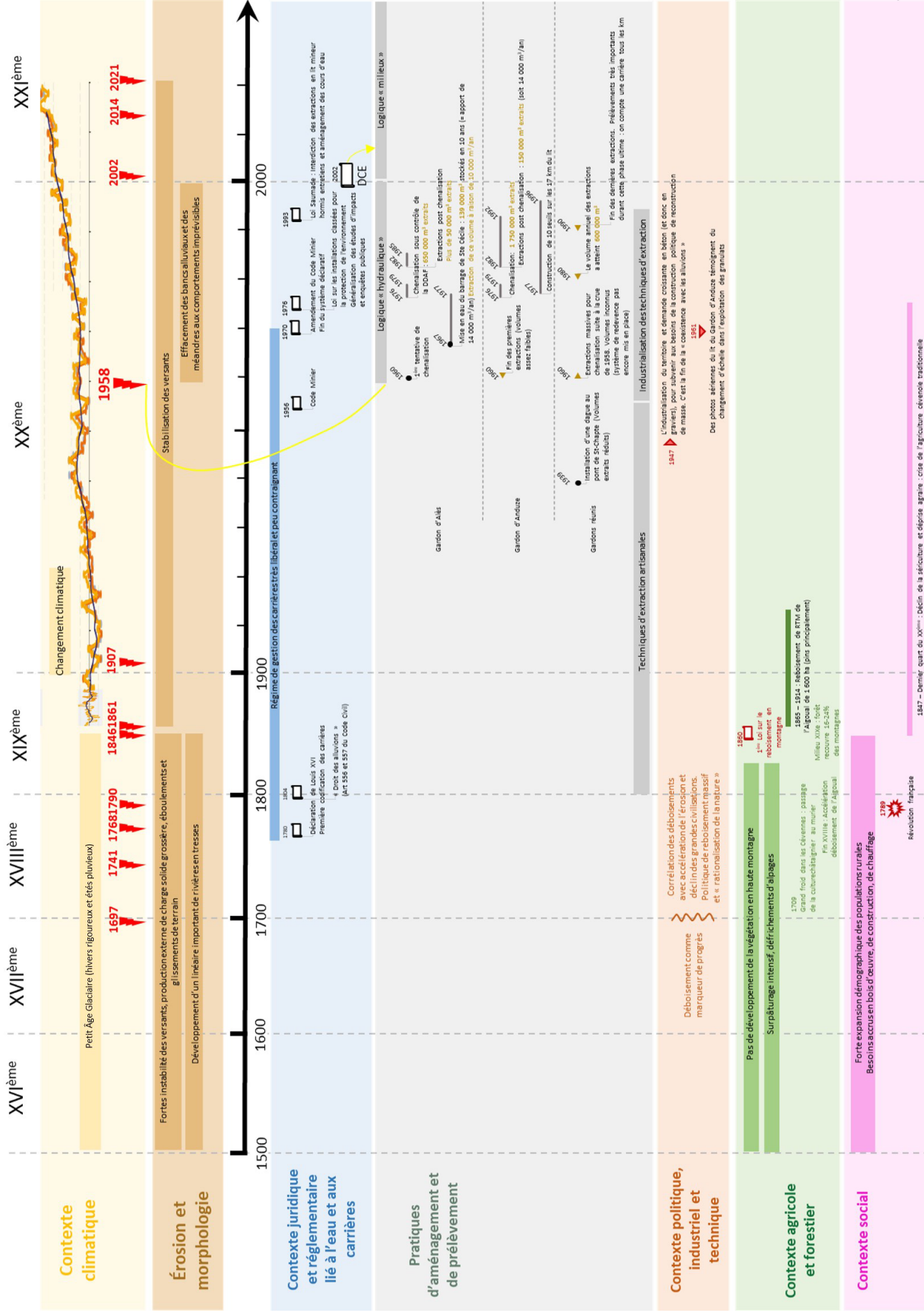
3.1.2 Sur les Gardons cévenols

Apports de l'approche historique des pratiques de prélèvements et d'aménagements liées au transport solide dans le bassin versant des Gardons

En tant que marqueur, nous posons que **le sédiment permet de retracer notre rapport à la nature anthropisée**. Les travaux menés, sur la base de l'analyse d'archives, de documents historiques et d'entretiens menés auprès d'acteurs locaux ont permis de reconstituer une **trajectoire chrono-systémique de l'histoire extractive des sédiments en Cévennes**, depuis le XVII^{ème} siècle (Figure 5). Cette trajectoire permet :

- D'interroger les **différentes échelles de temps** sur lesquelles il est pertinent d'observer les changements en cours ;
- De questionner **l'interdépendance**, et donc **l'hybridation**, des phénomènes dits naturels avec les événements politiques, sociaux et techniques.

Le facteur le plus déterminant dans l'histoire locale des Gardons reste la **crue dévastatrice de 1958** qui a eu pour effet l'accélération des extractions massives de sédiments. Jusqu'en 1946, les prélèvements des graviers s'effectuent majoritairement de manière artisanale. Dès 1950, une dizaine de sites d'extraction des horizons sableux et zones de sédiments grossiers se développent sur le Gardon d'Anduze. Mais la crue de 1958 marque le lancement d'un **vaste projet d'aménagement et de transformation morphologique**, comprenant la chenalisation progressive des Gardons, des piémonts jusqu'à la plaine. Au total, on estime que **le bilan total des volumes de matériaux grossiers extraits depuis les années 1960 est de l'ordre de 60 millions de mètres cubes**. Selon les différentes sources et leurs méthodes de calcul, on estime que les 15 millions de m³ extraits sur les Gardon d'Alès et d'Anduze représenteraient l'équivalent de 3 à 15 siècles d'apports sédimentaires.



Ces extractions prennent définitivement fin avec la loi du 4 janvier 1993, dite « loi Saumade » qui interdit les extractions d'alluvions en lit mineurs à d'autres fins que l'entretien ou l'aménagement des cours d'eau. Les **conséquences des extractions** se sont fait ressentir avant la fin des travaux, avec l'abaissement du lit (incision de 2 à 2,5 m en moyenne) et l'altération des potentialités aquifères de la nappe associée. Mais du fait de la dynamique des mouvements sédimentaires qui ont suivi, des érosions progressives, de l'influence de la crue de 2002 et de l'influence de seuils et des campagnes de gestion des atterrissements, **ces effets ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin versant** (Figure 6).

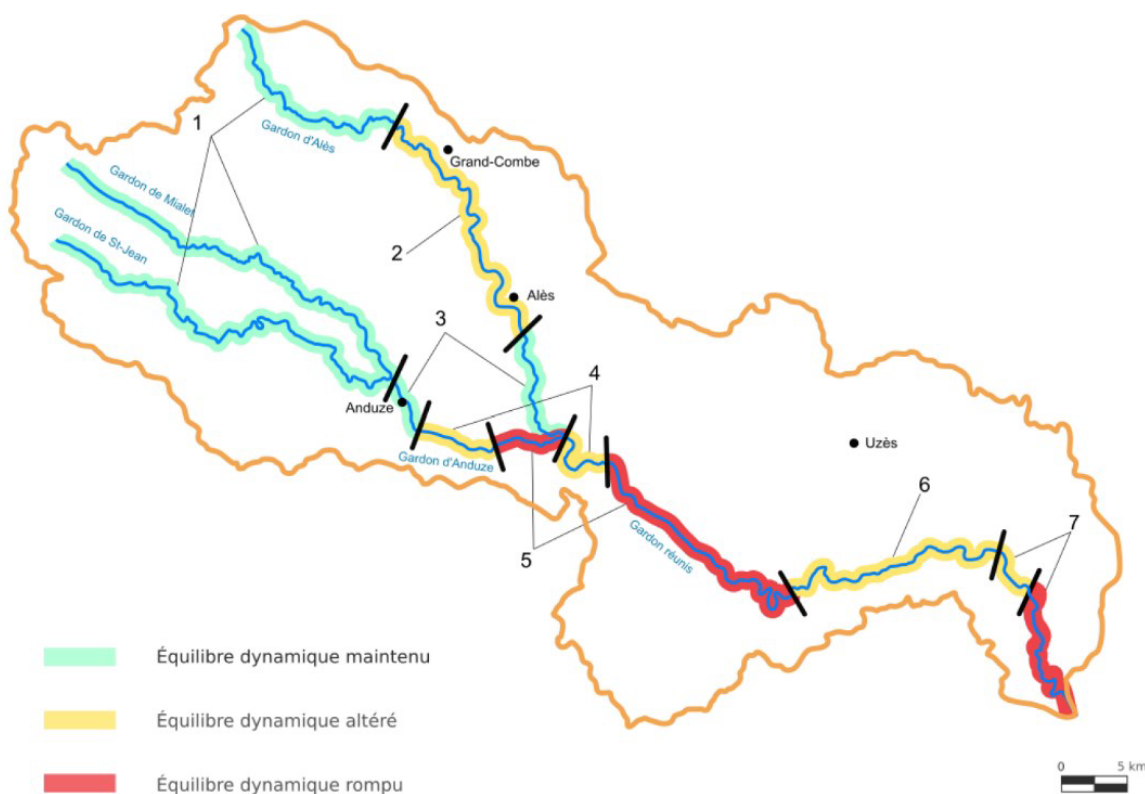


Figure 6. Conséquences des extractions par secteur sur le bassin versant des Gardons (source : Serrhini Naji, 2021 : Annexe 2)

3.1.3 Sur les « spécificités » cévenoles

Comment les habitants riverains des cours d'eau cévenols se représentent-ils les sédiments issus du transport solide et perçoivent-ils leur rôle dans leurs rivières ? Partant de l'hypothèse que ces perceptions et représentations peuvent impacter les comportements et pratiques vis-à-vis de la rivière et de ces matériaux, une enquête a été menée au cours du printemps 2023, avec pour objectif de mieux comprendre les représentations des sédiments dans ces bassins versants, leur usage et la perception des services et biens qu'ils apportent. L'enquête a été menée auprès d'habitants des bassins versants des Gardons dans les Cévennes, mais aussi d'autres bassins situés en montagne méditerranéenne du sud de la France, comme celui de la Bléone (Alpes-de-Haute-Provence), celui de l'Ardèche en amont de Ruoms et celui du Gapeau (Var), afin de mettre en évidence d'éventuelles particularités du fonctionnement socio-hydro-sédimentaire cévenol.

Le questionnaire est composé de rubriques permettant d'évaluer le rapport que peut avoir la personne enquêtée au cours d'eau qu'elle est amenée à fréquenter, sa perception de ce que doit être un cours d'eau « en bon état », sa perception des sédiments et des aménagements liés, sa perception des sédiments en termes de services écosystémiques et/ou en termes de nuisance.

Différents modes de passation ont été utilisés afin d'accroître et de diversifier le nombre de répondants :

- en ligne *via* les listes de diffusion des syndicats de bassin, ainsi que *via* des acteurs relais comme des associations, organismes publics, communes, et enfin *via* des groupes issus du réseau social Facebook ;
- sur le terrain en déposant des flyers auprès de certains professionnels, en distribuant des flyers dans les lieux publics ou en interrogeant directement des passants, mais ce mode de diffusion est resté limité faute de temps et en raison de contraintes administratives.
- À noter également que des entretiens auprès des gestionnaires ont été menés sur chacun des bassins versants pour compléter l'analyse.

72 personnes ont répondu au questionnaire, dont 34 (47%) dans le bassin versant des Gardons. Si l'échantillon ne peut être considéré comme représentatif de l'ensemble des riverains, il permet cependant de mettre en avant certaines tendances. 32% des répondants sont sur le bassin versant de l'Ardèche ce qui permet de distinguer d'éventuelles différences significatives entre les perceptions sur ces deux bassins versants. Avec respectivement 12% et 4% des répondants, il est plus difficile de se positionner sur les bassins versants de la Bléone et du Gapeau. La distance des enquêteurs à ces deux bassins versants explique peut-être en partie ces faibles participations.

Les tendances générales montrent des répondants relativement proches de leurs cours d'eau (41% vont au bord du cours d'eau plusieurs fois par semaine et 74% côtoient le cours d'eau toute l'année). Sur la perception de la quantité des sédiments, 41% des personnes n'y prêtent pas attention, 25% pensent qu'il n'y en a pas assez, 19% qu'il y en a suffisamment et 11 % pensent qu'il y en a trop. Pour la moitié des répondants il n'y a pas de risques associés à la présence de sédiments dans la rivière, 92% reconnaissent que les sédiments font office de lieu de vie pour la faune et la flore et 71% connaissent le rôle d'autoépuration des sédiments. Ce résultat paraît très important mais il convient de noter que 63% des répondants sont reliés aux rivières et à la question des sédiments par leur travail et proposent donc des réponses « averties » sur la problématique des sédiments.

Les résultats, développés dans le mémoire de L. Dekeyser (2023, Annexe 3), permettent également de proposer les hypothèses suivantes sur les « spécificités » cévenoles.

- **Peu de visibilité des sédiments et de leur quantité sur le bassin versant des Gardons** – Sur la quantité des sédiments les répondants du bassin versant des Gardons ont tendance à ne pas y prêter attention *a contrario* des répondants en Ardèche où la tendance serait qu'il n'y en a pas assez.
- **Une nuisance (des sédiments) liée au risque inondation** – Si pour 60% des répondants du bassin versant de l'Ardèche aucune nuisance n'est liée aux sédiments, 38% des répondants sur les Gardons et 50% sur la Bléone y associent le risque de crue. L'écart observé entre l'Ardèche et les Gardons ne semble pas s'expliquer au travers d'une différence dans la diversité des profils des répondants entre les 2 bassins.
- **Un équilibre de gestion à trouver entre un optimum écologique de non-intervention et l'inquiétude sociale liée aux crues sur les Gardons** – *A contrario* de l'Ardèche où une logique non interventionniste semble s'imposer et les bassins de la Bléone et du Gapeau où la logique semble beaucoup plus interventionniste.

Les hypothèses proposées semblent solides au regard de la méthodologie mise en œuvre (combinaison de l'enquête avec des entretiens), mais il est important de noter le peu de réponses du grand public à l'enquête, peu de réponses qui illustrent une large invisibilité des sédiments. Cette invisibilité explique largement, selon nous, la difficulté dans l'obtention d'un nombre important de réponses aux questionnaires. Ce manque de visibilité a également été observé sur le terrain lorsque l'enquêtrice proposait le remplissage « *in situ* » du questionnaire auprès du grand public.

3.2 Relations pluies-débits-érosion-MES dans les Cévennes

Pour un aperçu synthétique de la démarche concernant les relations pluies-débits-érosion-transport solide, on se reportera utilement au résumé accepté à la conférence SHF de juin 2023 (Aprin, et al. 2023). Les apports du projet sont de type méthodologique, et de type thématique.

Annexe 4 : Méthodes de mesure des Matières En Suspension (MES) et de la charge solide des cours d'eau cévenols – Stratégies expérimentales (rapport Camille Imbert, ESPACE et USMB, 2021)

Annexe 5 : Vers le suivi des sédiments grossiers sur les cours d'eau cévenols (rapport Mathieu Brun, IMT Mines Alès et UGA, 2022)

Annexe 6 : Cartographie de l'aléa d'érosion dans le bassin versant de Saint-Jean du Gard, Cévennes – Application du modèle GUSLE (Geographical Universal Soil Loss Equation) (rapport Mathilde Delaire, ESPACE et Avignon Université, 2021)

Annexe 7 : Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes (rapport Lise Petri, ESPACE et ENSIL-ENSCI, 2023)

Annexe 8 : Comparaison des dynamiques hydro-sédimentaires pour une grande diversité de bassins versants (rapport Fabien Seve, IGE et ENGEES, 2021)

Annexe 9 : Dynamique de végétation dans les bassins de Draix depuis les 40 dernières années (rapport Thomas De Almeida, Inrae et UPEC, 2023)

Points clefs

- Une approche expérimentale des flux hydro-sédimentaires fins et grossiers déployée sur les Cévennes et combinant systèmes robustes et « *low cost* »
- Application des modèles RUSLE et GUSLE sur les bassins versants du Gardon à Ners, de l'Ardèche à Ruoms, de la Bléone et du Gapeau.
- Inter-comparaison des chroniques pluies-débits (et flux hydro sédimentaires) sur les bassins versants du Gardon à Ners, de l'Ardèche à Ruoms, de la Bléone et du Gapeau.

3.2.1 Apports méthodologiques

Nous reprenons ci-après certains éléments présents dans le résumé accepté à la conférence SHF de juin 2023 (Aprin, et al. 2023).

3.2.1.1 Approches expérimentales

Pour dépasser les limitations inhérentes au suivi de crues éclair (haute variabilité spatiale et temporelle, impacts destructeurs sur les systèmes de mesure), nous avons déployé un réseau de mesures *low cost* : pièges à sédiment GEACOS (cf. Figure 7) et échelle à bouteilles pour la fraction fine, pièges photos pour la fraction grossière et le suivi des bancs... (cf. Annexe 5). Ce réseau *low cost* est couplé à un système plus robuste et éprouvé composé d'échantillonneurs associés à des sondes de turbidité : l'objectif est d'assurer un suivi efficace et de valider le système *low cost* pour ensuite le

déployer sur d'autres sites et ainsi affiner le maillage du réseau de mesure et la représentation spatiale des résultats tout en limitant les contraintes liées à son maintien dans le temps (*remote sensing* lorsque cela est possible). Sans rentrer dans le détail, et pour donner un ordre de grandeur, la totalité de l'équipement *low cost* (fin+grossier : GEACOS + échelle à bouteilles + piège photo : cf. Tableau 5) déployé sur un site reste bien moins chère que l'achat d'un unique échantillonneur automatique pour les MES (coût environ divisé par 4). Les apports du projet DHySed-7 visent ainsi à obtenir des résultats de type thématiques (spécificités cévenoles), mais également méthodologiques.



Figure 7. Installation des GEACOS sur le site du Rieu, source : Imbert, 2021, Annexe 4

L'instrumentation mise en place (cf. Tableau 5) s'appuie sur les sites de suivi hydrométéorologiques de l'OHM-CV (Observatoire Hydrométéorologique Cévennes-Vivarais) et certains sites ont vocation à s'inscrire sur le long terme pour compléter les données acquises par l'observatoire. Les bassins versants de Valescure (4 km², granit, labellisé par l'OHM-CV) et ceux du Rieu (4 km², schiste) et du Gardon de Saint-Jean Amont (30 km², schiste, GSJ Amont) ont été retenus pour accueillir cette démarche (Figure 8). Après une première phase de mise en œuvre de ces protocoles d'instrumentation (Imbert, 2021 : Annexe 4), nous attendons des événements générateurs de crue pour valider notre approche de terrain.

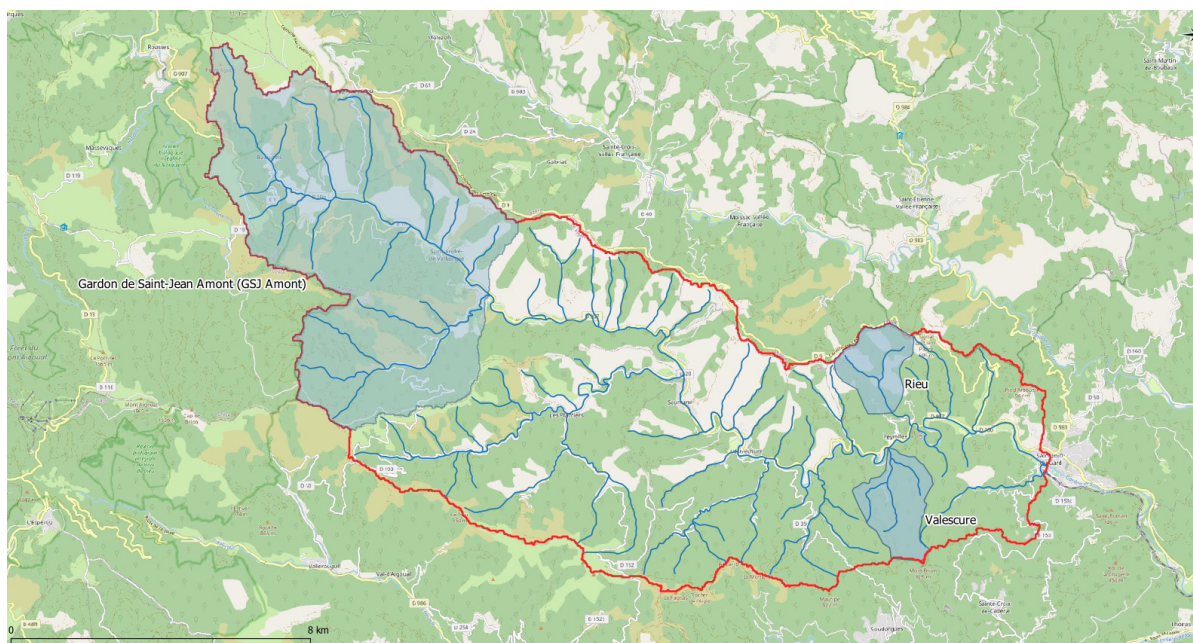


Figure 8. Les sites expérimentaux en Cévennes

Le Tableau 5 ci-dessous fait état des dispositifs expérimentaux ou suivis mis en œuvre sur les 3 sites. Pour un aperçu synthétique de la démarche concernant les relations pluies-débits-érosion-transport solide, on se reportera utilement au résumé accepté à la conférence SHF de juin 2023 . Les apports du projet sont de type méthodologique, et de type thématique.

Annexe 4

Tableau 5. Synthèse de l'instrumentation mise en place dans le cadre du projet

Domaine	Instrumentation	Objectif	Site*
Hydrologie	Stations hydrométriques	Renforcement du réseau de mesure des hauteurs d'eau et calcul du débit	Rieu (installée dans le cadre du projet), Valescure (depuis 2004)
Hydrologie	Pluviomètre	Renforcement du réseau de mesure des précipitations	Rieu (installée dans le cadre du projet), Valescure (depuis 2004)
MES	GEACOS	Renforcement du réseau de mesure des MES : test <i>low cost</i>	Rieu, Valescure
MES	Echantillonneur automatique de MES (standard)	Renforcement du réseau de mesure des MES	Rieu, Valescure
MES	Préleveur de MES (bouteilles)	Renforcement du réseau de mesure des MES : test <i>low cost</i>	Valescure
MES	Turbidimètre mobile	Renforcement du réseau de mesure des MES	Rieu, GSJ Amont et Valescure
MES	Turbidimètre fixe	Renforcement du réseau de mesure des MES	Valescure

Topographie/charge grossière	Levé scanner 3D	Suivi de la charge grossière et de la topographie	Rieu et GSJ Amont
Topographie/charge grossière	Levé drone	Suivi de la charge grossière et de la topographie	Rieu et GSJ Amont
Topographie	Piège photo (caméra)	Suivi de la charge grossière et de la topographie : test <i>low cost</i>	Rieu, Valescure

*GSJ Amont : Gardon de St Jean au pont de l'Elze

3.2.1.2 Analyse des chroniques pluies-débits-érosion-MES

Concernant les apports méthodologiques sur l'analyse des relations pluies-débits-érosion-MES, on se reportera utilement au rapport de L. Petri en Annexe 7 qui porte sur les dynamiques hydro-sédimentaires dans les 4 bassins versants d'étude, mais également au rapport de F. Seve, stage réalisé dans le cadre d'OZCAR et portant sur un grand nombre de bassins versants, dont le Galabre, la Claduègne et l'Ardèche (Annexe 8).

D'une manière générale, nous avons validé l'exploitation parallèle des chroniques issues de la BDOH et d'HydroPortail, tant pour les séries temporelles des précipitations, que des débits et des concentrations en MES.

Concernant spécifiquement l'analyse de chroniques de pluie, la méthodologie proposée dans la thèse de D. Maréchal (2011) est apparue comme reproductible pour dégager les grandeurs caractéristiques des événements étudiés (débit max et son horodatage, intensité max survenue durant l'événement, temps de montée de crue, temps de réaction, temps de réponse, cumul de pluie durant l'événement, cumul de pluie depuis la fin de l'étiage). Les hypothèses fortes qui ont été prises sont les suivantes :

- La fin de l'étiage est prise début août quel que soit le BV (cf. influence méditerranéenne du climat quel que soit le BV considéré)
- Deux averses feront partie d'un même événement de pluie si elles sont séparées d'un intervalle inférieur à une heure (cf. précision des chroniques disponibles)
- Le début de la montée des eaux (crue) est pris à l'inflexion du débit qui suit la première averse (cf. réaction du BV).

Enfin, le débit spécifique (Q_{max}/S : rapport entre le débit max observé et de la surface du bassin versant) est apparu, comme prévu, comme un bon indicateur pour replacer un épisode étudié dans un contexte temporel ou spatial plus large (événement étudié par rapport aux crues historiques ; comparaisons inter-BV).

3.2.1.3 Approche théorique : modélisation du potentiel érosif dans les Cévennes

Dans le prolongement de l'approche métrologique de terrain présentée, la compréhension de la séquence pluies-débits-érosion-MES requiert une étape de spatialisation à l'échelle de la zone d'étude. Nous proposons en première approche l'application du modèle RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation* (Renard, et al. 1997), (Ghosal et Das Bhattacharya 2020)) qui permet d'utiliser les données spatialisées disponibles à large échelle au travers d'une chaîne de traitements sous SIG et son adaptation baptisée GUSLE pour Geographical RUSLE. Les deux modèles ont été déployés sur les Gardons Cévenols (cf. Annexe 6) mais également sur les 3 autres bassins versants étudiés : l'Ardèche (en amont de Ruoms), la Bléone et le Gapeau (cf. Annexe 7 pp. 28 et 103). Il est à noter que le modèle GUSLE ne permet de ne travailler que sur le potentiel érosif à l'origine de la production de sédiments fins (donc de qualifier un potentiel d'export de MES), et n'est en aucun cas adapté pour la charge grossière.

Les résultats sont présentés sur la Figure 9 (*a.* le modèle RUSLE, *b.* le modèle GUSLE), et bien qu'à manier avec précaution, mettent en évidence le rôle prépondérant de la lithologie et/ou de la pente sur les exports sédimentaires.

Il apparaît que cette première approche est intéressante pour qualifier le potentiel érosif dans une logique de comparaison inter-BV : en effet les ordres de grandeur obtenus via le modèle GUSLE pour chaque BV sont cohérents avec les attendus « experts » (potentiel de production sédimentaire plus important pour le BV de la Bléone que pour les autres BV ; potentiel érosif des pluies (cumuls, intensités) plus important pour le BV des Gardons que pour les autres BV). Cependant, les cartographies produites à l'échelle de chaque BV sont actuellement peu convaincantes : ces résultats restent donc à l'heure actuelle très insuffisants pour une approche plus fine : les paramètres (et les bases de données) utilisés doivent impérativement être approfondis pour une analyse intra-BV. Toutefois la méthodologie automatisée est bien en place ce qui facilitera le travail à venir.

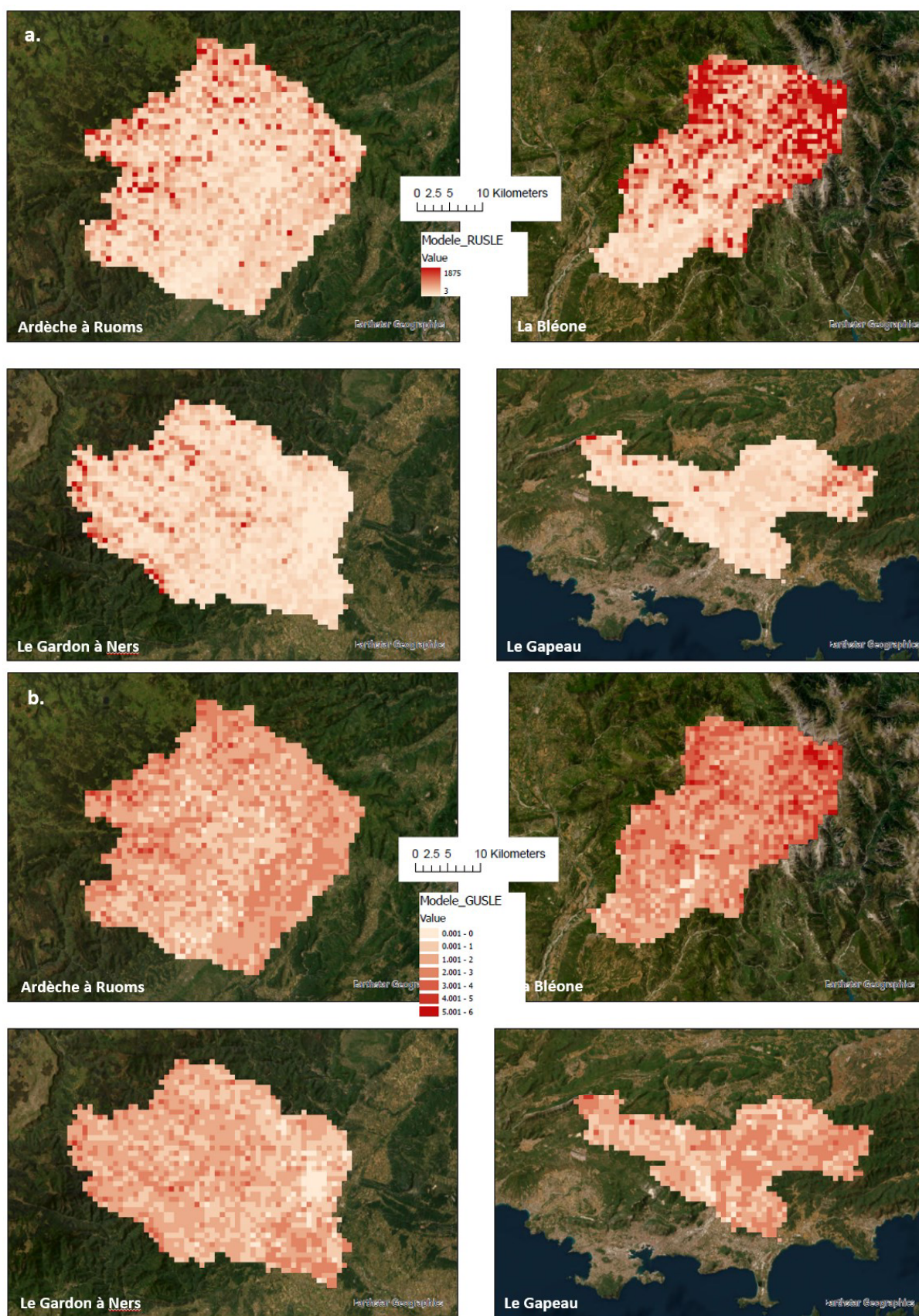


Figure 9. Application des modèles RUSLE (a.) et GUSLE (b.) (P.-A. Mannoni in Petri, 2023, Annexe 7)

3.2.2 Apports thématiques

Concernant les apports thématiques sur les relations pluies-débits-érosion-MES, on se reportera utilement au rapport de L. Petri en Annexe 7 qui concerne les dynamiques hydro-sédimentaires dans les 4 bassins versants d'étude, mais également au rapport de F. Seve, stage réalisé dans le cadre d'OZCAR et portant sur de nombreux bassins versants, dont le Galabre, la Claduègne et l'Ardèche (Annexe 8).

En préambule, on notera la différence entre un épisode cévenol et un épisode méditerranéen : lorsque le caractère orographique des précipitations est marqué, on parle d'épisode cévenol. Si l'effet orographique est limité, on parlera plutôt d'épisode méditerranéen.

3.2.2.1 Du point de vue hydrologique

Les événements étudiés dans une logique de régionalisation montrent certaines limites : pour les bassins versants de l'Ardèche et des Gardons, les événements étudiés sont bien des événements exceptionnels, les analyses proposées sont donc fiables. Ce n'est pas le cas pour les événements recueillis sur la Bléone et le Gapeau (profondeur temporelle insuffisante des chroniques, débits maximaux spécifiques sélectionnés qui sont peu représentatifs d'un épisode exceptionnel, d'où une méthodologie qui reste à affiner dans certains cas).

Il est à noter que le BV des Gardons ressort comme présentant des intensités maximales bien supérieures aux autres BV sur les chroniques étudiées : de 72 mm/h à Valescure et jusqu'à 234 mm/h à Anduze en 2002, contre des valeurs sur le BV de l'Ardèche allant de 6 à 66 mm/h sur la Claduègne et à la station de Vallon-Pont-d'Arc, respectivement.

Le cumul de précipitations antérieures à l'événement est rapidement apparu comme un critère particulièrement pertinent pour mener une analyse comparative inter-bassins versants. Afin d'avoir une fenêtre temporelle commune aux différents bassins versants, tout en évitant de « remonter trop loin dans le temps » par rapport aux événements étudiés, nous avons choisi de travailler à partir du critère « cumul de précipitations depuis août », ce qui correspond à quantifier les pluies d'imbibition.

L'analyse des cumuls de précipitations depuis août montrent que le BV des Gardons ressort comme le plus susceptible de subir des pluies d'automne importantes, avec 645 mm de pluie depuis le mois d'août, contre 514 mm pour l'Ardèche, 500 mm pour le Gapeau et enfin 415 mm pour la Bléone (cf. Annexe 7).

Ces valeurs mettent tout d'abord en évidence l'importance des premières pluies d'automne pour réhydrater les sols et les saturer. Ce premier élément génère des questionnements supplémentaires. En effet pour le bassin versant des Gardons, il a été observé empiriquement qu'un cumul de précipitations à l'automne inférieur à 400 mm (valeur à affiner, mais cohérente avec la valeur moyenne énoncée plus haut) correspond à une valeur-seuil pour définir une réaction du bassin versant. Qu'en est-il pour les autres BV ? Retrouve-t-on une telle valeur-seuil correspondant physiquement à une capacité de rétention des bassins versants ? Ainsi, dans un deuxième temps d'analyse, nous observons que les valeurs énoncées plus haut semblent être du même ordre de grandeur, ce qui resterait à confirmer. La potentielle existence d'une telle valeur « partagée » interpelle, d'autant qu'elle semble particulièrement grande : il y a *a priori* certaines différences en termes de capacité de rétention des différents bassins, mais qui ne sont en aucun cas réputés pour leurs épaisseurs de sol. Dans le cas des bassins cévenols, cela interroge notamment le comportement hydrologique de la zone altérée : nous suggérons ici d'approfondir ce volet, en faisant le lien entre méso-échelle (zone altérée) et échelle du bassin, et entre volumes précipités et réaction du bassin versant, dans une approche typiquement géographique de l'hydrologie.

Grand bassin versant		ARDECHE	ARDECHE	ARDECHE	ARDECHE	GARDONS	GARDONS	GARDONS	GARDONS	GARDONS	BLEONE	BLEONE	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL
1 ^{re} événement	Station Q	GAZEL	CLADUEGNE	VPARC	VPARC	VALESCURE	SIG	ANDUZE	NERS	GALABRE	DIGNE	COGOLINS	COLLOBRIERE S	PONTDEFER	HYERES		
	Pas de temps Q	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Station P	MIRABEL	MIRABEL	VPARC	VPARC	VALESCURE	VALESCURE/SIG	ANDUZE	NERS	GALABRE	GALABRE	CROIX d'ALSEMES	COLLOBRIERE S	COLLOBRIERES	COLLOBRIERES		
	Pas de temps P	60	60	60	5	5	5	5	5	15	15	5	5	60	60	60	60
	Taille BV (km²)	3,4	43	1958		3,93	150	543	1100	22	608	5,47	29,02	70,4	70,4	517	517
	Cumul depuis août (mm)	251,5	599	368,5		965,5	237	837,5	736	332,5	523,8	503,2	/	443,9	443,9	836,7	836,7
	Cumul jour événement (mm)	47,5	153	62		161	197	648,5	539	67,1	161,6	285,4	/	160,7	160,7	369,9	369,9
	Q max (m3/s)	29,6	212,3	2490		1883	607	3200	7000	35	179	0,9	/	117	117	571	571
	Date	23/10/2013	04/11/2014	23/11/2019		23/11/2018	12/09/2015	09/09/2002	09/09/2002	05/11/2016	25/11/2016	17/06/2010	/	23/11/2019	23/11/2019	19/01/2014	19/01/2014
	heure	12:35:00	14:30:00	13:15:00		16:25:00	20:15:00	06:00:00	08:50:00	19:20:00	07:35:00	07:20:00	/	10:45:00	10:45:00	18:10:00	18:10:00
2 ^{ème} événement	Qmax/S (m³/s/km²)	8,7	4,9	1,3		4,8	4,0	5,9	6,4	1,6	0,3	0,2	/	1,7	1,7	1,1	1,1
	Im (mm/h)	21	19	30		72	102	234	204	22,4	11,2	48	/	19,2	19,2	62,6	62,6
	TRr réaction (min)	20	120	210		0	345	315	445	110	540	350	/	30	30	15	15
	TRp réponse (min)	80	180	210		0	345	315	445	125	555	350	/	90	90	75	75
		0	30	360		25	30	45	105	185	140	440	/	285	285	670	670
		30	90	360		25	30	45	105	200	155	440	/	345	345	730	730
	Temps de montée crue (min)	315	630	1045		595	130	550	735	810	1100	2780	/	1215	1215	2095	2095
	Cumul depuis août 2 (mm)	507	452	906,5		848,9	677	101,5	744,5	489,5	314,9	/	443,9	360,7	360,7	441,9	441,9
	Cumul jour événement 2 (mm)	153	43	243		492,5	49,5	57	42	218,8	78,5	/	161,7	110,9	110,9	160,7	160,7
	Q max 2 (m³/s)	25,3	150	2330		12,4	557	1780	1380	33,991	124	/	51,4	43,3	43,3	376	376
3 ^{ème} événement	Date 2	04/11/2014	19/12/2013	22/11/2016		19/10/2006	10/10/2014	19/09/2020	28/10/2015	24/12/2009	03/10/2015	/	23/11/2019	01/11/2018	01/11/2018	23/11/2019	23/11/2019
	heure 2	13:50:00	21:40:00	20:30:00		21:45:00	22:20:00	13:25:00	11:45:00	19:20:00	20:15:00	/	09:45:00	02:25:00	02:25:00	15:45:00	15:45:00
	Qmax/S 2	7,4	3,5	1,2		3,2	3,7	3,3	2,6	1,5	0,2	/	1,8	0,6	0,6	0,7	0,7
	Im 2 (mm/h)	19	5,5	66		172,8	78	78	150	13	41,2	/	19,2	23,5	23,5	19,2	19,2
	TRr réaction 2 (min)	320	580	385		130	145	40	0	680	590	/	210	45	45	245	245
		380	640	385		130	145	40	0	695	605	/	270	105	105	305	305
	TRp réponse 2 (min)	0	280	645		0	140	65	240	215	105	/	225	145	145	555	555
		60	340	645		45	140	65	240	230	120	/	285	205	205	615	615
	Temps de montée crue 2 (min)	570	300	2025		280	100	260	320	/	2170	/	975	1480	1480	1300	1300

Figure 10. Synthèse des paramètres caractéristiques obtenus pour les deux plus grandes crues identifiées sur chaque bassin versant étudié (source : Petri, 2023, Annexe 7)

L'étude menée par L. Petri met également en évidence que les temps de réponse des BV (intervalle entre le moment où l'intensité de pluie est maximale et le celui où le débit est maximal, cf. Figure 10) sont très variables en fonction de l'événement et selon le BV, avec cependant une tendance, attendue, à l'augmentation du temps de réponse avec la taille du BV. Concernant les temps de réaction (intervalle entre le début de la pluie et l'augmentation du débit), les résultats sont peu concluants ; on retiendra cependant :

- Un temps de réaction instantané sur le BV de Valescure, ce qui est attendu vue la taille du BV (4 km²)
- Des temps de réaction qui restent très rapides, très souvent inférieurs à 2h pour les sous-BV amonts, pour la majeure partie des événements étudiés.

Ces différents éléments confirment le caractère « éclair » des crues observées sur les BV étudiés. Il ressort cependant que la structure du sous-sol (épaisseur de sol, et surtout nature des roches constitutives du substratum) pourrait expliquer une part de la variabilité inter-BV observée : mais ces éléments restent à approfondir. Notons également comme pistes d'approfondissement que ni la localisation des pluies ni l'influence de la forme du bassin versant n'ont été étudiées en détail. L'influence de la localisation des pluies est déjà ressortie comme nécessitant un approfondissement (notamment sur les « grands » BV du fait de la difficulté/nécessité de spatialiser les pluies mesurées ponctuellement) : ceci pourrait être réalisé en étudiant la répartition des précipitations au sein du BV pour chaque événement identifié. En ce qui concerne l'influence de la forme des BV, il est à noter qu'ils sont tous plutôt compacts (cf. Figure 8 et Annexe 7, p. 4-5 : indice de Gravelius pour chaque BV) ; ce paramètre, s'il est éventuellement peu pertinent pour les « grands » BV, représente peut-être une opportunité d'approfondissement intéressante pour les BV élémentaires et pourrait éventuellement bénéficier d'une compétence en interne à ESPACE sur le sujet (J. Douvinet).

Plus généralement, nous avons confirmé que les épisodes cévenols ou méditerranéens ont tendance à générer des événements intenses à l'automne, et mis en évidence l'importance des cumuls de pluviométrie depuis le mois d'août pour expliquer les événements les plus intenses (> débit cinquantennal). Le bassin des Gardons se démarque, avec des cumuls depuis le début de la saison et des intensités horaires plus élevées que les autres bassins versants de l'Ardèche, de la Bléone et du Gapeau.

3.2.2.2 Du point de vue sédimentaire

Les résultats obtenus sont très limités sur le périmètre cévenol, en raison de l'absence de crue sur la durée du projet, et notamment de crue morphogène. Cependant le travail d'instrumentation ayant été réalisé et venant compléter les dispositifs existants au sein du réseau OZCAR, les prochaines années permettront d'approfondir les réflexions engagées. Par ailleurs, la démarche d'intercomparaison des bassins étudiés a nécessité d'engager une réflexion sur le processus de spatialisation des données hétérogènes (modélisation théorique à l'échelle des BV, cf. section 3.3.2).

Rappelons rapidement les caractéristiques lithologiques des bassins versants étudiés (cf. Annexe 7, p. 4-5) :

- Basalte plutôt peu érodable sur la partie amont du bassin de l'Ardèche, marnes et calcaires à l'aval ;
- Cristallin (granite plutôt peu érodable et schistes) sur la partie amont des Gardons, sédimentaire à l'aval ;
- Marnes et calcaires particulièrement sensibles à l'érosion sur la Bléone ;
- Métamorphique (gneiss et schistes) sur le Gapeau.

En termes d'érodabilité, nous rappelons ici que les roches cristallines et volcaniques sont en général considérées comme relativement résistantes à l'érosion, les roches métamorphiques également, à l'exception des schistes. Les roches sédimentaires sont considérées comme plus sensibles à l'érosion, les marnes étant particulièrement érodables. Cette classification très qualitative connaît des variations spatiales (régionales, locales, liées à des conditions de mise en place différentes) qui rendent difficile une classification plus robuste ; mais cette trame d'analyse « *a priori* » est rappelée ici à titre indicatif pour faciliter l'interprétation des résultats.

Nous avons pu valider l'exploitation parallèle des chroniques issues de la BDOH et d'HydroPortail pour les séries temporelles des concentrations en MES (cf. section 3.2 du rapport de L. Petri en Annexe 7). Les résultats obtenus, bien que partiels puisque seulement sur les BV de l'Ardèche et de la Bléone, mettent en évidence des concentrations en matières en suspension 4 à 24 fois plus élevées pour le Galabre (BV de la Bléone), avec des valeurs maximales de l'ordre de 60 à 85 g/L, par rapport aux valeurs maximales obtenues sur le Gazel et la Claduègne (BV de l'Ardèche : maxima respectifs de 4 et 19 g/L sur des chroniques d'une dizaine d'années). Ceci confirme le fort potentiel d'export de MES dans le BV de la Bléone, et des exports de MES modérés pour le BV de l'Ardèche, en accord avec les sensibilités à l'érosion des lithologies dominantes sur ces BV

Les premières observations sur le BV des Gardons, ainsi que la modélisation théorique (GUSLE) suggèrent ainsi un potentiel d'export modéré de MES dans le domaine cévenol, qui, nous le rappelons, inclurait ici la fraction sableuse.

En l'état des connaissances acquises dans le cadre de ce projet, nous proposons donc l'hypothèse suivante : d'un point de vue sédimentaire, le domaine cévenol est caractérisé par des exports modérés de MES par rapport à d'autres BV (Bléone notamment) lors des crues ordinaires. Il n'est cependant pas exclu que des pics d'export (MES, sédiments grossiers) aient lieu lors des événements exceptionnels, comme ce fut le cas lors de l'épisode exceptionnel du 19 septembre 2020 sur l'amont des bassins versants du Gardon et de l'Hérault (Figure 11). La poursuite du monitoring de terrain dans les prochaines années devrait permettre d'apporter des éléments complémentaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.



Figure 11. Bassin versant de la Lieure, affluent du Garon de Saint-Jean Amont suite à la crue du 19/09/2020 – Cumul de pluie supérieur à 600 mm en 24h (Crédit photo : P.-A. Ayrat)

Notons également que les résultats préliminaires de piégeage de sédiments par le système GEACOS (gamme comprise entre 0,05 et 20 mm) lors de l'épisode du 11 au 14/03/2022 sur le Rieu confirment

le piégeage de la fraction sableuse (0,063 mm – 2 mm). Nous attendons de confirmer ces premiers résultats lors d'épisodes plus intenses.

Le projet DHySed-7 a aussi bénéficié des réflexions élaborées à l'IGE dans le cadre du projet ANR CLIMBAD, qui sont allées au-delà des seuls aspects prévus initialement dans le cadre du projet : un stage de M2 (T. de Almeida, cf. Annexe 9) a été mené au printemps 2023, encadré par C. Le Bouteiller et P. Choler, pour caractériser l'évolution de la végétation sur les terrains en érosion de Draix au cours des 40 dernières années. L'analyse d'images aériennes et satellite (Landsat) a mis en évidence une recolonisation de la végétation, avec l'extension des peuplements de résineux au détriment des zones de marnes nues sur cette période. Ces tendances ont été mises en relation avec les données climatiques et érosives de l'observatoire Draix-Bléone. L'augmentation de la biomasse semble corrélée avec un forçage climatique (précipitations et température moyenne). La méthodologie adoptée pourrait par la suite être étendue à d'autres sites, par exemple les Cévennes, pour tester si une évolution de la couverture végétale, éventuellement liée au changement climatique, pourrait impacter les exports sédimentaires dans le futur.

3.3 Base de données spatio-temporelles des données de pluie, débits et MES des bassins versants cévenols

Annexe 6 : Cartographie de l'aléa d'érosion dans le bassin versant de Saint-Jean du Gard, Cévennes – Application du modèle GUSLE (Geographical Universal Soil Loss Equation) (rapport Mathilde Delaire, ESPACE et Avignon Université, 2021)

Annexe 7 : Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes (rapport Lise Petri, ESPACE et ENSIL-ENSCI, 2023) – Et tout particulièrement l'annexe 7 de ce rapport qui reprend le travail de P.-A. Mannoni intitulé Régionalisation, cartes présentant les différents facteurs du modèle RUSLE.

Points clefs

- Intégration et gestion des données temporelles au sein de la BDOH, avec en complément production de DOI par paquet de données associées à des métadonnées spatiales téléchargeables sur le site de l'UMR ESPACE.
- Création d'une base de données pluies-débit-MES, événementielles de crue sur les bassins versants du Gardon, de l'Ardèche, de la Bléone et du Gapeau.
- *Workflow* sous ArcGIS permettant la production automatisée des modèles RUSLE et GUSLE, ce dernier ayant été proposé par D. Josselin et M. Delaire.

3.3.1 Les bases de données

Les travaux de L. Petri (2023 : Annexe 7) ont permis de constituer une base de données pluie-débit et flux de MES sur 4 bassins versants à partir d'extraction sur BDOH (le SNO OHM-CV, le SNO Draix-Bléone et l'ORE Réal Collobrier) et Hydroportail. Sur cette base de données une sélection d'événements a pu être constituée et analysée (L. Petri, 2023).

Ce travail a également été l'occasion de finaliser la bancarisation des données du site d'observation du Mont Lozère (ORE OHM-CV) avec la production de plusieurs jeux de données et l'attribution d'un DOI

associé. Le Tableau 6 propose une synthèse des DOI déposés (la liste des DOI est donnée en section 6 de ce rapport).

Tableau 6. DOI du Mont Lozère

Stations	Paramètres
La Vialasse (depuis 1981)	Insolation, températures, pluviométrie
Goudesche (1988-2005)	Hauteur d'eau et débit
La Cloutasse (depuis 1981)	Hauteur d'eau et débit
Jouc (1998 -2001)	Hauteur d'eau et débit
Baraquette (depuis 1998)	Hauteur d'eau et débit
La Latte (depuis 1981)	Hauteur d'eau et débit
La Sapine (depuis 1981)	Hauteur d'eau et débit

Ce travail de bancarisation et de mise à disposition des données va se poursuivre en intégrant le site de Valescure et en suivant les recommandations de l'infrastructure de recherche OZCAR. Un Plan de Gestion de Données est en cours de rédaction à l'échelle des SNO OHM-CV et Draix-Bléone ce qui permettra notamment de définir la stratégie de production de jeu de données pour la plateforme Théia-OZCAR et la production associée de DOI.

3.3.2 Production automatisée des modèles RUSLE et GUSLE

Une base de données a été constituée de manière à mettre en place le modèle GUSLE ainsi que la variante GUSLE. Ce qui différencie les deux modèles est que RUSLE est un modèle multiplicatif de quantification érosive : il suffit qu'un des facteurs soit nul pour qu'il n'y ait aucun risque. Le modèle GUSLE est un modèle de potentiel qui additionne les facteurs pondérés et normalisés : même si un des facteurs est nul, on estime le risque en amont. Ces deux modèles sont complémentaires. Cette base de données a été dans un premier temps constituée sur les Cévennes par M. Delaire (2021 : Annexe 6) avec des données sur la topographie, l'occupation du sol, la lithologie et les précipitations (Figure 12).

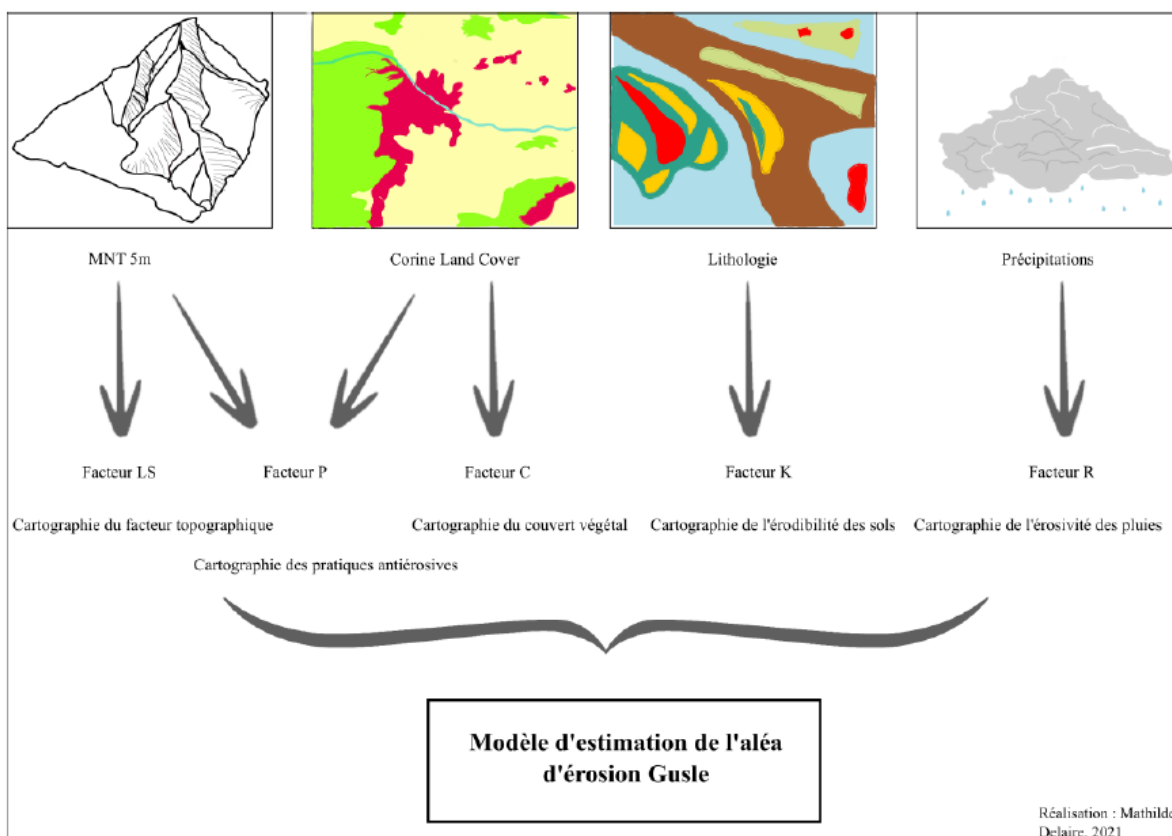


Figure 12. Utilisation des données par le modèle GUSLE (M. Delaire, 2021 : Annexe 6)

P.-A. Mannoni a élargi la base de données aux bassins versants de l'Ardèche (en amont de Ruoms), de le Bléone et du Gapeau et automatisé la mise en œuvre des modèles RUSLE et GUSLE grâce à l'application *ModelBuilder* d'ArcGIS.

3.3.3 Analyses de robustesse sur les chroniques de données

Annexe 10 : Analyses de robustesse sur les chroniques de données et guide méthodologique pour accompagner la robustesse des modélisations en hydrologie (rapport Didier Josselin, ESPACE, 2023)

Un travail a été mené pour évaluer la robustesse des chroniques de hauteurs d'eau, débits et concentration en MES disponibles sur le périmètre cévenol (BDOH et HydroPortail). Ce travail, réalisé dans un premier temps pour l'EPTB Gardons, a mis en évidence l'impossibilité d'exploiter les données sans avoir au préalable mené une phase de critique des données brutes par un personnel qualifié et connaissant le terrain d'étude. En effet lorsqu'on travaille sur des cours d'eau où le transport sédimentaire n'est pas négligeable, la réactualisation très régulière des courbes de tarage (en lien avec les phénomènes de détarage) est indispensable pour que les données hydrologiques (hauteurs d'eau, puis débits) aient une signification. Par ailleurs, il a été montré que l'estimation des faibles débits (et donc des MES qui y sont associées) reste très incertaine, tant une erreur de mesure sur la courbe de tarage, même petite, peut impacter les résultats. Sous une autre forme, cela est vrai également pour les débits de crue, mesurés plus rarement et pour lesquels toute erreur de la courbe peut avoir une conséquence démesurée sur l'estimation des volumes d'eau.

Le travail préliminaire sur la robustesse des chroniques a réaffirmé que :

- Dans les Cévennes, une réactualisation des courbes de tarage aux stations de mesure de hauteurs d'eau doit avoir lieu avec une fréquence *a minima* annuelle, et plus en cas d'événement morphogène (seuil exact à déterminer pour chaque station : travail à mener)
- Cela est d'autant plus vrai lorsque l'on veut étudier les débits faibles ou moyens, où toute variation d'étalonnage de la courbe de tarage peut induire une variation significative de l'estimation du débit, qui est en lien direct avec les phénomènes d'érosion étudiés.
- Il faut nuancer toutefois la critique des estimations des débits en précisant que, dans une série de valeurs estimées de débit par un ensemble de jaugeages, toutes les valeurs ne se « valent pas » en termes de qualité ; il ne s'agit pas que de leur qualité numérique, mais aussi où elles se situent dans la distribution statistique des relevés ; des valeurs isolées, si elles sont erronées, généreront davantage d'erreur de mesure dans la courbe de tarage que si elles sont « entourées » par d'autres relevés permettant, par effet de proximité, de mieux « solidifier » l'estimation.
- Une procédure doit donc être établie dans le cadre de la bancarisation BDOH pour les stations gérées par ESPACE pour s'assurer que les données consultables sont les plus valides possible et fournir les indicateurs de qualité nécessaires à leur exploitation. Cela est déjà partiellement fait via un qualificatif très général de qualité. À ce titre, le projet DHySed-7 a permis de révéler l'intérêt de ce point d'amélioration des procédures internes à ESPACE. Cette procédure intègre déjà *a minima* une vérification/complétion/estimation des données erronées ou manquantes, et surtout une étape de validation de la qualité des données (courbe de tarage valide ou non). Les données sont ainsi qualifiées de valide (*v*) ou de douteuses (*d*) et les valeurs réévaluées sont également tracées (*e*) tout comme les lacunes (*l*). Dans la suite de cette démarche sur la robustesse des chroniques, et dans le cadre de la labellisation OZCAR des sites cévenols, un chantier d'alignement sur une procédure européenne de qualité va commencer dans les prochains mois.

Sur la base des résultats obtenus dans ce projet, nous proposons en annexe une approche plus détaillée de la robustesse sur de petits échantillons. Elle a été construite en mettant en relation le débit et les MES de deux séries de mesures du Claduègne et du Galabre. Elle repose sur une double approche d'évaluation de la qualité et de la robustesse des données, qui est synthétisée dans le schéma présenté en Figure 13 et développé en Annexe 10. Cela constitue notre proposition méthodologique pour l'amélioration des modèles hydrologiques basés sur de petits échantillons. Sa faisabilité pourra être testée concrètement sur des campagnes terrain à venir.

La poursuite des réflexions sur la notion de sensibilité et de robustesse est également alimentée par la mise en place de capteurs *low cost* dans le cadre du projet : une évaluation de la précision des données obtenues, leur gamme de validité par rapport aux instruments plus onéreux, devra être menée dès lors que les chroniques acquises seront suffisamment longues (à l'heure de la rédaction de ce rapport, nous sommes toujours en attente d'événements morphogènes).

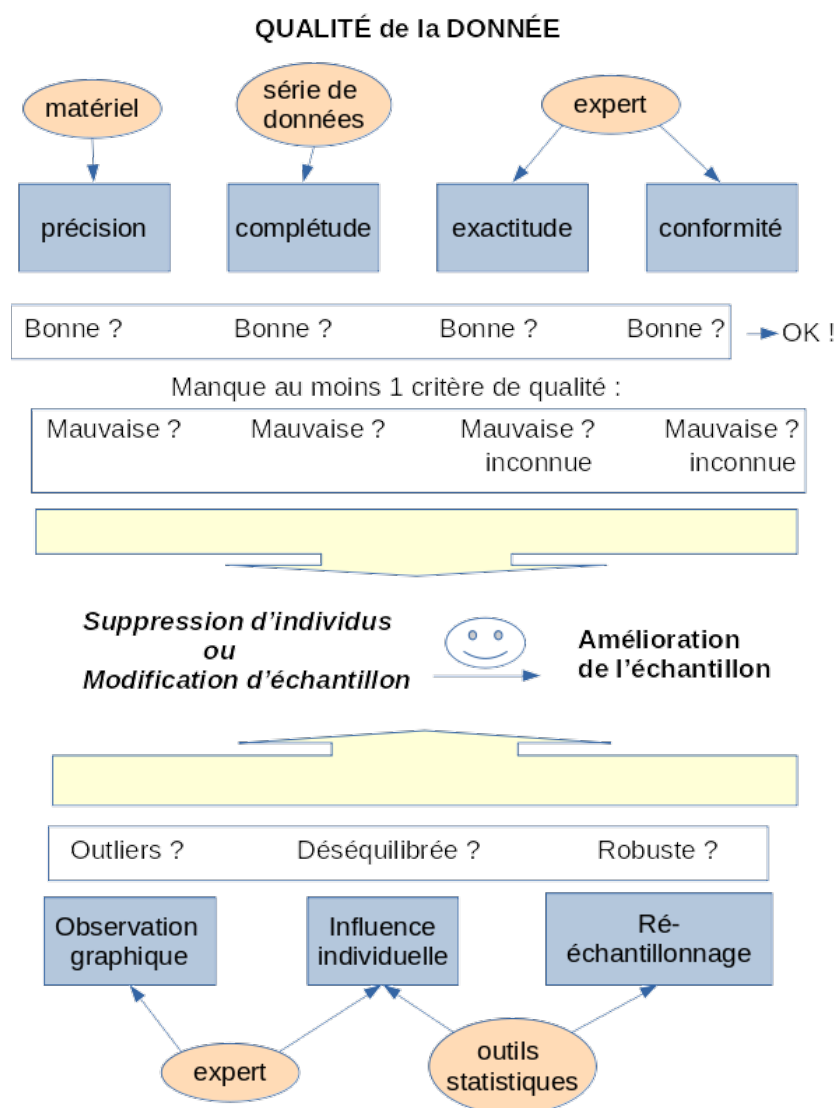


Figure 13. Indicateurs croisés de qualité et de robustesse des données de petits échantillons

En complément à ce travail mené dans le cadre de DHySed-7, un travail a récemment été mené sur l'estimation de l'incertitude des mesures hydrosédimentaires du site de Draix (SNO Draix-Bléone) : dans le cadre de la rédaction d'un *data paper* (Klotz, et al. 2023), l'estimation qualitative de la qualité de la donnée (« bonne », « douteuse », « lacune ») a été complétée par une estimation quantitative des incertitudes associées à cette donnée. Ces éléments de réflexions serviront à alimenter la réflexion menée sur l'antenne cévenole d'ESPACE.

3.4 Recommandations à destination de différents observatoires travaillant avec des données hydrologiques et relatives aux MES

Dans ce projet, nous avons tenté de croiser les connaissances « SHS » et celles concernant le volet « processus » des flux hydro-sédimentaires. Il faut cependant noter que nous sommes face au problème d'un stade de connaissances atteint qui est différent sur chaque bassin versant (i.e. le volet

« SHS » est plus développé sur le BV des Gardons, mais le volet instrumentation hydrologique et MES y est moins avancé que sur le BV de la Bléone). Cela met en évidence :

- D'une part l'intérêt d'une démarche de « rattrapage / *top-up* » sur chaque volet pour chaque BV étudié dans le cadre de ce projet, d'où l'intérêt de poursuivre la démarche du projet dans les prochaines années.
- D'autre part cela explique en partie la difficulté à faire du lien entre les équipes du projet sur certains volets du projet : cette difficulté avait été anticipée dès le début du projet, d'où une démarche construite de partage de savoir-faire ; mais à l'issue du projet, nous constatons qu'elle n'a pas pu être totalement remédiée malgré une appropriation forte du projet par les différentes parties.

Pour le SNO Draix-Bléone, ce projet a été l'occasion d'engager une réflexion sur la mise en œuvre d'approches SHS autour de la thématique des flux de sédiments. Un des enjeux forts liés à ces flux de sédiments fins est celui du remplissage des ouvrages hydrauliques à l'aval, qui a justifié de nombreux projets en collaboration avec EDF par le passé. Par contre, les autres usages et enjeux sociétaux liés aux sédiments dans le bassin versant de la Bléone ont été peu abordés. La méthodologie proposée par le projet DHySed-7 pourrait donc être déployée sur cet observatoire pour mieux caractériser tous ces usages, grâce aux collaborations établies dans le projet avec des spécialistes de ces approches. Ceci permettrait aussi de réfléchir à l'impact d'une évolution attendue de ces flux de sédiments (augmentation ou diminution ?) dans un contexte de changement climatique (Ariagno, et al. 2022).

Plus généralement, les différents observatoires qui travaillent avec des données hydrologiques et/ou relatives aux MES pourront trouver dans ce rapport certains éléments méthodologiques concernant notamment :

- La mise en œuvre d'une frise chrono-systémique sur leur BV ; nous préconisons d'ailleurs ce type de démarche pour une meilleure prise en compte des dynamiques temporelles et des visualisations des interactions entre les composantes de certains « objets de recherche » dans les territoires d'étude, et en premier lieu sur les BV de l'Ardèche, du Gapeau et de la Bléone ;
- Des pistes pour l'instrumentation *low cost* concernant la mesure de hauteurs d'eau, les flux de MES (GEACOS, échelles à bouteilles) et le suivi de la charge grossière (pièges photo). Noter que l'instrumentation *low cost* nécessite encore d'être validée : nous attendons encore d'observer des crues significatives sur les BV. Cette étape de validation/pertinence des dispositifs *low cost* sera développée conjointement avec les observatoires impliqués dans le projet (SNO OHM-CV, SNO Draix-Bléone).
- L'approche de modélisation spatiale concernant l'érosion sur les BV (modèles RUSLE et GUSLE) présente des limites à son stade de développement actuel, et ne saurait être transférable telle quelle auprès de gestionnaires ; elle permet cependant 1/ une intercomparaison de BV, 2/ une appropriation globale des caractéristiques de chaque territoire concernant l'érosion et 3/ une estimation ordinale du risque binaire (modèle RUSLE) ou du potentiel (GUSLE) d'érosion sur des bassins versants qui peuvent être de grande taille.

Les notions d'incertitude, de qualité et de robustesse sur des chroniques de données, et en particulier sur des données hydrologiques permettent d'apporter un regard critique et averti sur les sorties des modèles (courbes de tarage, relation MES/débit). Un guide méthodologique croisant qualité et robustesse pour accompagner la modélisation en hydrologie, spécifiquement sur des petits échantillons, est proposé. Parmi les propositions, certaines peuvent être complexes à mettre en œuvre et une sélection des critères pertinents et simples pourra être effectuée.

3.5 Valorisation, diffusion et transfert des résultats auprès des acteurs scientifiques et des praticiens

L'ensemble des participants au projet, tant scientifiques qu'opérationnels, est convaincu de l'intérêt de poursuivre et d'harmoniser le suivi hydro-sédimentaire sur les BV étudiés (Gardons, Ardèche, Gapeau, Bléone) : la démarche du projet DHySed-7 reste d'actualité, et s'intègre parfaitement dans les démarches entreprises au niveau eLter et OZCAR (cf. section 2.1).

Les différentes valorisations issues du projet sont reprises ci-après :

- Journées organisées en relation avec les 50 ans du Parc des Cévennes (24 et 25/09/2020) : « Retour sur 40 ans de travaux scientifiques en Cévennes » (<https://umrespace.hypotheses.org/1446>). Cet événement a été l'occasion pour l'équipe scientifique du site cévenol de l'UMR ESPACE de présenter à la fois les projets de recherche passés, en cours et ceux en devenir, en lien avec leurs partenaires sur le territoire (Parc National des Cévennes et l'eau, OZCAR, OHMCV, ZABR, EPTB Gardons, AB Cèze), et a donné lieu à une visite de terrain sur les BV du Mont Lozère. Il a été, plus particulièrement, l'occasion pour les représentants des différents partenaires du projet DHySed-7 (IMT Mines Alès, IGE, Inrae, ESPACE) de se rencontrer en présentiel.
- Séminaires, conférences :
 - un résumé, soumis et accepté à la conférence de la SHF (juin 2023 : (Aprin, et al. 2023)), n'a malheureusement pas pu aller jusqu'à la communication correspondante, mais cela devrait avoir lieu lors de la conférence de l'AFGP organisée par ESPACE en janvier 2024
 - une communication a eu lieu dans le cadre du workshop « Écrire l'Histoire des Interactions Climat-Société des Alpes à la Méditerranée » organisé au CEREGE les 21 et 22 nov. 2023 (Chapuis 2023).
- Interactions avec les gestionnaires et usagers (y compris via les questionnaires) : des « Journées croisées gestionnaires-chercheurs » sont prévues pour mars 2024 dans le cadre du site atelier rivières cévenoles (organisation ESPACE). Plus généralement, dans le cadre des activités de l'EPTB Gardons, sont organisées, tous les un à deux ans, une journée d'information à destination des syndicats AB Cèze et Gardons. La fin du projet DHySed-7 pourrait être l'occasion d'élargir cette journée à d'autres opérationnels.
- Echanges de savoir-faire : réunions entre partenaires
 - On mentionnera en particulier que plusieurs membres du projet DHySed-7 ont participé à la réunion du GIS Draix en 2021 (5-6 juillet 2021), avec notamment une présentation de C. Imbert sur l'instrumentation mise en place au cours de son stage dans les Cévennes (cf. Annexe 4) qui a donné lieu à de riches échanges entre l'ensemble des participants du GIS Draix, notamment en ce qui concerne les choix d'instrumentation, l'investissement en temps nécessaire à l'acquisition et au traitement des différents types de données, etc.
 - les ateliers OZCAR sur les transferts particuliers ont été l'occasion de réflexions méthodologiques, notamment pour l'équipe grenobloise, réflexions dont elle a ensuite fait profiter l'équipe d'ESPACE (transfert de connaissances entre acteurs scientifiques).
- Les questionnements opérationnels qui avaient été identifiés au début du projet (cf. Annexe 1) ont sous-tendu les recherches menées tout au long du projet, et seront pour certains élargis à d'autres thématiques au-delà de la durée du projet (impact du changement climatique sur le transport sédimentaire : AFGP 2024...).

- Partage d'information autour de l'outil frise chrono-systémique : nous prévoyons l'élaboration d'un document de synthèse pour la ZABR (incluant les apports des projets DHySed-7 et HydroPop), par exemple sous la forme d'un atelier ou d'un guide méthodologique (prévu 2024). Notons également le projet d'école d'été en 2026 sur le site rivières cévenoles, où la notion de flux hydro-sédimentaires sera abordée. Ce sera l'occasion de bénéficier du leadership de V. Wendling, récemment recruté au sein de l'IMT Mines Alès et qui travaille sur ce même périmètre thématique et géographique.

Deux *data papers* (Legout, et al. 2021) et (Klotz, et al. 2023)) ont été récemment publiés pour présenter les données hydrosédimentaires du SNO Draix-Bléone. Même s'ils ne sont pas uniquement issus du projet DHySed-7, ils s'inscrivent dans la dynamique du partage de savoir-faire et de méthodologies entre observatoires suscitée par ce projet.

Par ailleurs, le projet DHySed-7 a constitué un levier, tant pour le travail en équipe entre différents partenaires qu'au sein d'une même équipe : citons par exemple l'événement MarAlex organisé à l'été 2023 qui a mobilisé plusieurs membres d'ESPACE et d'Inrae : <https://umrespace.hypotheses.org/3128> et <https://www.umrespace.org/2023-maralex-les-bassins-versants-maralpins-face-au-changement-tempeste-alex-changement-climatique-et-pressions-anthropiques/>.

Au-delà de la poursuite des travaux entrepris en collaboration entre les partenaires du projet, nous pouvons noter les projets en devenir suivants :

- thèse « *Dynamiques des milieux semi-naturels et ressource en eau : quels impacts et quelles pratiques pour une gestion adaptée dans le contexte du changement climatique en milieu méditerranéen ?* », encadrement M. Vignal et D. Josselin, et qui a commencé en déc. 2023 : <https://www.umrespace.org/actualite/safae-jourani-dynamiques-des-milieux-semi-naturels-et-ressource-en-eau-quels-impacts-et-queelles-pratiques-pour-une-gestion-adaptee-dans-le-contexte-du-changement-climatique-en-milieu-medite/>
- poursuite du travail « SHS » de J. Cerceau et N. Dubus, en lien avec P.-A. Ayral :
 - Pertinence de l'approche conceptuelle par les hybrides
 - Enjeux méthodologiques de la visibilisation du sédiment.

4 Perspectives scientifiques et opérationnelles

L'objectif initial du projet DHySed-7 était de lancer la réflexion autour des dynamiques sédimentaires en Cévennes, d'abord sur le volet érosion/MES puis pour lancer le volet charge de fond. Il s'agissait donc d'une approche exploratoire, qui visait également à développer l'échange de données et de savoir-faire au sein du réseau OZCAR.

En termes d'échanges de données et de savoir-faire, le projet a pleinement atteint ses objectifs : l'échange de données n'a posé aucun problème grâce aux politiques actives de diffusion des données des entités productrices sur les plateformes déjà existantes (effort de bancarisation des données ESPACE sur la BDOH notamment, qui a pu bénéficier de la dynamique insufflée par le projet). De nouvelles dynamiques de collaborations ont émergé (prenons par exemple le volet « SHS », avec une collaboration forte en IMT Mines Alès et ESPACE-Grenoble), et des échanges de savoir-faire se sont renforcés (par exemple entre le SNO OHM-CV et ESPACE).

Du point de vue de l'analyse historique et sociologique de l'hybridation des sédiments et des activités anthropiques, les résultats des analyses menées dans le cadre du projet convergent **vers un renouvellement nécessaire du rapport aux sédiments en Cévennes** :

- **Bousculer le rapport aux sédiments** : les enquêtes menées localement témoignent d'un rapport d'ignorance, d'indifférence ou au contraire de conflits avec les atterrissements qui s'expliquent en partie par :
 - L'influence des opérations menées entre les années 1960 et 1990 ;
 - L'assimilation des sédiments au risque d'inondation ;
 - Le glissement de référentiel tendant à considérer comme normal l'appauvrissement en sédiments des cours d'eau.

Ces résultats militent en faveur de l'intérêt à poursuivre :

- **L'étude des trajectoires socio-hydrologiques**, afin d'améliorer la compréhension des processus et facteurs clés qui, dans l'histoire du rapport au cours d'eau, conditionnent la façon dont les acteurs locaux se positionnent par rapport à la gestion des sédiments ;
 - Le développement de **recherche participative participant à la visibilité des sédiments**, auprès des habitants afin de renouer avec la pertinence socio-hydrologique et écosystémiques des sédiments pour la bonne santé des cours d'eau.
- **Renouer avec l'agencité de la rivière dans le transport sédimentaire** : en réponse à l'appauvrissement sédimentaire de certaines sections des Gardons, les enquêtes menées rendent compte d'une diversité de scénario d'intervention sur le transport sédimentaire, de l'absence d'intervention (recharge naturelle et progressive du lit à très long terme) aux actions de recharge sédimentaire. Il est à noter que la restauration par la non-intervention n'est plus considérée comme un échec, et surtout, cette notion de non-intervention devient peut-être plus acceptable par les territoires : ne pas intervenir, c'est adopter la temporalité des graviers et « respecter le rythme de la rivière », en lui laissant les moyens de retrouver un équilibre dynamique. Autrement dit, cela implique de repenser la temporalité des programmes

d'aménagement (souvent calquée sur le temps politique) et d'accepter celle des dynamiques hydrosédimentaires.

Ce projet exploratoire n'avait pas immédiatement vocation à définir une typologie du(des) contexte(s) de restauration dans les Cévennes. A ce titre, le volet « SHS » du projet, beaucoup plus conséquent que prévu initialement, a permis de faire émerger certains éléments de réflexion qui sont pris comme acquis sur d'autres territoires (par exemple la notion de restauration par la non-intervention) et qui mériteraient d'être approfondis. Mais ce volet « SHS » n'a, en fait, pas encore eu le temps de développer pleinement sa dimension d'« intercomparaison » entre bassins versants qui lui permettrait de cadrer plus finement ses résultats dans le temps et dans l'espace : par exemple en précisant les cas de figure auxquels faire référence pour illustrer des cas où la non-intervention est la seule option « raisonnable » au vu des altérations irréversibles du système à échelle humaine suite aux extractions vs. des situations où le potentiel de récupération du système est perçu comme bon/rapide, y compris sans intervention humaine ; ou encore en précisant ce qu'on entend exactement par très « long terme ».

L'approche exploratoire qui sous-tend le projet a permis de déployer de nouveaux instruments *low cost* sur le périmètre cévenol : leur validation devra attendre l'occurrence de crues, mais la réflexion engagée a permis de poser les bases d'une nouvelle phase de monitoring de terrain dans les Cévennes : en maintenant le dispositif de suivi hydrologique (hautes eaux, basses eaux), et en renforçant la dimension sédimentaire (MES, charge grossière). Le dispositif de suivi a vocation à être pérenne puisqu'il est intégré aux infrastructures de recherche OZCAR et à la démarche eLTER.

Du point de vue de l'analyse pluies-débits-érosion-MES, plusieurs perspectives d'approfondissement sont possibles :

- Recibler d'autres événements de crue significatifs sur les BV de la Bléone et du Gapeau, pour être certains de travailler sur des événements exceptionnels
- Rendre plus robuste l'analyse des temps de réaction et de réponse des BV
- En ce qui concerne la modélisation spatiale de l'érosion, intégrer une dimension temporelle à l'analyse, en prenant en compte les chroniques de pluie-débit disponibles sur l'ensemble des 4 bassins versant étudiés.

En parallèle à ces travaux, une recherche sur l'évolution des pratiques de prélèvement et d'aménagement liées au transport solide et services écosystémiques associés sur les bassins versants cévenols a été mise en œuvre (cf. Annexe 2 et Annexe 3) et est actuellement déployée sur les 3 autres bassins versants. Cette approche viendra compléter celle présentée ici pour dégager (ou pas) les spécificités des flux hydro-sédimentaires en Cévennes.

Enfin, les objectifs long terme énoncés lors du dépôt du projet DHySed-7 restent d'actualité :

- Evaluer les potentiels impacts des flux sédimentaires sur la biocénose à l'échelle des BV cévenols ;
- Evaluer les impacts du changement climatique sur les dynamiques hydro-sédimentaires dans les bassins cévenols.

A contrario, il nous semble que l'approche spatiale, très exploratoire, menée dans le cadre de ce projet (cf. Figure 9, Annexe 6, Annexe 7), bien que très intéressante au stade de l'état des connaissances de

sa mise en œuvre, atteigne ses limites sur les bassins versants étudiés. Aller plus loin dans ces approches spatiales demanderait un effort conséquent pour permettre une comparaison inter-BV plus pertinente et robuste. Or, si cet axe de travail devait émerger, il devrait faire l'objet d'un travail de thèse. Bien qu'intéressant dans l'absolu, il ne nous semble pas, à l'heure actuelle, que cet axe soit prioritaire sur le périmètre d'étude (bassins des Gardons, Ardèche, Gapeau et Bléone).

À l'heure où un dialogue sur l'eau s'installe sous de multiples formes en Cévennes, il paraît absolument nécessaire que le regard croisé et territorialisé développé dans ce projet de recherche sur les sédiments puisse accompagner les discussions engagées sur ce territoire.

5 Bibliographie

- Aprin, Laurent, et al. « Dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes (France): approches expérimentales et théoriques » *Colloque SHF "Apports des nouvelles technologies à l'étude du transport sédimentaire et de la morphodynamique"*. Grenoble : Société Hydrotechnique de France, 2023.
- Ariagno, C., Le Bouteiller, C., van der Beek, P., and Klotz, S.: Sediment export in marly badland catchments modulated by frost-cracking intensity, Draix-Bléone Critical Zone Observatory, SE France, *Earth Surf. Dynam.*, vol. 10, 2022: 81–96, <https://doi.org/10.5194/esurf-10-81-2022>
- Benard, H., Ayrat, P.-A., Bailly, J.-S., Boudevillain, B., Champollion, C., et al.. LTSE platform P3M: Mediterranean Plain, Piedmont and Plateau. *IAHS - AISH Scientific Assembly 2022*, May 2022, Montpellier, France. <https://hal.inrae.fr/hal-03752134>
- Braud, I., Ka, O., Ayrat, P.-A., Blanchouin, A., Boithias, L., et al.. Use of hydrological signatures to characterize the hydrological functioning of catchments from the OZCAR French Critical Zone. *1st OZCAR-TERENO International Conference*, Oct 2021, Strasbourg, France. <https://hal.science/hal-03412247>
- Chapuis, M. « Les flux hydro-sédimentaires, un proxy des interactions climat-société à l'échelle d'un bassin versant » *Workshop "Écrire l'Histoire des Interactions Climat-Société des Alpes à la Méditerranée"*, journées d'étude Climat-Société. Aix-en-Provence, 2023.
- Ghosal, K., et S. Das Bhattacharya. « A review of RUSLE Model » *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 48, 2020: 689–707.
- Hoaglin, C., Mosteller, F., Tukey, J. W., 1983, *Understanding robust and exploratory data analysis*, Wiley, NY.
- Josselin, D., 2010. Robustesse en analyse spatiale. Essai. Habilitation à Diriger des Recherches. Avignon Université
- Klotz, S., Le Bouteiller, C., Mathys, N., Fontaine, F., Ravanat, X., Olivier, J.-E., Liébault, F., Jantzi, H., Coulmeau, P., Richard, D., Cambon, J.-P., and Meunier, M.: A high-frequency, long-term data set of hydrology and sediment yield: the alpine badland catchments of Draix-Bléone Observatory, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, 2023: 4371–4388, <https://doi.org/10.5194/essd-15-4371-2023>
- Legout, C., Freche, G., Biron, R., Esteves, M., Navratil, O., Nord, G., Uber, M., Grangeon, T., Hachgenei, N., Boudevillain, B., Voiron, C., Spadini, L., A critical zone observatory dedicated to suspended sediment transport: the meso-scale Galabre catchment (southern French Alps). *Hydrological Processes*, vol. 35(3): e14084, <https://doi.org/10.1002/hyp.14084>
- Renard, K. G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. « Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) » 404 pp. United States Department of Agriculture, Handbook No. 703, 1997.

6 DOI

- Jean-François DIDON-LESCOT, Jean-Marc DOMERGUE, Yves PELLEQUER & Nadine GRARD, Durée journalière d'insolation à la station de La Vialasse (Mont Lozère) de 1985 à 2019 - Série temporelle météorologique et métadonnées – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-110220-1-1>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Jean-Marc DOMERGUE, Yves PELLEQUER & Nadine GRARD, Relevé journalier de température sous abri à la station de La Vialasse (Mont Lozère) de 1981 à 2019 - Série temporelle météorologique et métadonnées – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-110220-1-2>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Jean-Marc DOMERGUE, Yves PELLEQUER & Nadine GRARD, Quantité journalière de pluie à la station de La Vialasse (Mont Lozère) de 1981 à 2019 - Série temporelle météorologique et métadonnées – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-110220-1-3>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de Goudesche entre 1998 et 2005 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-200420-1-4>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de La Cloutasse entre 1981 et 2020 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-210420-1-5>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de Jouc entre 1998 et 2001 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-070520-1-6>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de la Baraquette entre 1998 et 2020 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-070520-1-7>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de la Latte entre 1981 et 1999 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-070520-1-8>, licence CC-BY-NC 4.0
- Jean-François DIDON-LESCOT, Claude MARTIN, Jean-Marc DOMERGUE & Nadine GRARD, Hauteur et débit d'eau à la station de la Sapine entre 1981 et 2019 - Série temporelle hydrologique et méta-données – UMR ESPACE 7300, OHM-CV, OZCAR, <https://doi.org/10.18713/datab-070520-1-9>, licence CC-BY-NC 4.0

7 Annexes

Annexe 1 : Descriptif du projet déposé.....	6
Annexe 2 : Monographie historique du transport sédimentaire en Cévennes : une approche par les hybrides (rapport Ghita Serrhini Naji, IMT Mines Alès et UTC, 2021)	15
Annexe 3 : Enquête sur les différents rôles du sédiment dans les modes d’habiter des bassins versants méditerranéens (rapport Louise Dekeyser, ESPACE/IMT Mines Alès et UPJV, 2023)	15
Annexe 4 : Méthodes de mesure des Matières En Suspension (MES) et de la charge solide des cours d’eau cévenols – Stratégies expérimentales (rapport Camille Imbert, ESPACE et USMB, 2021)	21
Annexe 5 : Vers le suivi des sédiments grossiers sur les cours d’eau cévenols (rapport Mathieu Brun, IMT Mines Alès et UGA, 2022)	21
Annexe 6 : Cartographie de l’aléa d’érosion dans le bassin versant de Saint-Jean du Gard, Cévennes – Application du modèle GUSLE (Geographical Universal Soil Loss Equation) (rapport Mathilde Delaire, ESPACE et Avignon Université, 2021).....	21
Annexe 7 : Identification des spécificités des dynamiques hydro-sédimentaires dans les Cévennes (rapport Lise Petri, ESPACE et ENSIL-ENSCI, 2023).....	21
Annexe 8 : Comparaison des dynamiques hydro-sédimentaires pour une grande diversité de bassins versants (rapport Fabien Seve, IGE et ENGEES, 2021)	21
Annexe 9 : Dynamique de végétation dans les bassins de Draix depuis les 40 dernières années (rapport Thomas De Almeida, Inrae et UPEC, 2023).....	21
Annexe 10 : Analyses de robustesse sur les chroniques de données et guide méthodologique pour accompagner la robustesse des modélisations en hydrologie (rapport Didier Josselin, ESPACE, 2023)	29

Ces annexes sont disponibles dans un volume à part, disponible sur HAL :

<https://hal.science/hal-04360856>