

Parc naturel régional des Grands Causses

71 boulevard de l'Ayrolle
BP 50126
12101 MILLAU cedex
Tel : 05.65.61.35.50
Fax : 05.65.61.34.80



Avec le soutien de :

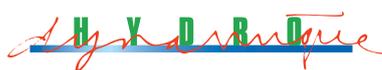


Phase 1

Etat des lieux et diagnostic

Rapport final

Octobre 2011



DYNAMIQUE HYDRO
18, Avenue Charles De Gaulle
69370 Saint Didier au Mont d'Or
Tel-Fax : 04.78.83.68.89
contact@dynamiquehydro.fr
www.dynamiquehydro.fr



CALLIGEE Sud Ouest
Le Prologue 2 - BP 2717
31312 Labège cedex
Tel : 05.62.24.36.97
Fax : 05.61.39.07.28
toulouse@calligee.fr



HYDRETUDES-Agence de Toulouse
20, Boulevard de Thibaud
31100 Toulouse
Tel : 05.62.14.07.43 - Fax : 05.62.14.08.95
contact-toulouse@hydretudes.com
www.hydretudes.com

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	3
INTRODUCTION	7
ANALYSE DIACHRONIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS.....	9
1- <i>Méthodologie</i>	9
1- <i>Evolution des surfaces</i>	9
1.1- Occupation des sols à l'échelle du bassin versant.....	9
1.2- Occupation des sols à l'échelle des sous-bassins	10
1.3- Distribution spatiale des évolutions	11
1.4- Informations complémentaires.....	12
2- <i>Evolution des haies</i>	13
2.1- Densité des haies à l'échelle du bassin versant.....	13
2.2- Densité des haies à l'échelle des sous-bassins	15
3- <i>Synthèse et implications hydrologiques et géomorphologiques</i>	15
ETAT DES LIEUX ET DIAGNOSTIC GEOMORPHOLOGIQUE	17
1- <i>Sectorisation des branches principales du réseau hydrographique</i>	17
2- <i>Inventaire réalisé sur les branches principales du réseau hydrographique et analyses thématiques</i>	20
2.1- Méthode d'inventaire et parcours effectué	20
2.2- Fourniture sédimentaire	20
2.2.1- Transformation des données brutes	20
2.2.2- Analyse globale à l'échelle du bassin versant.....	21
2.2.3- Distribution spatiale des formes d'érosions	23
2.3- Transit sédimentaire	25
2.3.1- Granulométrie des sédiments	25
2.3.2- Inventaire des atterrissements.....	27
2.4- Embâcles et bois mort.....	30
2.5- Mobilité latérale.....	31
2.5.1- Evolution diachronique des tracés	31
2.5.2- Stabilité actuelle des berges.....	31
3- <i>Ensemblement</i>	33
3.1- Etat des lieux	33
3.1.1- Méthode.....	33
3.1.2- Résultats.....	34
3.2- Analyses exploratoires des causes de l'ensemblement.....	35
3.2.1- Erosion des sols	35
3.2.1.1- Présentation préalable des facteurs contrôlant l'érosion des sols	35
3.2.1.2- Disponibilité des données sur le bassin versant de la Muse	36
3.2.1.3- Modèle d'érosion établi : paramètres retenus pour la modélisation	36
3.2.1.4- Principe de la modélisation	38
3.2.1.5- Résultats.....	40
3.2.2- Analyses statistiques multi-paramètres	41
3.2.2.1- Corrélations simples entre et les caractéristiques des affluents et leur ensemblement	42
3.2.2.2- Corrélations multiples ou complexes.....	44
3.2.2.3- Bilan sur l'approche statistique.....	46
3.2.3- Problématique des avens	46

ETUDE HYDROLOGIQUE.....	49
1- <i>Caractéristiques hydrométéorologiques du bassin versant.....</i>	49
1.1- Régime hydrologique	49
1.2- Pluviométrie locale.....	50
1.2.1- Recueil des données pluviométriques.....	50
1.2.2- Analyse des pluies annuelles et journalières.....	50
1.3- Données Pluviométriques à faible pas de temps	51
1.4- Hydrologie de crue	51
1.4.1- Analyse des données au droit de la station de St Hippolyte	51
1.4.2- Utilisation des formules empiriques ou semi-empiriques.....	52
1.4.2.1- Détermination du débit décennal.....	52
1.4.2.2- Détermination du débit centennal.....	52
2- <i>Evolution du fonctionnement hydrologique du bassin versant.....</i>	53
2.1- Influence de l'occupation des sols sur le ruissellement	53
2.1.1- A l'échelle du bassin versant	53
2.1.2- A l'échelle des sous-bassins.....	54
2.2- Evolution des chroniques de débits et de pluie	56
2.2.1- Débit moyen / pluie annuelle	56
2.2.2- Débits d'étiage.....	59
2.2.3- Chronique de débits journaliers et de pluies journalières.....	59
2.2.3.1- Principe de modélisation.....	60
2.2.3.2- Résultats.....	60
2.3- Synthèse.....	62
INVENTAIRE ET DIAGNOSTIC DES CHAUSSEES	63
1- <i>Localisation et description des chaussées.....</i>	63
2- <i>Recherches en archives et entretiens avec les propriétaires</i>	63
2.1- Historique.....	65
2.2- Usages actuels.....	66
3- <i>Impact des chaussées sur la continuité écologique</i>	66
3.1- Influence sur la circulation piscicole.....	66
3.2- Influence sur le transport solide.....	67
SYNTHESE GENERALE.....	69
1- <i>Description synthétique</i>	69
2- <i>Synthèse des évolutions.....</i>	70
3- <i>Perturbations hydro-morphologiques, enjeux écologiques et orientations de gestion</i>	71
3.1- Synthèse à l'échelle du bassin versant	71
3.1.1- Perturbations et dysfonctionnements.....	71
3.1.2- Enjeux écologiques.....	73
3.2- Dysfonctionnements et orientations de gestion par secteur	73
3.2.1- Affluents	73
3.2.2- Secteur 7.....	74
3.2.3- Secteurs 5 et 6.....	74
3.2.4- Secteur 4.....	74
3.2.5- Secteur 3.....	75
3.2.6- Secteur 2.....	75
3.2.7- Secteur 1.....	75
LEXIQUE.....	77
LISTE DES TABLEAUX	81
LISTE DES FIGURES.....	83
BIBLIOGRAPHIE.....	85

ANNEXES

- 1- coefficients de ruissellement utilisés pour la méthode rationnelle
- 2- Atlas cartographique

INTRODUCTION

Le Parc naturel régional des Grands Causses réalise une étude du bassin versant de la Muse afin d'établir un plan de gestion permettant d'atteindre le bon état écologique des milieux aquatiques du bassin fixé par la Directive Cadre sur l'Eau. Le S.A.G.E. Tarn Amont définit les objectifs généraux suivants :

- Préserver ou rétablir la morphodynamique des cours d'eau ;
- Instaurer une logique dans la gestion physique des cours d'eau en tenant compte des aspects écologiques et juridiques ;
- Préserver voire restaurer les écosystèmes aquatiques, les zones humides ainsi que leur fonctionnement ;
- Maintenir ou améliorer les potentialités piscicoles.

Ce rapport présente les résultats de la phase 1 de l'étude confiée à DYNAMIQUE HYDRO et HYDRETTES visant à réaliser un diagnostic hydrologique et géomorphologique et à définir un programme d'actions adapté au contexte du bassin versant de la Muse. Il s'articule autour des thèmes suivants :

- Analyse diachronique de l'occupation des sols ;
- Etat des lieux et diagnostic géomorphologique ;
- Etude hydrologique ;
- Inventaire et diagnostic des chaussées (ou seuils artificiels).

Le bureau d'études CALLIGEE a également pris en charge la réalisation des traçages sur la Muse dans une zones de pertes potentielles, afin de vérifier les relations supposées entre ces pertes et la source karstique des Douzes, émergeant en bordure du Tarn, plus au Sud. Les résultats et conclusions de CALLIGEE sont présentés dans un rapport annexe.

Un lexique a été réalisé pour rappeler la définition des principales notions abordées dans le rapport et faciliter sa compréhension.

Une vingtaine de cartes ont été éditées et réunies en **annexe 2**. Elles contiennent une grande part des informations collectées sur le terrain et des résultats d'analyse. La **carte n°1** présente notamment la sectorisation des branches principales du réseau hydrographique et la numérotation des sous-bassins versants sur lesquelles s'appuient une grande partie des documents du rapport (de nombreux commentaires, figures et tableaux font référence aux secteurs ou aux sous-bassins versants identifiés sur cette carte pour localiser les informations).

Les fiches descriptives des chaussées sont regroupées dans un rapport annexe.

ANALYSE DIACHRONIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS

L'analyse de l'évolution de l'occupation des sols a pour objectif de retracer les modifications de l'état de surface du bassin versant et plus particulièrement du couvert végétal. Elle permet d'évaluer les implications théoriques des évolutions constatées sur l'hydrologie et la dynamique sédimentaire du bassin, et d'alimenter les analyses et interprétations des thèmes suivants (diagnostic géomorphologique, analyse hydrologique).

1- Méthodologie

Trois séries de photographies aériennes (1948, 1978, 2008) ont été sélectionnées pour étudier l'évolution de l'occupation des sols du bassin versant. Une typologie en 7 classes a été adoptée en fonction des possibilités techniques liées à la qualité variable des photographies aériennes et de façon à minimiser les erreurs lors des comparaisons. Le linéaire de haies a également été digitalisé. En revanche, il s'est révélé impossible de détecter les zones humides. Précisons qu'un pré-inventaire des zones humides est actuellement en cours d'élaboration par le PNRGC, et sera suivi de prospections terrain en 2012 et 2013 pour finaliser l'inventaire.

Les classes d'occupation du sol retenues sont les suivantes :

- boisements denses ;
- boisements peu denses ;
- landes, friches et prairies permanentes (surfaces herbacées et/ou arbustives non labourées) ;
- surfaces cultivées (dont prairies temporaires) ;
- roche nue ;
- surfaces artificielles : bâti et surfaces annexes (jardins, routes, terrains de sports...) ;
- plans d'eau.

Quelques sources d'informations complémentaires ont encore été exploitées : Recensement Général Agricole (1979, 1988, 2000), bases de données Corine Land Cover (1990, 2000, 2006).

1- Evolution des surfaces

1.1- Occupation des sols à l'échelle du bassin versant

Les occupations des sols en 1948, 1978 et 2008 sont présentées sur la **carte n°2**. Le **tableau 1** résume la répartition des principales classes d'occupation des sols pour ces 3 dates à l'échelle du bassin versant,

ainsi que les taux d'évolution moyens correspondant. Les superficies relatives aux roches à nue et aux plans d'eau ne sont pas mentionnées dans ce tableau car elles sont négligeables.

date / période	Boisements denses (%)	Boisements peu denses (%)	Landes, friches et prairies permanentes (%)	Surfaces cultivées (%)	Surfaces artificielles (%)
1948	6,3	11,9	31,8	48,9	1,1
1978	25,3	7,5	21,1	44,8	1,3
2008	30,2	7,9	16,5	42,6	2,8
1948-1978	+19	-4	-10	-5	≈0
1978-2008	+5	≈0	-5	-2	+2
1948-2008	+24	-4	-15	-7	+2

Tableau 1 : occupation du sol du bassin versant de la Muse en 1948, 1978 et 2008 et taux d'évolution moyens

Globalement, **le bassin versant a connu un important reboisement** avec, en % de la superficie totale du bassin, une augmentation moyenne de 20% des surfaces boisées entre 1948 et 2008 (boisements denses et peu denses confondus car la diminution de ces derniers – -4% entre 1948 et 1978 – représentent essentiellement une densification de boisements déjà existants en 1948). Il s'est **réalisé principalement au dépend des surfaces herbacées et arbustives** (-15% de landes, friches et prairies permanentes), **et dans une moindre mesure au dépend des surfaces cultivées** (-7%). Le reboisement a été particulièrement intense durant la première période (opéré au ¾ entre 1948 et 1978), puis il a connu une progression plus modérée (+5%), analogue à l'évolution générale des forêts en France métropolitaine (source : Inventaire Forestier National).

1.2- Occupation des sols à l'échelle des sous-bassins

Le **tableau 2** précise les taux d'évolution observés entre 1948 et 2008 pour chaque sous-bassin (la **carte n°1** permet d'identifier les sous-bassins versants). Il confirme que la tendance globale précédemment constatée à l'échelle du bassin versant est représentative de l'évolution individuelle de l'ensemble des sous-bassins : 28 des 31 sous-bassins ont effectivement connu un fort taux de reboisement. Seuls 2 sous-bassins ont légèrement moins évolué : celui de la Muse en amont du ruisseau de Roubayrolles (n°25) et celui de la Sagette (n°24b) qui n'ont connu qu'un faible recul des terres cultivées en faveur des surfaces boisées. L'évolution du 31^{ème} sous-bassin (ravin de Carlesse, n°12), qui se caractériserait par une augmentation des surfaces herbacées et arbustives (+12%) aussi importante que celle des forêts (+11%), est marginale et pourrait également refléter une limite méthodologique (liée à la difficulté à identifier et à délimiter les différentes parcelles sur la photographie de 1948).

Sous-bassin	Superficie (km ²)	Boisements denses (%)	Boisements peu denses (%)	Landes, friches et prairies permanentes (%)	Surfaces cultivées (%)	Surfaces artificielles (%)
1	0,82	22	10	-20	-14	1
2	0,82	53	-23	-9	-23	2
3	1,34	37	-9	-6	-21	0
4	0,26	32	0	-16	-14	-2
5	1,72	43	-12	-16	-15	0
6	0,41	34	7	-24	-22	4
7	1,01	24	-3	-17	-4	0
8	2,08	38	-7	-30	-2	1
9	8,67	23	-8	-24	8	1
10	0,94	29	4	-4	-27	-1
11	8,09	30	-6	-10	-17	3
12	1,58	5	6	12	-23	0
13	1,16	7	15	-15	-7	0
14	4,71	12	12	-11	-18	5
15	0,81	13	9	-9	-12	0
16	6,10	47	-13	-30	-4	0
17	4,85	34	-6	-36	5	2
18	1,23	4	23	-22	-8	2
19	0,84	16	-4	9	-27	5
19a	3,04	20	-5	-23	7	1
19b	7,51	28	-6	-30	7	1
20	2,26	14	-2	-1	-11	0
21	0,52	62	0	-51	-12	1
22	7,77	13	3	-12	-6	2
23	3,55	33	-13	-10	-12	2
23a	2,61	11	0	-13	0	2
23b	3,49	13	-3	-12	2	1
24	0,14	20	16	-7	-27	-1
24a	1,81	14	1	0	-15	1
24b	2,02	8	-1	-2	-6	0
25	6,48	6	-2	0	-5	1
Ensemble	112	24	-4	-15	-7	2

Tableau 2 : taux d'évolution des principales classes d'occupation du sol (exprimés en % de la superficie des bassins) durant la période 1948-2008 - les valeurs en gras mettent en évidence les augmentations les plus significatives (>10%)

1.3- Distribution spatiale des évolutions

Les résultats précédents rendent compte de l'évolution moyenne du bassin versant et des sous-bassins mais ils ne permettent pas de mettre en évidence les modifications relatives à la localisation des types de surfaces. La **carte n°3** représente une synthèse de l'évolution de la distribution spatiale de l'occupation des sols. Elle repose sur une superposition des cartes d'occupation des sols de 1948 et 2008, simplifiée et partiellement corrigée (notamment en supprimant les polygones inférieurs à 1 ha) pour limiter les erreurs liés au décalage de ces 2 séries de photographies aériennes, mais il faut préciser qu'il **subsiste des erreurs qui tendent à surestimer l'emprise spatiale des surfaces modifiées.**

L'ampleur du développement des surfaces artificielles est encore surestimée par l'inclusion des parcelles annexes au bâti en 2008 (jardins, voirie, terrains de sport...) alors que certaines de ces surfaces étaient difficilement détectables sur les photographies aériennes de 1948.

La **carte n°3** révèle néanmoins que **le reboisement a été particulièrement important sur les zones à forte pente** : la plupart des surfaces reboisées se situent sur les versants escarpés qui font la jonction entre les zones de plateau (plateau du Lévézou et Avant-Causses) et les fonds de vallée de la Muse et de certains affluents dans leur partie aval. Un autre secteur important de reboisement concerne une partie du plateau du Lévézou, en tête des bassins de Falguières et Estalane.

Cette carte montre également **un développement des surfaces cultivées sur la partie sommitale du plateau**, au niveau des secteurs amont des bassins de Fouyrouse (n°9) et de Brinhac (n°19b), et dans une moindre mesure des bassins de Rivaldiès (n°17), des Landes (n°19a) et de Coste Cave (n°23a). Ces cultures ne se sont pas développées sur toute la période 1948-2008, mais essentiellement entre 1948 et 1978. Par ailleurs, elles ont remplacées d'anciennes surfaces classées en *landes, friches et prairies permanentes* qui dominaient toute la bordure ouest du bassin en 1948 (**carte n°2**) et il est probable que leur implantation se soit accompagnée de travaux de drainage.

1.4- Informations complémentaires

Les données du Recensement Général Agricole (fiches comparatives des recensements de 1979, 1988 et 2000) indiquent une diminution globale de 8,2 km² (soit 9%) de la Surface Agricole Utile (SAU composée des cultures pérennes, surfaces toujours en herbes ou STH, terres arables et jachères) des exploitations des 5 communes du bassin versant entre 1979 et 2000 (**tableau 3**). Seule la SAU de Saint-Laurent-de-Lévézou connaît une progression positive de 15% environ.

Ces informations ne sont pas directement comparables avec les données issues de l'interprétation des photographies aériennes car :

- elles correspondent à une typologie différente ;
- elles ont été établies sur un territoire plus vaste que celui du bassin versant (la superficie du bassin ne représente que 65% de la superficie totale des communes) ;
- elles sont basées sur les exploitations agricoles dont le siège est situé sur la commune renseignée, sans tenir compte de la localisation réelle des parcelles.

Si l'on ignore les erreurs liées à ce dernier point, alors la diminution de la SAU sur le bassin serait approximativement de 5,3 km² (65% des 8,2 km²) soit près de 5% du bassin. Cette valeur correspond assez bien aux résultats précédents qui montrent, sur la période 1978-2008, une diminution globale de 6,7% des surfaces cultivées et des surfaces herbacées (la classe *landes, friches et prairies permanentes* étant principalement constituée de prairies permanentes ou de jachères) en faveur d'une augmentation des surfaces boisées et artificielles.

Les données du RGA indiquent également une importante modification de la nature des surfaces agricoles, difficilement détectable par photo-interprétation : plus de la moitié des surfaces toujours en herbes ont disparues (-29 km² soit -54% des STH présentes en 1979) alors que la superficie fourragère a peu diminuée (-7 km²) ; en contrepartie, les terres labourables se sont nettement développées (+22 km² soit +55%). Ceci révèle qu'**une grande partie des prairies permanentes ont été converties en prairies temporaires** (les STH correspondent aux surfaces en herbes naturelles ou semées depuis au moins 5 ans). Si la commune d'appartenance du siège des exploitations témoignait de la localisation des

parcelles, cette évolution concernerait davantage le secteur nord du bassin versant : +8% et +7% de terres labourables sur les communes de Saint-Laurent-de-Lévezou et Saint-Léons respectivement (**tableau 3**).

Commune	Evolution de la Surface Agricole Utile (km ²)	Evolution de la superficie fourragère (km ²)	Evolution des Surfaces Toujours en Herbe (km ²)	Evolution des terres labourables (km ²)
Castelnaud-Pégayrols	-3,6	-3,3	-7,2	+3,7
Montjoux	-4,4	-3,1	-4,4	+0,4
Saint-Beauzély	-1,7	-1,9	-3,6	+1,9
Saint-Laurent-de-Lévezou	+2,4	+1,5	-6,2	+8,5
Saint-Léons	-0,9	-0,6	-8,0	+7,1
<i>Ensemble</i>	-8,2	-7,4	-29,3	+21,6

Tableau 3 : évolution des principales classes d'occupation du sol définies par le Recensement Général Agricole entre 1979 et 2000 (superficies renseignées pour les exploitations dont le siège se situe sur les communes du bassin versant, quelle que soit la localisation réelle des parcelles)

L'analyse des données de la base Corine Land Cover (1990, 2000, 2006) n'apporte quasiment aucune information complémentaire car elles se sont avérées être trop imprécises (faible résolution spatiale) et incomparables d'une année sur l'autre (la comparaison des données 1990 et 2006 produit des évolutions fortuites). Elles montrent seulement, ce qui est confirmé par des observations de terrain, qu'une grande partie des nouveaux boisements sont consacrés à la culture des résineux, et donc destinés à faire l'objet de coupes qui laissent temporairement les sols dépourvus de couvert végétal.

2- Evolution des haies

Le linéaire de haies a été digitalisé pour les 3 séries de photographies aériennes de manière à évaluer l'impact possible sur la circulation des flux hydriques et sédimentaires. Il faut souligner que les densités de haies ne sont comparables qu'à occupation du sol égale. La transformation progressive des terres arables et des prairies en surfaces boisées suppose qu'une partie des haies a été enveloppée dans la couverture forestière. Autrement dit, la longueur totale de haies présentes (ou détectables) sur le bassin versant a diminuée mais elle pourrait être largement compensée par le phénomène de reboisement. Aussi, pour tenir compte des évolutions précédemment décrites, nous avons comparé les densités de haies présentes sur les terres cultivées (**tableau 4**).

2.1- Densité des haies à l'échelle du bassin versant

Contrairement à l'occupation des sols, la densité de haies à l'échelle du bassin versant aurait connu deux évolutions distinctes selon la période considérée (**tableau 4**) :

- augmentation de 1,78 km/km² soit +95% entre 1948 et 1978 ;
- diminution de 0,52 km/km² soit -14% entre 1978 et 2008.

Sous-bassin	Densité de haies sur les terres cultivées (km/km ²)			Evolution (km/km ²)		
	1948	1978	2008	1948-1978	1978-2008	1948-2008
1	0,73	2,50	0,80	1,77	-1,70	0,07
2	0,31	1,09	4,55	0,78	3,46	4,24
3	1,94	3,35	9,60	1,41	6,25	7,66
4	3,13	3,27	5,59	0,14	2,32	2,46
5	1,58	2,73	3,89	1,15	1,16	2,31
6	0,68	0	3,86	-0,68	4	3,18
7	0,32	2,08	2,34	1,76	0,26	2,02
8	1,77	3,81	3,44	2,03	-0,37	1,67
9	0,98	2,32	1,50	1,35	-0,82	0,53
10	0,00	0,20	0,55	0,20	0,34	0,55
11	1,29	4,11	3,00	2,81	-1,11	1,70
12	0,23	2,58	2,11	2,35	-0,47	1,88
13	1,77	3,77	2,44	2,00	-1,33	0,67
14	1,13	3,60	4,11	2,47	0,51	2,98
15	1,03	1,78	2,64	0,76	0,85	1,61
16	1,60	4,08	3,61	2,47	-0,46	2,01
17	1,81	2,38	1,22	0,57	-1,16	-0,59
18	0,59	3,04	1,74	2,45	-1,30	1,15
19	3,91	6,14	3,28	2,23	-2,87	-0,64
19a	1,79	2,16	1,10	0,37	-1,06	-0,69
19b	2,45	3,50	2,20	1,05	-1,30	-0,25
20	1,70	3,87	4,25	2,17	0,38	2,54
21	0	0	0,52	0	0,52	0,52
22	1,76	4,92	4,07	3,15	-0,84	2,31
23	2,99	4,40	4,45	1,41	0,05	1,46
23a	3,63	6,40	3,84	2,77	-2,56	0,22
23b	1,07	4,79	2,03	3,72	-2,76	0,96
24	3,57	7,65	8,03	4,08	0,37	4,46
24a	4,34	5,23	4,39	0,90	-0,84	0,06
24b	3,30	4,80	4,20	1,49	-0,60	0,90
25	3,64	4,45	3,33	0,81	-1,11	-0,30
Ensemble	1,86	3,64	3,12	1,78	-0,52	1,26

Tableau 4 : densité des haies sur les terres cultivées en 1948, 1978 et 2008 et évolution

Une partie des résultats précédents est néanmoins biaisée par la méthodologie employée, le type de haies considérées et la mauvaise qualité des photographies de 1948. D'une part, il est difficile de repérer les haies constituées d'une végétation broussailleuse. Les résultats présentés ci-dessus correspondent donc essentiellement aux haies arborées et arbustives. Or certaines haies présentes dès 1948 se sont probablement développées pour devenir détectables en 1978. D'autre part, il est impossible de détecter les haies qui présentent une faible largeur et la limite de détection est variable selon la qualité de l'image : 2m environ pour 1978 et 2008 ; 5m environ pour 1948.

La densité de haies en 1948 devait donc être très largement supérieure à la valeur présentée dans le **tableau 4**. Une comparaison attentive des photographies aériennes de 1948 et 1978, sur certains secteurs où les haies sont densément implantées en 1978, révèle effectivement que **la densité de haies**

en 1948 est fortement sous-estimée. De plus, une diminution de la densité de haies durant la période 1948-1978 est vraisemblable du fait de la modernisation de l'agriculture et des opérations de remembrement. Il nous est néanmoins **impossible d'évaluer la proportion des évolutions des haies durant cette période.**

La diminution observée entre 1978 et 2008 est également en partie surévaluée dans la mesure où l'épaississement de certaines haies (ex : double rangée d'arbres) nous a parfois conduit à les classer en surfaces boisées. Nous retiendrons donc **une valeur approximative de -10% pour cette dernière période.**

2.2- Densité des haies à l'échelle des sous-bassins

L'évolution moyenne observée à l'échelle du bassin versant masque des **situations très contrastées à l'échelle des sous-bassins.** La **carte n°4** représente l'évolution des haies durant les 3 dernières décennies (entre 1978 et 2008). Quelques sous-bassins présentent une densification du linéaire des haies, notamment dans la partie sud du bassin versant. Mais une grande partie des affluents, et plus particulièrement ceux de rive droite, de la Muse et de la Muzette, ont connu une forte diminution de la densité de haies. Cette évolution peut être expliquée par le développement des surfaces cultivées sur la partie sommitale du plateau (cf. paragraphe 2.3). Ailleurs, elle témoigne d'une augmentation de la taille des parcelles agricoles.

3- Synthèse et implications hydrologiques et géomorphologiques

En résumé, l'évolution de l'occupation des sols est caractérisée par les éléments suivants :

- reboisement important, rapide entre 1948 et 1978 (+15%), et modéré entre 1978 et 2008 (+5% soit conforme à l'évolution générale des forêts en France métropolitaine) au détriment des landes, friches, prairies et surfaces cultivées (cf. paragraphe 2.1). Il affecte la quasi-totalité des sous-bassins versants (cf. paragraphe 2.2) et concerne principalement les zones à forte pente qui font la jonction entre les plateaux et les fonds de vallée de la Muse et des tronçons aval des affluents (cf. paragraphe 2.3 et **carte n°3**) ;
- ce reboisement est en partie constitué d'essences résineuses destinées à la sylviculture (cf. paragraphe 2.4), particulièrement en tête des bassins de Falguières et d'Estalane ;
- la bordure ouest du bassin versant, sur la partie sommitale du plateau du Lévézou, a connu une double évolution selon les zones considérées (cf. paragraphe 2.3 et **carte n°3**) :
 - o reboisement progressif sur toute la période 1948-2008 pour les secteurs amont des bassins d'Estalane et de Falguières ;
 - o développement de terres cultivées entre 1948 et 1978 (en remplacement de surfaces classées en *landes, friches et prairies permanentes* qui dominaient toute la bordure ouest du bassin en 1948) sur les secteurs amont des bassins de Fouyrouse, Brinhac, Rivaldiès, Landes et Coste Cave ;

- diminution globale de la densité des haies entre les parcelles cultivées durant les trente dernières années (cf. paragraphe 3.1) mais il s'agit d'une tendance moyenne car les sous-bassins présentent des évolutions contrastées (cf. paragraphe 3.2 et **carte n°4**) ;
- conversion de la moitié des prairies permanentes en prairies temporaires, qui concerne environ 13% de la superficie totale du bassin versant (cf. paragraphe 2.4).

A l'échelle du bassin versant, les conséquences théoriques du reboisement au détriment des surfaces herbacées, arbustives et cultivées sont les suivantes :

- augmentation de l'évapotranspiration et de l'interception des eaux de pluie qui tend à diminuer les volumes écoulés en surface (ex. : débits moyens mensuels), particulièrement en été et au printemps ;
- augmentation de l'infiltration (et diminution du ruissellement) et ralentissement des écoulements qui entraînent une diminution des débits de pointe des crues et une probable augmentation des débits d'étiage (en partie compensée par la diminution des volumes écoulés) ;
- diminution de l'érosion des versants et de la fourniture sédimentaire aux cours d'eau, et notamment des apports en matériaux grossiers (galets et graviers) du fait du reboisement des fortes pentes ;
- diminution de l'érosion des cours d'eau (plus faibles débits de crues) ;
- possible altération des modalités du transport solide dans les cours d'eau par modification du régime des crues : les crues intenses, désormais plus rares *a priori*, favorisent l'érosion des cours d'eau alors que les débits moyens, désormais plus longs (durée annuelle cumulée), participent davantage à la redistribution des sédiments dans le réseau hydrographique.

La diminution globale de la densité des haies entre 1978 et 2008 (et probablement depuis 1948) favorise en revanche le ruissellement des eaux sur de plus grandes distances (plus grandes parcelles), ce qui tend à favoriser l'érosion des terres cultivées. Le remplacement de la majeure partie des prairies permanentes par des prairies temporaires (ou artificielles) entre 1979 et 2000 implique également un retournement plus fréquent des sols. Dans la mesure où il concerne une portion significative du territoire, cela peut encore entraîner une augmentation de la production de sédiments fins (sables et limons). Les coupes réalisées dans les exploitations sylvicoles (récoltes de bois), et plus particulièrement les coupes à blanc, favorisent encore le ruissellement, l'érosion des sols et les apports de fines dans les cours d'eau. Précisons par ailleurs que les dessouchages, en créant des excavations profondes dans les sols, perturbent fortement leur stabilité, ce qui favorise les glissements de terrains dans les zones à fortes pentes. A l'échelle du bassin, ces trois dernières tendances viennent donc s'opposer aux effets du reboisement généralisé du bassin.

A une échelle plus fine, on peut distinguer le cas des sous-bassins de Fouyrouse, Brinhac, Rivaldiès, Landes et Coste Cave dont une partie des secteurs amont ont été mis en cultures entre 1948 et 1978. La modification de ces têtes de bassin favorise le drainage des bassins. En 1948, cette partie sommitale du plateau du Lévézou était très largement représentée par des surfaces classées en *landes, friches et prairies permanentes* alors que des parcelles moins adaptées du point de vue du relief étaient cultivées sur d'autres parties du bassin (**carte n°2**). Aussi, on peut supposer qu'elle constituait une zone impropre à la culture en raison de l'humidité des sols, et il est par conséquent probable que leur implantation se soit de plus accompagnée de travaux de drainage qui ont encore limité les capacités de rétention et de restitution progressive des eaux dans cette zone.

ETAT DES LIEUX ET DIAGNOSTIC GEOMORPHOLOGIQUE

Cette partie est consacrée à l'analyse géomorphologique de la Muse et de ses affluents. Elle s'articule autour de trois axes :

- la sectorisation des branches principales du réseau hydrographique qui décrit les grands secteurs identifiés d'un point de vue des caractéristiques fondamentales du cours d'eau et des fonds de vallée ;
- l'inventaire réalisé sur les branches principales du réseau hydrographique visant à caractériser les dynamiques géomorphologiques de ces secteurs (fourniture sédimentaire, transit sédimentaire, embâcles et bois mort, dynamique latérale) ;
- l'état des lieux et l'analyse de l'ensablement sur l'ensemble du réseau hydrographique.

1- Sectorisation des branches principales du réseau hydrographique

Nous avons distingué **7 secteurs** en fonction des caractéristiques fondamentales du cours d'eau et du fond de vallée (pente, largeur et encaissement du fond de vallée, dimensions du chenal à pleins bords, présence d'alluvions en fond de vallée, fréquence des affleurements rocheux dans le lit) : 5 sur la Muse, et 2 sur la Muzette et Brinhac.

La **carte n°1** (en annexe 2) **permet de localiser ces secteurs**. Soulignons que ce découpage en tronçons homogènes servira de base pour l'analyse des données collectées sur les branches principales du réseau hydrographique.

La **figure 1** illustre sommairement ce découpage. Elle montre :

- le profil en long des branches principales du réseau du réseau hydrographique (segments d'ordre 3 à 5 selon Strahler), soit la Muse en aval du ruisseau de Roubayrolles et ses principaux affluents (Muzette, Brinhac et Landes) : il permet de repérer les ruptures de pente qui marquent le découpage des secteurs ;
- la présence d'alluvions en fond de vallée (source : carte géologique BRGM au 50 000^{ème}) témoigne des héritages géomorphologiques qui influencent la fourniture sédimentaire des versants (colluvions) et la dynamique latérale des cours d'eau. Elle est étroitement liée à la largeur et à l'encaissement des fonds de vallée (**tableau 5** ; ne figurent pas sur la **figure 1** mais ces paramètres ont également servi à sectoriser le réseau hydrographique). Ces caractéristiques différencient nettement les secteurs S1, S4, S5, S7 des secteurs S2 et S3. Ces derniers présentent un fond de vallée plus étroit et plus encaissé. C'est plus particulièrement le cas du secteur S2 qui comporte quelques tronçons en gorges. Le secteur S3 est en fait hétérogène sur ce point, ce que l'imprécision de la carte géologique ne permet

pas de constater : un peu moins de la moitié amont du secteur est effectivement bien encaissée, mais la carte topographique (IGN 25 000^{ème}) montre un élargissement du fond de vallée dans sa partie aval. On peut effectivement observer un fond de vallée relativement alluvial en aval du ravin de Moulibez. L'inventaire des affleurements rocheux dans le lit montre par ailleurs très bien la limite ente ces 2 sous-secteurs (**carte n°9** ; ne figure pas sur la **figure 1** mais ce paramètre a également servi à sectoriser le réseau hydrographique). La Muzette (S6) est encore un cas particulier car son fond de vallée s'évase aux extrémités amont et aval ;

- les pentes du cours d'eau (calculées par tronçon de 250m) : les secteurs S1 et S4 présentent les pentes les plus faibles et les plus homogènes. Sur la Muse, le secteur amont (S5) présente une pente moyenne nettement plus élevée, qui décroît vers l'amont à mesure que l'on se rapproche de la zone de plateau. Les secteurs S2 et S3 se caractérisent par leur hétérogénéité, c'est-à-dire par une alternance de tronçons à forte énergie d'écoulement (0,021 à 0,043 m/m) et de tronçons plus lents (0,01 à 0,017 m/m) ;
- le rapport largeur/profondeur (à pleins bords) du lit, traditionnellement utilisé comme indicateur de l'intensité du transport solide et de la dynamique latérale, et de la cohésion des berges, permet ici notamment de différencier les secteurs S1 et S2, plus larges et moins profonds, des secteurs amont.

Les caractéristiques moyennes de chaque secteur sont résumées dans le **tableau 5**. Il faut préciser que les largeurs de fond de vallée ont été estimées par la distance entre les deux points des versants situés 10 m au-dessus du fond de vallée. Il ne s'agit donc pas de mesures de la largeur réelle du fond de vallée. Néanmoins, les erreurs associées à cette méthode de calcul étant reproductibles sur la totalité du cours d'eau, les estimations sont comparables entre elles et elles permettent donc bien de différencier les secteurs.

Secteur	Linéaire de cours d'eau (m)	Pente (m/m)	Largeur à pleins bords (m)	Profondeur à pleins bords (m)	Rapport largeur/profondeur	Largeur en fond de vallée * (m)	Rapport d'encaissement **
S1	4 250	0,011	8,3	0,67	12,6	93	10
S2	6 250	0,022	7,5	0,60	12,9	58	8
S3	4 000	0,015	6,0	0,89	7,3	57	9
S4	7 000	0,010	3,9	0,84	4,9	119	34
S5	4 441	0,024	3,1	0,60	5,8	82	27
S6 - Muzette	3 211	0,030	2,6	0,57	4,8	64	27
S7 - Brinhac	970	0,032	1,8	0,60	3,0	112	66
Total/moyenne	30 122	0,018	5,2	0,70	8,0		

* distance entre les deux versants opposés à +10 m au-dessus du fond de vallée (mesure qui surestime la largeur réelle du fond de vallée, mais qui peut être utilisée à titre d'indicateur comparable d'un secteur à l'autre) – ** le rapport d'encaissement représente le rapport entre la largeur du fond de vallée et la largeur à pleins bords du cours d'eau

Tableau 5 : caractéristiques morphologiques moyennes des secteurs identifiés

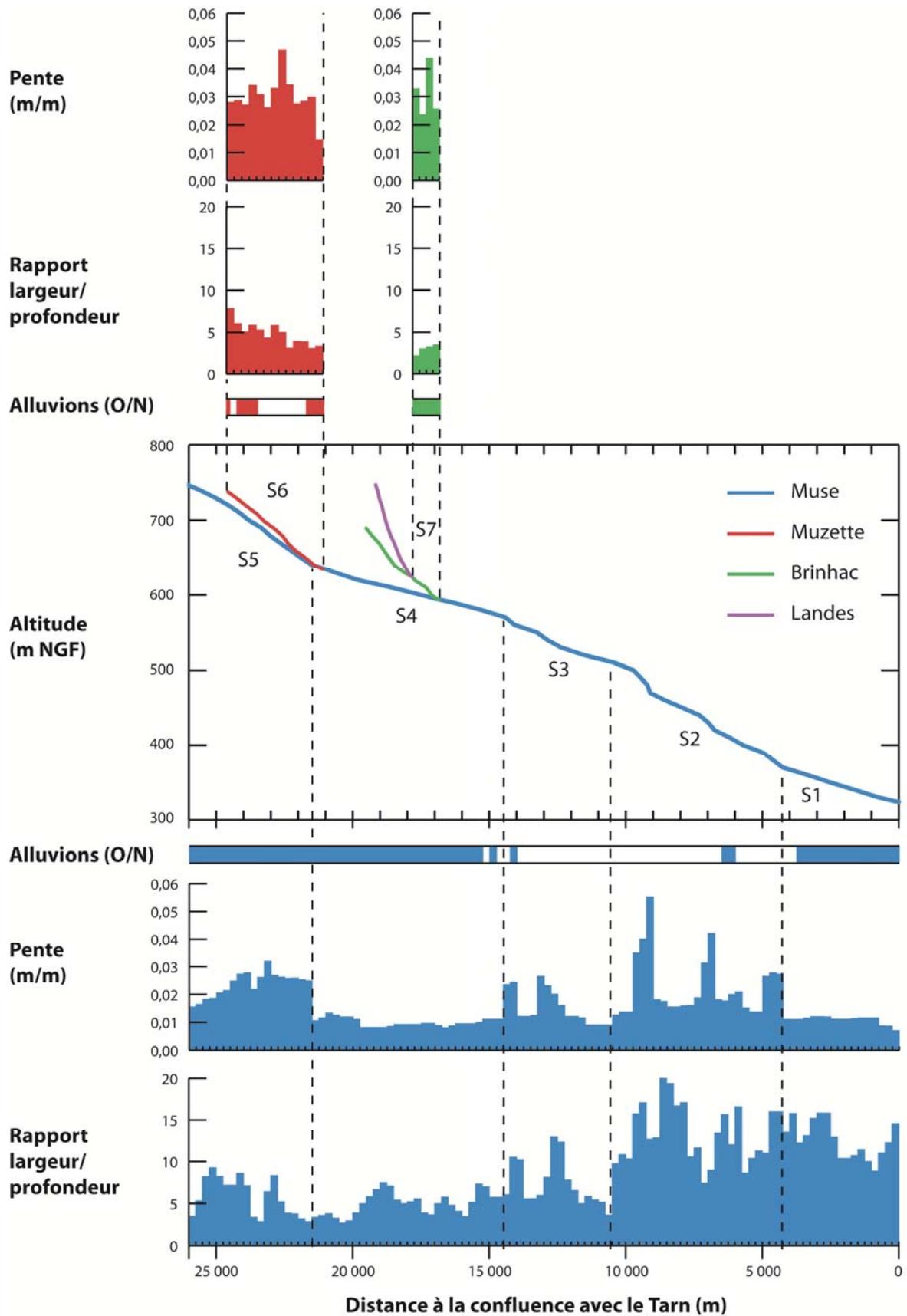


Figure 1 : sectorisation morphologique des branches principales du réseau hydrographique : découpage en 7 secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques fondamentales du cours d'eau et du fond de vallée - le profil en long correspond au linéaire d'ordre 3 à 5 selon Strahler

2- Inventaire réalisé sur les branches principales du réseau hydrographique et analyses thématiques

2.1- Méthode d'inventaire et parcours effectué

Les levés réalisés sur le terrain ont permis d'établir, sur le linéaire de cours d'eau parcouru, un inventaire exhaustif des objets suivants :

- formes d'érosion (type, dimensions, granulométrie, connexion et activité) : **carte n°5** ;
- atterrissements (dimensions, mobilité, granulométrie) : **cartes n°6 et 7** ;
- embâcles (volume, stabilité) : **carte n°8** ;
- affleurements de la roche mère : **carte n°9** ;
- aménagements (type, état, description) et divers éléments qui influencent potentiellement les flux hydriques et sédimentaires (rejets, obstacles au transport solide...) : **cartes n°10, 13 et 20**.

Des levés systématiques, au pas d'échantillonnage de 250 m de linéaire de cours d'eau, ont également été réalisés pour caractériser le réseau hydrographique du point de vue de :

- la géométrie hydraulique du tronçon (largeur et profondeur à pleins bords) ;
- la composition granulométrique des sédiments du lit ;
- la ripisylve (densité, état, stabilité) : **cartes n°11 et 12**.

Précisons que la granulométrie des particules du lit et la géométrie à pleins bords ont systématiquement été déterminées sur un faciès de type lotique (ex. : radier) pour assurer la comparabilité des résultats (entre chaque levé) et leur représentativité de la charge de fond en transit.

Enfin, des analyses granulométriques plus fines ont été réalisées sur 7 atterrissements grossiers (méthode d'échantillonnage surfacique de type *grid sampling* selon Wolman 1954).

L'inventaire de terrain avait dans un premier temps été envisagé sur la totalité des tronçons d'ordre 3 à 5 du réseau hydrographique (ordre de Strahler). Néanmoins, l'accès et le parcours difficile sur certains tronçons amont (Brinhac amont, Landes et Falguières) ne nous ont pas permis de réaliser un inventaire exhaustif des formes énumérées ci-avant (atterrissements, embâcles...). Cela nous a conduits à restreindre l'analyse aux secteurs S1 à S7 décrits dans le paragraphe 1- *Sectorisation*.

2.2- Fourniture sédimentaire

2.2.1- Transformation des données brutes

Le **tableau 6** présente les principaux résultats relatifs aux formes d'érosions, tous types confondus (érosion de berge, de banc, reptation, glissement de terrain, écoulement). Les **surfaces érodées S_e** et le **nombre d'érosions N_e** correspondent aux données brutes mesurées sur le terrain mais ne permettent pas d'apprécier directement la fourniture sédimentaire potentielle des différents secteurs. Il faut pour cela tenir compte de l'efficacité des érosions qui dépend à la fois de leur **degré d'activité** (intensité de la production) et de leur **degré de connexion** (ex. : fourniture plus faible pour les surfaces déconnectées par une terrasse, un banc figé, un replat...). L'**indice d'efficacité I_e** intègre ces 2 paramètres. Il s'agit

néanmoins d'un coefficient estimé sur des bases qualitatives, si bien qu'il ne traduit pas parfaitement la fourniture sédimentaire des érosions. Les secteurs étant de longueur différente, on peut encore comparer les densités (rapport entre la superficie totale des formes d'érosion et la longueur du cours d'eau, en m²/km) pour s'affranchir de cet effet de taille.

N.B. : L'indice d'efficacité des érosions, ainsi que les indices d'activité et de connexion qui permettent son calcul, sont davantage expliqués dans le lexique.

L'analyse de la fourniture sédimentaire s'appuiera donc essentiellement sur trois indicateurs :

- la **surface d'érosion efficace** $S_e \cdot I_e$ (valeur absolue en m²) pour l'évaluation de la fourniture sédimentaire de chaque secteur ;
- la **densité d'érosion efficace** $S_e \cdot I_e / L$ (valeur relative en m²/km) qui traduit la propension des berges et des versants d'un secteur à fournir des sédiments ;
- le **nombre d'érosion par km** N_e / L qui informe soit sur la concentration de la production totale dans quelques érosions majeures, soit à l'inverse sur la multiplicité de formes d'érosion petites ou moyennes.

Secteur	Nombre d'érosions N_e	Surface des érosions S_e (m ²)	Nombre d'érosions par km N_e / L	Indice d'efficacité I_e	Surface efficace $S_e \cdot I_e$ (m ²)	Densité efficace $S_e \cdot I_e / L$ (m ² /km)
S1	8	384	1,9	0,39	149	35
S2	4	140	0,6	0,43	61	10
S3	6*	771	1,5*	0,30	230	58
S4	26*	583	3,7*	0,72	422	60
S5	26	1 019	5,9	0,21	217	49
S6 - Muzette	13	171	4,0	0,54	92	29
S7 - Brinhac	0	0	0		0	0
Total / moyenne	83	3 067	2,8	0,38	1171	39

* certaines érosions de berges discontinues ont été considérées comme une seule forme d'érosion

Tableau 6 : synthèse des principaux résultats sur les formes d'érosions recensées sur les branches principales du réseau hydrographique

2.2.2- Analyse globale à l'échelle du bassin versant

Le premier constat que l'on peut établir est la **faiblesse de l'activité érosive des cours d'eau du bassin**, comme en atteste la densité efficace moyenne des érosions estimée à 39 m²/km. A titre de démonstration, on peut comparer cette valeur avec son équivalent en termes d'érosions de berges : si la totalité des formes d'érosions correspondaient à des érosions de berges, et si l'on se base sur une hauteur de berges de 0,70 m (valeur moyenne de la profondeur à pleins bords ; **tableau 5**), elle ne représenterait que 56 m/km de berges érodées (soit 2,8% des berges de chaque rive). Etant donné que les érosions recensées sont de plus globalement peu intenses, cette proportion traduit bien une faible fourniture sédimentaire globale au cours d'eau. Cette estimation est entachée d'une certaine erreur liée à l'imprécision du coefficient d'efficacité I_e . Mais quand bien même on ne tiendrait pas compte du coefficient d'efficacité (ce qui revient à considérer que toutes les érosions sont pleinement actives et connectées au cours d'eau), les érosions ne représenteraient que 145 m/km (ou 7,2% des berges).

Plusieurs types d'érosion peuvent participer à la recharge sédimentaire des cours d'eau. Dans le cas du bassin versant de la Muse, les apports liés exclusivement (43%) ou en partie (17%) aux processus de versants (écroulement, glissement de terrain et reptation ; ex. : **figure 3a**) sont largement dominants (**figure 2**). Le faible niveau global de la fourniture sédimentaire et de la part des érosions de berge (40% ; ex. : **figure 3b**) s'explique par une dynamique latérale du cours d'eau extrêmement faible (cf. paragraphe 2.5).

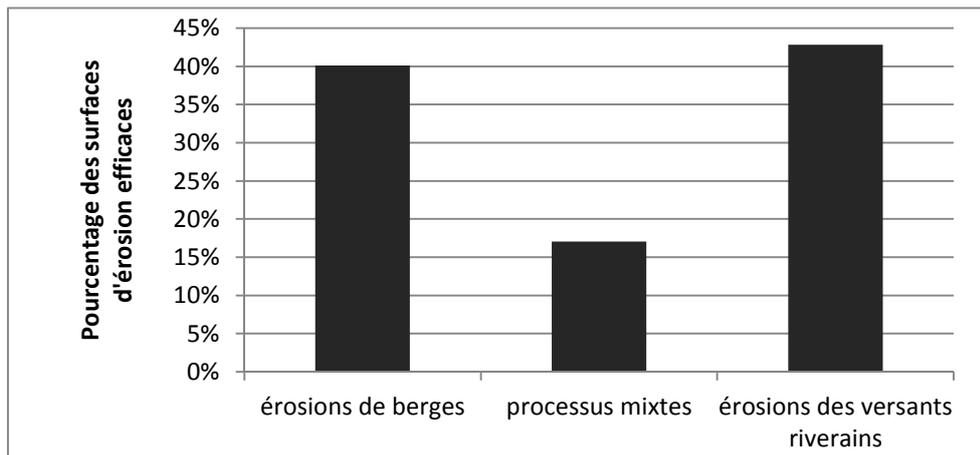


Figure 2 : répartition des superficies érodées par type de processus érosif sur l'ensemble des branches principales du réseau hydrographique

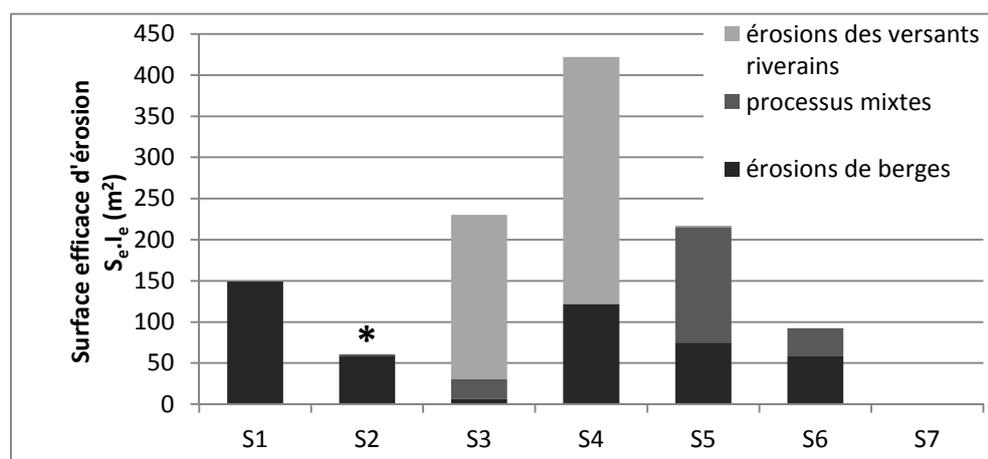
De plus, chaque affluent a été caractérisé par sa largeur de bande active et la dimension du cône de déjection afin de déterminer, de manière qualitative, sa capacité à fournir des sédiments grossiers (charge de fond constituée de graviers et galets) aux branches principales. Ces informations ne sont pas détaillées car, à l'exception du ravin de Payssel (dépôt d'environ 6 m³), les confluences sont dépourvues de cônes de déjection. Il est donc difficile d'évaluer les apports relatifs de chaque affluent. On peut néanmoins considérer qu'ils sont généralement très faibles par rapport à la capacité de transport de leur émissaire puisqu'ils n'entraînent aucun dépôt remarquable.



Figure 3 : exemples d'érosions localisées sur le bassin versant : a) érosion de versant (écroulement de la partie supérieure et glissement dans la partie inférieure) ; b) érosion de berge

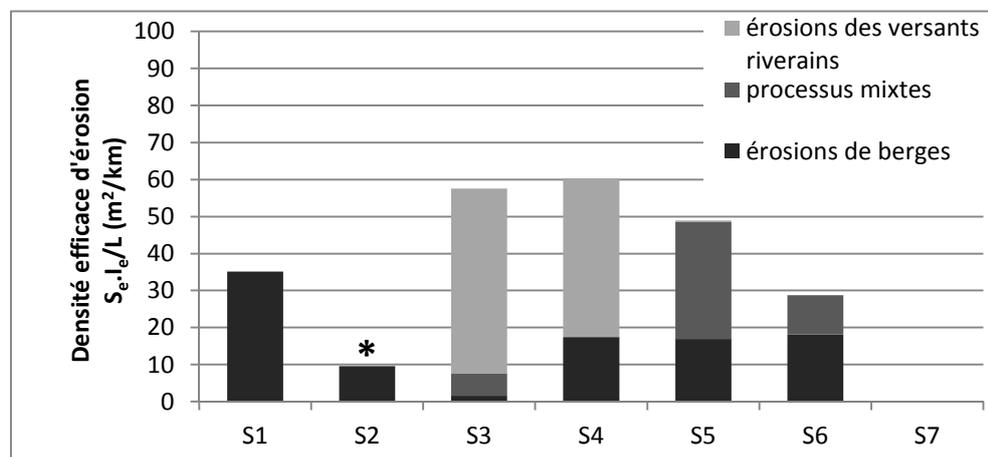
2.2.3- Distribution spatiale des formes d'érosions

Les surfaces d'érosions pondérées par l'indice d'efficacité (surface efficace $S_{e.I_e}$ en m^2) indiquent que le secteur S4 est le plus productif (tableau 6 et figure 4), suivi des secteurs S3 et S5. Les apports les plus faibles correspondent dans l'ordre à S7 (aucune érosion significative sur Brinhac aval), S2 (secteur en gorges) et S6 (Muzette). Si l'on considère les densités d'érosions (figure 5), la hiérarchie précédente est conservée mais l'importance du secteur S4 diminue fortement. Celui-ci contribue donc de manière plus importante que les autres secteurs à la fourniture sédimentaire globale (valeur absolue en m^2) du fait de sa longueur (7 km), mais il présente une intensité d'érosion (valeur relative en m^2/km) équivalente à celles de S3 et S5.



* valeur sous-estimée (apports de versants indéterminés)

Figure 4 : surface efficace des érosions ($S_{e.I_e}$) et type de processus érosif



* valeur sous-estimée (apports de versants indéterminés)

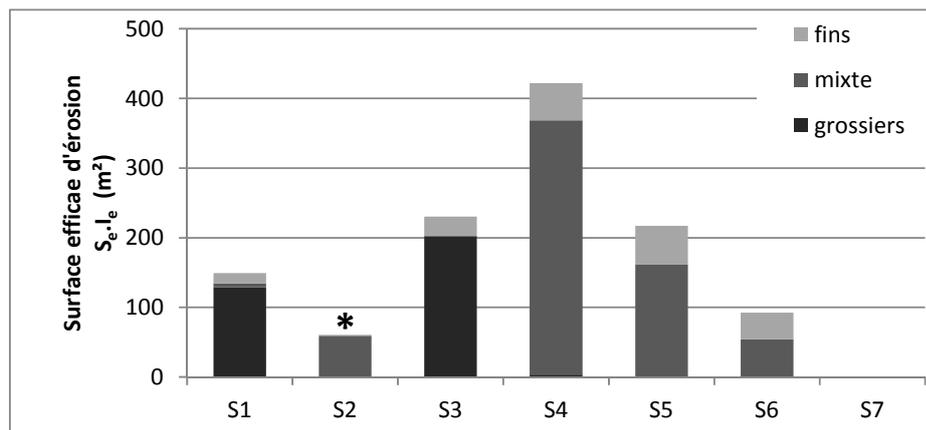
Figure 5 : densité efficace des érosions ($S_{e.I_e}/L$) et type de processus érosif

La production du secteur S2 paraît particulièrement faible comparée aux autres secteurs de la Muse. La contrainte exercée par les versants rocheux dans ce secteur en gorges explique en partie ce résultat (peu d'érosions de berges). Néanmoins, la fourniture sédimentaire de ce secteur est largement sous-estimée car la proximité des versants, parfois particulièrement escarpés, favorise également l'introduction de colluvions. Il était cependant difficile, voire impossible, d'observer les apports provenant du sommet des parois adjacentes aux cours d'eau.

Si l'on écarte le secteur S2, mal représenté par les données collectées, on remarque alors que l'ordre des secteurs productifs s'explique essentiellement par le type de processus érosif dominant (figure 5) :

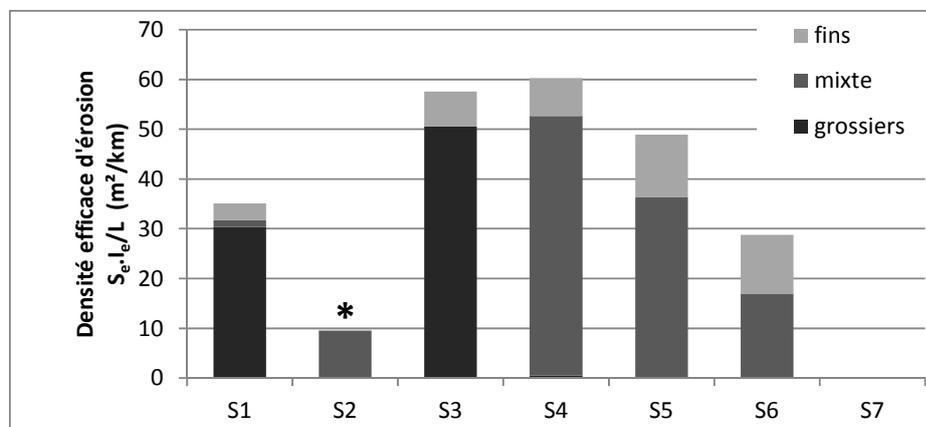
- le secteur S1 caractérisé par un fond de vallée nettement plus alluvial que les autres est relativement plus sensible à l'érosion des berges ;
- les berges des secteurs S4 à S6 présentent une sensibilité à l'érosion similaire (entre ces secteurs) et plus faible qu'en S1. La différence de niveau de production de ces secteurs correspond donc essentiellement à la part des apports depuis les versants riverains ;
- le secteur S3, dont le fond de vallée est nettement plus étroit et encaissé, présente très peu d'érosions de berges mais une plus forte proportion d'érosion de versant du fait de la proximité des versants.

On peut encore différencier les apports en fonction du type de matériaux produits : grossiers, mixtes ou fins (figures 6 et 7). On constate que les secteurs S1 et S3 fournissent essentiellement des matériaux grossiers (blocs, galets et graviers). En fait, la principale érosion recensée sur le secteur S3 (qui représente environ la moitié des matériaux produits) produit essentiellement des blocs très grossiers qui dépassent largement la compétence du cours d'eau, si bien qu'ils ne contribuent pas à la recharge sédimentaire. Pour les raisons évoquées ci-dessus, le secteur S2 doit également fournir des sédiments de taille très variée (colluvions), dont une part importante de sédiments très grossiers (blocs) même si cela n'apparaît pas sur les figures 6 et 7. Pour les secteurs S4 à S6, la production est mixte.



* valeur sous-estimée (apports de versants indéterminés)

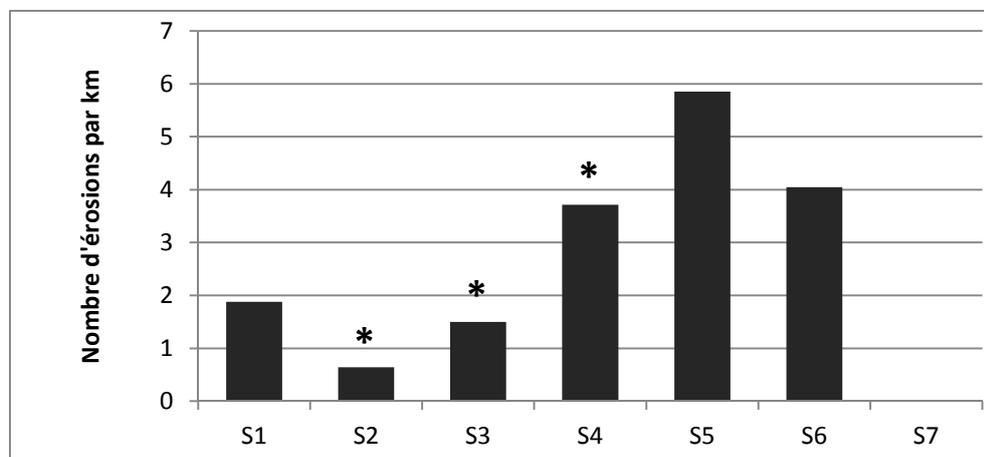
Figure 6 : surface efficace des érosions (S_e.I_e) et type de matériaux produits



* valeur sous-estimée (apports de versants indéterminés)

Figure 7 : densité efficace des érosions (S_e.I_e/L) et type de matériaux produits

Enfin, le nombre d'érosions par kilomètre de cours d'eau montre une différence assez nette de la taille des formes d'érosions entre les secteurs amont et les secteurs aval (**figure 8**). Les premiers présentent une grande proportion de petites érosions, alors qu'en aval, les érosions sont généralement moins fréquentes mais de taille plus importante.



* valeurs sous-estimées (apports de versants indéterminés en S2 ; certaines érosions de berges discontinues ont été considérées comme une seule forme d'érosion en S3 et S4)

Figure 8 : nombre d'érosions par kilomètre de cours d'eau

Le second constat concerne donc l'**hétérogénéité de l'activité érosive des différents secteurs du bassin versant**. Globalement, les secteurs en aval du ruisseau d'Estalane (S1 à S3) fournissent plus de sédiments grossiers, et de manière plus concentrée (faible nombre d'érosion par kilomètre). Le secteur S1 se distingue en revanche des deux autres par des érosions de berges relativement plus productives et par une faible présence d'érosion de versants. Les secteurs amont (S4, S5 et S6) présentent une sensibilité intermédiaire aux érosions de berges. Ils se caractérisent également par des érosions plus fréquentes, mais de faible ampleur, et qui fournissent des sédiments mixtes ou fins. La diminution de la fourniture sédimentaire vers l'amont (S4 à S6) s'explique essentiellement par les différences d'apports des versants riverains.

2.3- Transit sédimentaire

2.3.1- Granulométrie des sédiments

Une analyse granulométrique fine de 7 atterrissements répartis sur les 4 premiers secteurs (la Muse en aval du ruisseau de la Muzette) a été réalisée. Les résultats de cette première série d'analyse nous montrent que les secteurs aval S1 et S2 présentent des particules plus grossières que les secteurs intermédiaires S3 et S4 (**tableau 7** : diamètres médians et maximums). Ils nous indiquent également que le tri (ou classement) des particules est faible voire très faible, c'est-à-dire que la distribution granulométrique des sédiments est très hétérogène. Ce résultat nous confirme que **les apports sédimentaires des versants sont prépondérants** (cf. paragraphe 2.2.2), les sédiments du lit étant d'autant plus hétérogènes que la part des colluvions augmente (à l'inverse, les cours d'eau alluviaux présentent des sédiments bien classés). C'est plus particulièrement le cas du secteur S2, comme l'indiquent à la fois le pourcentage de blocs, la taille importante des plus grosses particules et l'hétérogénéité des sédiments.

Secteur	Nombre d'échantillons	Diamètre médian (mm)	Diamètre maximum (mm)	Indice de tri de Folk & Ward (1957)	Classe de tri	Pourcentage de blocs
S1	1	50	268	1,83	faible	0%
S2	2	44	460	2,71	très faible	7%
S3	1	27	192	1,36	faible	2%
S4	3	35	248	2,07	très faible	1%
<i>Total / moyenne</i>	7	39	292	1,99		

Tableau 7 : résultats des analyses granulométriques de 7 atterrissements grossiers (méthode d'échantillonnage surfacique de type grid sampling selon Wolman 1954) - les blocs (diamètre > 512 mm) ne sont pas pris en compte dans le calcul du tri et des diamètres médians et maximums

Une deuxième série d'analyse a été réalisée à partir de données moins précises mais collectées de manière exhaustive sur les branches principales du réseau hydrographique. Tous les 250 m de cours d'eau, le pourcentage à la surface du lit des principales fractions granulométriques (blocs, galets, graviers, sables, limons) et des affleurements rocheux a été estimé. Ces mesures ont été effectuées systématiquement sur des faciès lotiques (de type radier essentiellement) représentatifs des conditions hydrauliques et du transport de la charge de fond. Les résultats sont résumés dans la **figure 9**, et l'on peut émettre les commentaires suivants :

- les affleurements constituent une part importante des faciès lotiques sur le secteur S2, et, dans une moindre mesure, sur les secteurs S3 et S6, en rapport avec la nature de leur fond de vallée (cf. paragraphe 1-Sectorisation et **figure 1**) ;
- les blocs (diamètre > 512 mm) sont omniprésents sur la totalité du linéaire parcouru et en proportion importante (13 à 32%). Ces particules ne sont mobilisées que lors de crues exceptionnelles, et sur de faibles distances ;
- la part des particules généralement considérées comme « utiles » au cours d'eau (graviers et galets) est relativement constante : 46 à 64% des particules potentiellement mobilisables (exclusion des affleurements) ;
- la part des sables, faible dans les secteurs aval (4 à 8% en S1 et S2), devient significative sur les secteurs amont (16 à 29% entre S3 et S7).

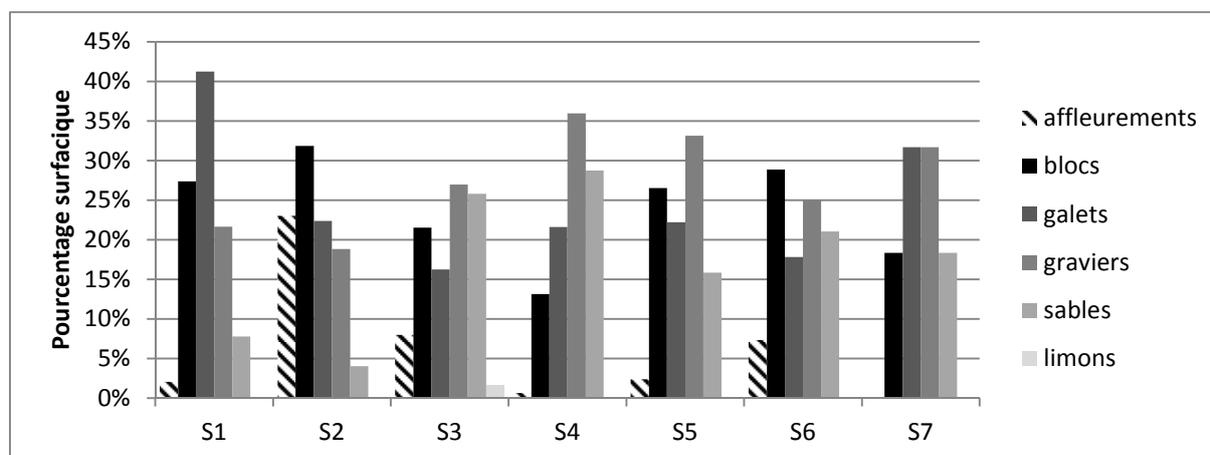


Figure 9 : pourcentage surfacique des principales fractions granulométriques et des affleurements rocheux sur les faciès lotiques

Les données présentées dans ce paragraphe ont permis de caractériser la nature granulométrique des sédiments du lit, et par conséquent le type de sédiments en transit dans les cours d'eau. Elles confirment les premières conclusions concernant la fourniture sédimentaire, c'est-à-dire qu'une partie importante des sédiments du lit provient des versants adjacents. Les colluvions sont de taille très variée, des limons aux blocs métriques (voire plus), ce qui confère aux distributions granulométriques une hétérogénéité élevée. La part des particules sableuses dans les faciès lotiques met également en évidence une différence très nette entre les secteurs S1 et S2 d'une part, et les secteurs amont d'autre part, vis-à-vis du phénomène d'ensablement. Ce thème sera abordé intégralement dans le paragraphe 3-Ensablement.

2.3.2- Inventaire des atterrissements

L'inventaire de terrain a permis de mesurer et de localiser la totalité des dépôts de sédiments : 528 atterrissements (ou accumulations) compris entre 0,02 et 95 m³. Les **volumes des atterrissements** (V_a en m³) permettent d'apprécier les quantités de sédiments actuellement en transit dans les branches principales du réseau hydrographique (**figure 10**). L'analyse des **densités des accumulations** (V_a/L en m³/km) permet encore une fois de tenir compte des différences de longueur entre secteurs (**figure 11**). On peut encore rapporter ces densités à la largeur moyenne du lit (en m²/km) pour s'affranchir pleinement de l'effet de taille des secteurs (**figure 12**).

Chaque atterrissement a également été caractérisé par un **indice de mobilité** I_m afin de pouvoir appréhender les conditions de transit des sédiments (1=mobile ; 3=figé), et par un **type granulométrique** (dominance de sédiments sableux, dominance de sédiments grossiers, ou granulométrie mixte).

Secteur	Nombre d'accumulations N_a	Nombre d'accumulations par km N_a/L	Volume stocké V_a (m ³)	Densité des accumulations V_a/L (m ³ /km)	Densité par unité de largeur (m ² /km)	Indice de mobilité I_m
S1	79	19	433	102	12,3	1,40
S2	168	27	675	108	14,4	1,35
S3	46	12	97	24	4,0	1
S4	114	16	322	46	11,7	1,10
S5	61	14	117	26	8,4	1,10
S6 - Muzette	56	17	59	18	7,2	1
S7 - Brinhac	4	4	1,1	1,1	0,6	1
<i>Total / moyenne</i>	528	18	1 704	57	10,8	

Tableau 8 : synthèse des principaux résultats sur les atterrissements recensés sur les branches principales du réseau hydrographique

Les volumes les plus importants sont stockés dans les secteurs S1 et S2 (**figures 10 et 11**) mais ils correspondent également à un indice de mobilité légèrement plus élevé. Ces secteurs ne présentent pas de déficit sédimentaire : aucun phénomène de pavage ou d'incision n'est observé. Néanmoins, la plus faible mobilité des atterrissements indique qu'une partie de ces sédiments ne participe pas ou peu au transit sédimentaire, ce qui conduit à nuancer l'importance des volumes en transit dans ces secteurs aval.

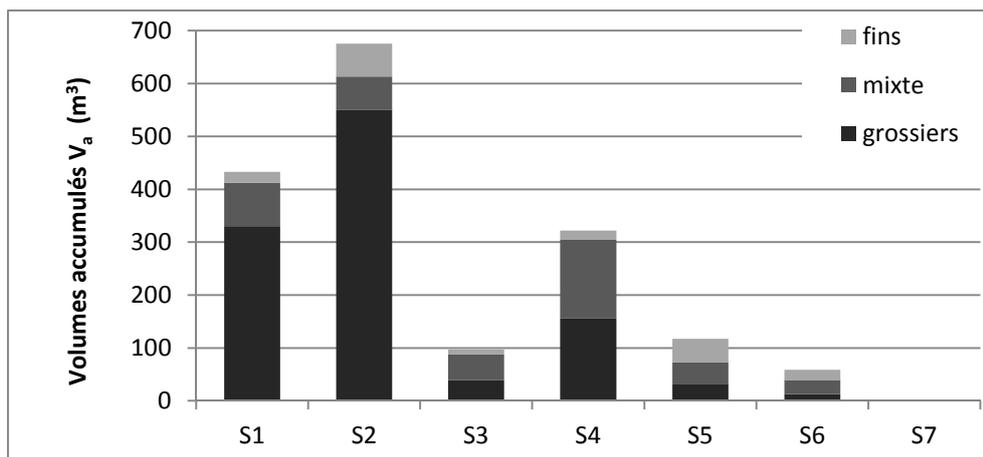
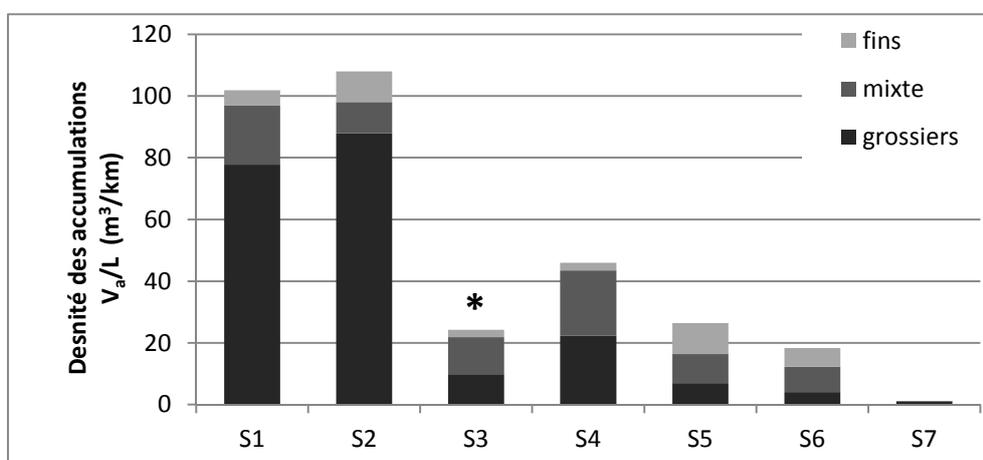
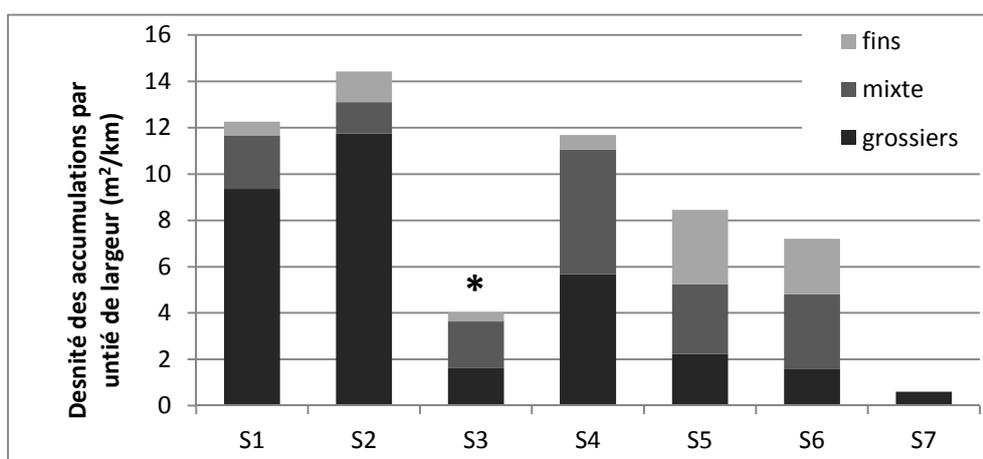


Figure 10 : volume des atterrissements et type de matériaux stockés



* si l'on écarte les tronçons sous l'influence des nombreuses chaussées (remous solide qui fausse l'analyse en augmentant artificiellement la hauteur d'eau), on obtient une densité moyenne de 33 m³/km

Figure 11 : densité des atterrissements et type de matériaux stockés



* si l'on écarte les tronçons sous l'influence des nombreuses chaussées (remous solide qui fausse l'analyse en augmentant artificiellement la hauteur d'eau), on obtient une densité unitaire moyenne de 5,5 m²/km

Figure 12 : densité des atterrissements par unité de largeur et type de matériaux stockés

Pour le secteur S1, la valeur moyenne des volumes accumulés est peu représentative car il faut distinguer 3 portions de cours d'eau très contrastées :

- le tronçon aval (100 derniers mètres) contient à lui seul 18% des volumes déposés en raison de l'influence particulière de la confluence avec le Tarn (forte diminution de la pente de la ligne d'eau, voire reflux d'une partie des débits liquides et/ou solides du Tarn) ;
- les tronçons les plus amont (environ 1 500 m) contiennent près de la moitié des dépôts du secteur, soit une densité de **125 m³/km** et une densité unitaire de **15 m²/km** (toutes deux supérieures aux valeurs moyennes du secteur S2). Ces valeurs élevées s'expliquent à la fois par la pente, la géométrie et la position géographique de ces tronçons : la faible pente du secteur S1 entraîne le dépôt d'une partie des apports relativement importants du secteur précédent (S2) ; de plus, ces tronçons présentent un rapport largeur/profondeur nettement plus élevé que les tronçons aval, ce qui favorise davantage le dépôt de la charge solide en transit par étalement de la lame d'eau ;
- les tronçons intermédiaires (environ 2500 m) représentent alors des quantités relativement faibles par rapport à la moyenne du secteur (volume brut : 167 m³, densité : **67 m³/km**, densité unitaire : **8,1 m²/km**), et dont 33% sont constitués de deux atterrissements quasiment figés ($I_m=3$).

Dans le cas du secteur S2, les volumes élevés s'expliquent notamment par la taille très importante d'une partie des sédiments fournis par les versants qui dépassent la compétence du cours d'eau (*taille maximale de particule que le cours d'eau est capable de mobiliser*). Malgré la forte pente de ce secteur, la morphologie complexe du lit favorise également le dépôt des sédiments dans des zones où la force des écoulements est réduite (à l'amont des seuils naturels et des embâcles importants, derrière les blocs métriques...). Les grandes quantités de sédiments stockés traduisent donc à la fois un transit sédimentaire important, lié à la forte énergie des écoulements de ce secteur, et des conditions de transport particulières qui favorisent le piégeage d'une partie des particules en transit.

Comme pour les formes d'érosions, on observe un gradient très net entre les secteurs S4 et S7, de l'amont vers l'aval. Le secteur S7 est quasiment dépourvu d'atterrissements. L'augmentation des volumes et densités des atterrissements vers l'aval (de S7 à S4) est à mettre en rapport à la fois avec :

- l'augmentation de la fourniture sédimentaire qui entraîne une augmentation des volumes transportés ;
- l'évolution des conditions hydrauliques (diminution de la pente et augmentation du rapport largeur/profondeur) qui favorise le dépôt des sédiments transportés depuis l'amont.

Le secteur S3 présente quant à lui des volumes particulièrement faibles. On pourrait supposer que la capacité de transport relativement faible du secteur S4 (1,0% de pente) limite la fourniture sédimentaire vers le secteur S3 qui présente potentiellement une plus grande aptitude à évacuer les sédiments (pente de 1,5%). Néanmoins, la forte densité des seuils artificiels (ou chaussées ; hauteur de chute cumulée de 20,2 m) tend à diminuer la pente naturelle du cours d'eau, de telle manière que la pente moyenne de la ligne d'eau en S3 est égale à celle de S4. L'explication réside probablement dans les quantités et la nature des sédiments fournis par les érosions dans ce secteur. Comme nous l'avons décrit dans le paragraphe précédent, la fourniture sédimentaire est relativement plus élevée dans ce secteur par rapport aux autres. Il n'en reste pas moins qu'elle est faible en valeur absolue, et surtout qu'une grande partie des sédiments fournis sont soit trop fins, soit trop grossiers pour contribuer à la recharge sédimentaire du cours d'eau.

2.4- Embâcles et bois mort

La densité de la ripisylve, qui correspond ici au pourcentage de longueur de rives occupées par une végétation arborée et/ou arbustive, est plus ou moins homogène sur le linéaire parcouru (**tableau 9 ; carte n°11**). **Les rives des branches principales du réseau hydrographique sont très majoritairement colonisées par une ripisylve dense voire moyenne, même si celle-ci ne constitue parfois qu'un simple liseré d'arbres et arbustes** (faible largeur). Ceci contribue à limiter le réchauffement de l'eau en période estivale et, dans une moindre mesure (étant donnée la faible largeur du cordon rivulaire par endroits), à maintenir une zone tampon vis-à-vis des polluants et des sédiments fins potentiellement fournis par les zones riveraines.

L'instabilité des arbres riverains est globalement assez faible, mais on remarque qu'elle est sensiblement plus importante sur la Muzette amont, sur la Muse en amont de Saint-Beauzély et entre Moulibez et Castelmus (**tableau 9 ; carte n°12**).

Secteur	Nombre d'embâcles	Nombre d'embâcles par km	Volume des embâcles (m ³)	Densité des embâcles (m ³ /km)	Instabilité des arbres riverains (%)	Densité de la ripisylve *
S1	38	8,9	585	14	8%	69%
S2	114	18,2	223	36	7%	80%
S3	17	4,3	71	18	6%	79%
S4	24	3,4	37	5	8%	75%
S5	63	14,2	111	25	12%	69%
S6 - Muzette	73	22,7	109	34	11%	89%
S7 - Brinhac	3	3,1	3	3	≤5%	65%
Total / moyenne	332	11,0	610	20	8%	76%

* la densité correspond au pourcentage de longueur de rives occupées par une végétation arborée et/ou arbustive

Tableau 9 : synthèse des principaux résultats sur les embâcles et la ripisylve

De nombreux embâcles ont été recensés dans les secteurs S2, S5 et S6 (**tableau 9 ; figure 13**). Pour ces deux derniers secteurs, l'importance des embâcles est liée à l'instabilité des arbres riverains engendrée par la relative mobilité latérale du cours d'eau (cf. paragraphe 2.5). Les faibles dimensions du chenal à pleins bords favorisent également la stabilité des débris ligneux introduits dans le lit. Pour le secteur S2, les embâcles ont principalement pour origine des introductions de bois mort (fûts et branches) depuis les versants très escarpés. La morphologie complexe du lit peut encore limiter le transport des débris ligneux.

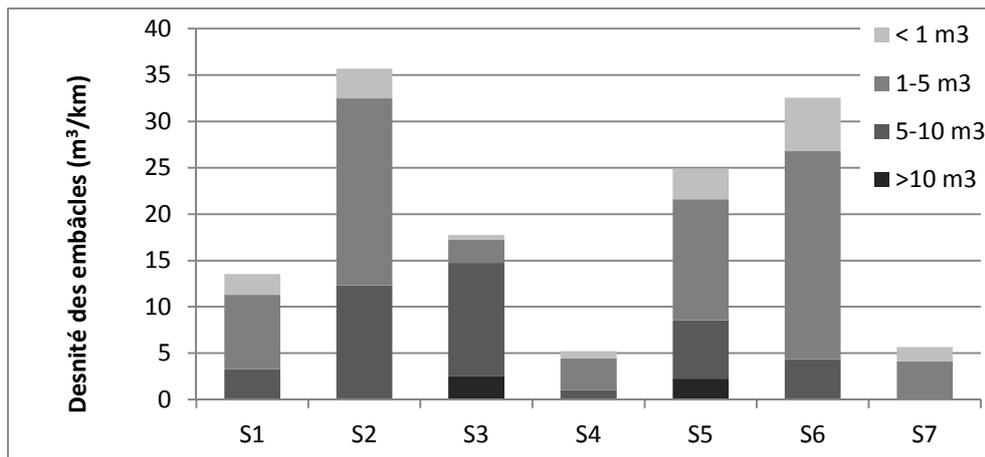


Figure 13 : densité des embâcles par catégorie de taille

2.5- Mobilité latérale

Deux approches ont été mises en œuvre pour étudier la mobilité latérale du cours d'eau :

- analyse de l'évolution des tracés à partir des photographies aériennes de 1948, 1978 et 2008 ;
- analyse de la stabilité actuelle des berges basée sur l'inventaire des érosions de berges, de la ripisylve (stabilité) et des aménagements.

2.5.1- Evolution diachronique des tracés

A partir des 3 séries de photographies aériennes (1948, 1978 et 2008), nous avons comparé les tracés en plan du cours d'eau sur les portions visibles. Ceux-ci sont restés remarquablement constants au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle : à l'exception de l'extrémité aval de la Muse (sur environ 150 m avant la confluence avec le Tarn) qui a progressivement migrée en direction de la rive droite, aucun déplacement significatif des branches principales du réseau hydrographique n'a été constaté. Cela traduit donc une **dynamique latérale quasi-inexistante**.

2.5.2- Stabilité actuelle des berges

Le **tableau 10** présente une synthèse des éléments qui caractérisent la mobilité latérale des branches principales du réseau hydrographique :

- la **fréquence des érosions de berges** (ou de bancs), exprimée en mètres de berges érodées par kilomètre de cours d'eau, traduit la dynamique latérale effective du cours d'eau (**carte n°14**). Contrairement au paragraphe 2.2-Fourniture sédimentaire, nous ne nous intéressons pas ici aux volumes mis en jeu par les érosions mais à la proportion de berges érodées qui témoigne davantage de la mobilité du lit ;
- la **fréquence des enrochements** : il faut tenir compte de ces aménagements de berges pour dissocier les contraintes naturelles des contraintes anthropiques et ainsi apprécier la dynamique latérale potentielle du cours d'eau. De plus, la présence d'enrochements témoignent souvent d'érosions antérieures ou d'un risque d'érosion important ;

- la **fréquence des murets** : nous avons recensé un grand nombre de murets en pierre, de longueur et de hauteur variables, sur le bassin versant de la Muse. Ces aménagements ne sont pas aussi efficaces que les enrochements en termes de protection de berges mais ils diminuent tout de même la mobilité du cours d'eau ;
- la **fréquence d'érosion des berges non aménagées** traduit la sensibilité des berges du cours d'eau qui ne sont pas protégées par des enrochements ou des murets (**figure 14**) ;
- le **rapport d'encaissement du fond de vallée** témoigne de la contrainte exercée par les versants sur la mobilité du lit (NB : la largeur du fond de vallée est basée sur la distance entre les deux versants opposés à +10 m au-dessus du fond de vallée ; cette mesure surestime la largeur réelle du fond de vallée, et donc le rapport d'encaissement, mais elle peut être utilisée à titre d'indicateur comparable d'un secteur à l'autre) ;
- la **présence d'alluvions récentes** témoigne encore des héritages géomorphologiques partiellement liés à la dynamique latérale du cours d'eau.

Secteur	Erosions de berge (m/km)	Enrochements (m/km)	Murets (m/km)	Erosions des berges non aménagées (m/km)	Rapport d'encaissement *	Présence d'alluvions en fond de vallée **
S1	36	0	83	39	10	continue
S2	6	13	46	7	8	non
S3	15	8	≈0	15	9	non
S4	45	47	26	49	34	continue
S5	30	40	126	36	27	continue
S6 - Muzette	27	0	0	27	27	discontinue
S7 - Brinhac	0	155	0	0	66	continue
Total / moyenne	26	26	47	28		

* le rapport d'encaissement représente le rapport entre la largeur du fond de vallée (estimée par la distance entre deux points des versants opposés situés à +10 m au-dessus du fond de vallée) et la largeur à pleins bords du cours d'eau ; ** source : carte géologique BRGM au 50 000^{ème}

Tableau 10 : caractérisation de la mobilité latérale des branches principales du réseau hydrographique

La fréquence des érosions de berges est en moyenne de 26 m/km (soit 1,3% des berges), ce qui témoigne d'une **dynamique latérale extrêmement faible**. Cette valeur augmente à peine si on exclut les berges aménagées (28 m/km soit 1,4% des berges) car l'emprise des protections de berges est limitée sur le linéaire parcouru. La plupart des enrochements sont très localisés (moins de 50 m de long). Seuls 3 enrochements sont implantés sur plus de 100 m de berges : le premier à Saint-Beauzély (130 m) entre les lieux-dits *Le Pont* et *La Muze* (S4) ; le deuxième (150 m prolongé par un muret d'environ 100 m) protège une route (en rive gauche) dans le village de Saint-Léons (S5) ; le troisième protège une route (en rive droite) sur 150 m en aval de la confluence entre les ruisseaux de Brinhac et des Landes (S7). A l'échelle du bassin versant, **ces aménagements ne constituent donc pas une contrainte significative vis-à-vis de la dynamique latérale des cours d'eau**.

Les secteurs les plus encaissés (S2 et S3) présentent logiquement une mobilité quasi-nulle. Il en est de même du secteur S7, pourtant potentiellement mieux disposé avec un rapport d'encaissement très faible et la présence d'alluvions dans le fond de vallée. Il présente néanmoins une pente élevée (3,2%)

qui favorise un tracé rectiligne, et la plus forte proportion d'enrochements. La **figure 14** et la **carte n°14** mettent en évidence une **dynamique latérale relativement plus élevée sur les secteurs S1, S4, S5 et S6**.

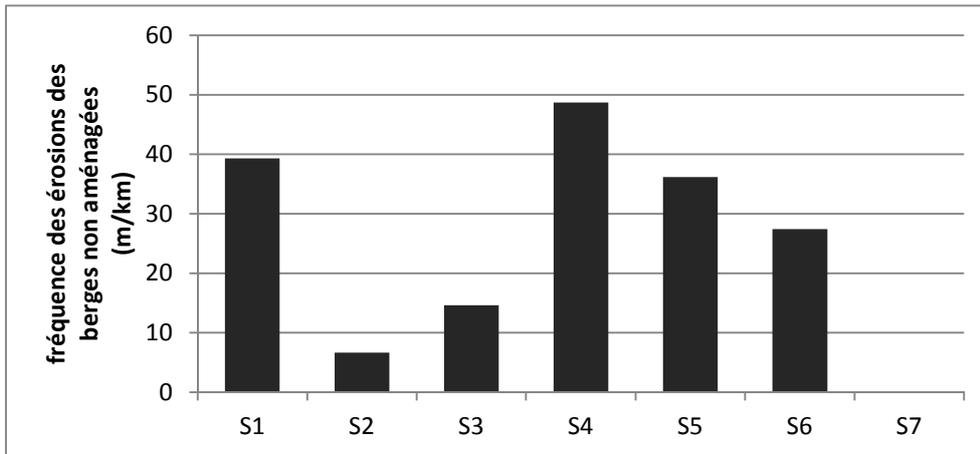


Figure 14 : sensibilité des berges à l'érosion (berges aménagées exclues)

3- Ensablement

L'ensablement peut être considéré comme le principal dysfonctionnement morphologique des cours d'eau du bassin versant de la Muse. Il a donc fait l'objet d'une attention particulière en vue de caractériser le degré d'ensablement des différentes portions du réseau hydrographique de manière objective (3.1- *Etat des lieux*) et d'expliquer ses origines (3.2- *Analyses exploratoires des causes de l'ensablement*).

3.1- Etat des lieux

3.1.1- Méthode

La méthode élaborée pour dresser un état des lieux de l'ensablement des cours d'eau repose sur deux échelles d'analyse.

La première échelle est l'unité morphodynamique (ou faciès d'écoulement), qui correspond à une portion de cours d'eau homogène du point de vue de la pente du lit, de la hauteur d'eau, des vitesses d'écoulement et de la granulométrie des sédiments (ex. : radier, mouille, rapide...) :

- l'évaluation de l'ensablement repose essentiellement sur l'analyse des faciès lenticques (mouilles ou plats lenticques) qui présentent un écoulement lent et une profondeur plus importante que les faciès lotiques (radiers, seuils, rapides...). Ce premier type de faciès est davantage représentatif de la fourniture sédimentaire amont en sédiments fins, et, dans une moindre mesure, de la qualité des habitats ;
- chaque faciès lenticque a été classé sur le terrain comme *ensablé*, *non ensablé* ou en *état intermédiaire*, le principal critère de classification étant la proportion de sables à la surface du lit, qui traduit son degré d'homogénéisation. Autrement dit, un faciès est considéré comme *ensablé* lorsque la part de sables et de granules (graviers très fins) devient largement majoritaire, ne laissant apparaître qu'une faible proportion de matériaux

grossiers (graviers fins à moyens, galets et blocs). Inversement, lorsque les matériaux sont majoritairement grossiers et/ou qu'ils présentent une variabilité satisfaisante, le faciès est considéré comme *non ensablé* ;

- le taux de comblement des faciès lenticles (rapport entre l'épaisseur des dépôts sableux et la profondeur), qui témoigne davantage des volumes accumulés, ainsi que l'ensablement des faciès lotiques (notamment pour prendre en compte la présence de sable interstitiel au sein de la matrice grossière), ont également été pris en compte de manière qualitative et à titre secondaire.

La seconde échelle est le tronçon de cours d'eau. Il s'agit de segments de cours d'eau d'une longueur minimale de 150 m :

- une note de 1 à 4 est attribuée à chaque tronçon selon la règle générale suivante :
 - o **1** : moins de 20% de faciès lenticles ensablés >>> **ensablement nul à faible**
 - o **2** : 20 à 40% de faciès lenticles ensablés >>> **ensablement modéré**
 - o **3** : 40 à 70% de faciès lenticles ensablés >>> **ensablement important**
 - o **4** : 70 à 100% de faciès lenticles ensablés >>> **ensablement très important**
- quelques tronçons ont ensuite été surclassés lorsque le taux de comblement des mouilles ou l'ensablement des faciès lotiques étaient importants ;
- cette méthode a été appliquée :
 - o de manière quasi-continue sur les branches principales du réseau hydrographique. La notation et la délimitation des tronçons homogènes en termes d'ensablement sont donc réalisées conjointement en fonction des discontinuités constatées ;
 - o de manière ponctuelle sur les affluents, l'état des lieux reposant sur une sélection de 51 tronçons de 150 à 300 m de longueur, sur lesquels 10 à 30 faciès lenticles ont été analysés (nombre variable en fonction de la diversité des conditions d'ensablement sur le tronçon). La majorité des tronçons échantillons a été sélectionnée sur les affluents de rive droite plus sensibles et plus vulnérables à l'ensablement (socle cristallin, hydrologie plus propice à la vie piscicole).

3.1.2- Résultats

La **carte n°15** représente l'état des lieux de l'ensablement du réseau hydrographique.

Elle montre un **net gradient du degré d'ensablement des cours d'eau de l'aval vers l'amont des branches principales**. La Muse en amont du ravin de Bouscayrols et la Muzette sont particulièrement affectées par l'ensablement avec une grande majorité de faciès lenticles ensablés. En aval, le degré d'ensablement décroît pour devenir tout à fait satisfaisant (note=1) à partir de la confluence avec le ruisseau de Rivaldiès (limite approximative), à l'exception de quelques tronçons légèrement plus ensablés (essentiellement notés à 2). Les tronçons aval des ruisseaux de Brinhac et des Landes sont également peu ensablés.

Ces résultats confirment **l'ensablement important des principaux affluents de rive droite, particulièrement dans leur partie amont, sur le plateau**. Un gradient aval-amont assez net s'observe donc également sur certains de ces affluents. L'augmentation de la pente des cours d'eau vers l'aval est à l'évidence en partie responsable de l'amélioration des conditions d'ensablement (ex. : Brinhac, Landes, Falguières, Fouyrouse, Rivaldiès).

En revanche, les affluents de rive gauche (par ailleurs rarement en eau lors de nos visites sur le terrain en été 2010) ne sont pas ensablés à l'exception de l'affluent de la source ferrugineuse (vers le Moulin de Cambon) en aval des barres rocheuses en grés.

3.2- Analyses exploratoires des causes de l'ensablement

Pour comprendre et expliquer la dynamique d'ensablement des cours d'eau du bassin, nous avons adopté deux approches complémentaires :

- analyse de la sensibilité à l'érosion des sols du bassin, de son évolution au cours des dernières décennies et de ses implications pour la fourniture en sédiments sableux au réseau hydrographique ;
- analyse multicritère sur les caractéristiques des sous-bassins (topographie, occupation des sols, drainages) pour mettre en évidence les facteurs les plus discriminants vis-à-vis de leur degré d'ensablement. A ce titre, un inventaire exhaustif des drainages agricoles implantés dans les fonds de vallée des affluents de rive droite (au nord et à l'ouest) a été réalisé par les techniciens de l'Agence de l'eau, du PNRGC et du Conseil Général (cf. page 40).

3.2.1- Erosion des sols

3.2.1.1- Présentation préalable des facteurs contrôlant l'érosion des sols

Les facteurs qui interviennent dans l'érosion des sols et la production de sédiments sableux se composent de deux grandes catégories :

- les facteurs internes au système fluvial, fixes dans le temps (à une échelle annuelle ou décennale), qui déterminent la sensibilité intrinsèque du bassin à l'érosion :
 - o les pentes des versants qui conditionnent la vitesse des eaux de ruissellement et donc l'érosion et le transport des particules du sol ;
 - o l'érodibilité des sols qui dépend essentiellement de leur stabilité structurale. Celle-ci dépend à son tour en partie de l'occupation des sols qui influence les conditions de la pédogenèse, si bien que l'érodibilité n'est théoriquement pas un paramètre interne au système étudié. Néanmoins, les processus pédologiques sont lents et on peut considérer que les modifications récentes de l'occupation des sols n'ont pas significativement modifié l'érodibilité des sols ;
 - o la propension des sols à fournir des sédiments sableux : quels que soient les volumes érodés, la nature des sédiments produits dépend de la texture plus ou moins sableuse des sols ;
- les facteurs externes qui peuvent évoluer en fonction des contraintes exercées par l'homme et le climat :
 - o l'occupation des sols qui influence profondément la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations (donc le ruissellement de surface) ainsi que la sensibilité des sols aux phénomènes de battance et d'érosion par ruissellement (fonction de la densité de la couverture végétale) ;
 - o les pratiques culturales et autres pressions anthropiques (prélèvements d'eau, irrigation, drainage, direction des labours, remembrements, cultures en terrasse, construction de routes et de pistes, utilisation d'engrais...) qui modifient à la fois les

conditions pédologiques des sols (humidité, stabilité, texture...) et la circulation des eaux au sein des parcelles ;

- le climat qui influence de manière complexe la plupart des éléments précédemment cités.

De plus, l'impact de la production sédimentaire au niveau des versants sur l'ensablement des cours d'eau dépend encore de :

- la connexion des versants au réseau hydrographique qui conditionne l'introduction dans les cours d'eau des sédiments érodés sur les versants ;
- la pente des cours d'eau qui contrôle leur capacité de transport.

3.2.1.2- Disponibilité des données sur le bassin versant de la Muse

La principale difficulté que nous avons rencontrée réside dans le manque de données à la fois exhaustives et précises sur les sols, de manière à déterminer leur érodibilité (et leur sensibilité à la battance). Ce paramètre est de plus le plus difficile à évaluer. La méthode d'évaluation proposée par l'INRA et le BRGM (Cerdan et al. 2006) dans le cadre des études de zonage de l'aléa érosion repose par exemple sur le taux de pierrosité, la texture, la teneur en matières organiques et la teneur en fer.

Trois sources de données potentielles ont été prospectées et/ou analysées :

- les données du programme *IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols)* qui prévoit l'établissement d'un Référentiel Régional Pédologique au 250 000^{ème} (résolution requise par les méthodes développées par Le Bissonais et al. 2004, Antoni et al. 2006, Cerdan et al. 2006) sur l'ensemble de la France : ce programme n'a pas encore été mis en œuvre dans le département de l'Aveyron ;
- l'étude des *Grands Ensembles Morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées* au 500 000^{ème} (Chambre Régionale d'Agriculture) : fournit des descriptions de sol partielles (tous les éléments nécessaires à l'évaluation de l'érodibilité et de la battance ne sont pas renseignés), non exhaustives (tous les types de sols n'ont pas été analysés) et non géoréférencées (pas de cartographie des différents types de sols au sein de chaque ensemble morpho-pédologique) ;
- les *Schémas Communaux d'Assainissement* établis sur les communes de Castelnaud-Pégayrols, Saint-Beauzély et Montjaux qui reposent sur des campagnes de sondage de terrain et d'analyses granulométriques des sols : tous les éléments nécessaires à l'évaluation de l'érodibilité et de la battance ne sont pas renseignés et les sondages se sont restreints aux zones d'urbanisation.

Les données actuellement disponibles sur le territoire sont donc insuffisantes, autant d'un point qualitatif (éléments de caractérisation des sols) que d'un point de vue quantitatif (exhaustivité), pour appliquer les méthodes existantes pour analyser la sensibilité à l'érosion des sols.

3.2.1.3- Modèle d'érosion établi : paramètre retenus pour la modélisation

Les modèles d'érosion des sols existants (ex. : USLE, MESALES, STREAM) n'ont pas pu être appliqués au bassin versant de la Muse car ils reposent en grande partie sur l'évaluation de l'érodibilité et, parfois, de la battance des sols (*cf.* paragraphe précédent). Par ailleurs, ils ne sont pas totalement adaptés à la problématique de l'étude. D'une part, ces modèles ont été établis pour estimer les pertes de sols sans tenir compte de la granulométrie des produits de l'érosion. D'autre part, ils n'intègrent généralement

pas le devenir des particules arrachées au sol et leur possibilité de stockage sur les versants ou d'introduction dans le réseau hydrographique. Dans la mesure où l'érosion des sols n'est pas l'objet final de l'étude, mais un élément à prendre en compte dans l'analyse de l'ensablement des cours d'eau, il est nécessaire d'intégrer à la fois la propension des sols à produire des sédiments sableux et la connexion des parcelles au réseau hydrographique pour rendre compte des apports en matériaux sableux depuis les versants.

Nous avons donc établi un modèle qui repose sur les paramètres suivants :

1^{er} – Pentés des versants (P) : calculées à partir d'un MNT d'environ 22 m de résolution (MNT ASTER produit par la NASA). Le coefficient P représente la valeur de pente en m/m.

2^{ème} – Teneur en sables dans les sols (T) : le **tableau 11** présente les coefficients théoriques T appliqués aux sols en fonction de la nature lithologique des roches sous-jacentes (source : carte géologique BRGM au 50 000^{ème}). Le principe d'une évaluation de la teneur en sables en fonction uniquement de la lithologie est discutable. Néanmoins, outre le manque de données sur les sols qui impose une estimation théorique, cette approche repose sur les liens étroits entre la nature de l'altérite produite par l'érosion d'une roche et les sols. Notre évaluation repose essentiellement sur la teneur en quartz des roches : plus une roche est riche en quartz, plus elle est propice à produire une altérite sableuse. Les analyses de sols réalisées dans le cadre des zonages d'assainissement (*Schémas Communaux d'Assainissement* établis sur les communes de Castelnau-Pégayrols, Saint-Beauzély et Montjaux) et de la définition des *Grands Ensembles Morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées* ont partiellement permis de valider les types de texture rencontrés. Un coefficient nul a été appliqué aux éboulis et aux alluvions récentes, constitués d'un mélange de roches érodées en amont, car leur teneur en sables est variable (en fonction des différentes roches composant les dépôts).

Dénomination BRGM (simplifiée)	Type de roche ou formation	Teneur en quartz	Coefficient T pour la teneur en sables
gneiss œillé	métamorphique	+++	10
granite migmatique	métamorphique	+++	10
migmatite	métamorphique	+++	10
leptynite	métamorphique	+++	10
paragneiss fin	métamorphique	+++	10
grés (et marnes subordonnées) du Trias	sédimentaire	+++	10
gneiss à amphibole	métamorphique	++	6
micaschiste	métamorphique	++	6
shales et grés de l'Autunien	sédimentaire	++	4
éclogite	métamorphique	+	3
éclogite amphibolitisée	métamorphique	+	3
amphibolite	métamorphique	+	3
cornéenne d'Estalane	métamorphique	+	3
dolomies et calcaires dolomitiques de l'Hettangien	sédimentaire	-	1
calcaires et dolomies du Sinémurien	sédimentaire	-	1
basalte	volcanique	-	1
terra rossa (argile de décalcification)	formation superficielle	-	1
éboulis et alluvions récentes	formation superficielle	variable	0

Tableau 11 : coefficient T représentant la teneur en sables des sols en fonction de la nature lithologique des roches sous-jacentes

3^{ème} – Occupation des sols (O) : un coefficient a été fixé aux 7 catégories d'occupation des sols sur la base des taux d'érosion rapportés par divers ouvrages bibliographiques (**tableau 12**) : les taux d'érosion varient généralement d'1 ordre de grandeur lorsque l'on passe d'un couvert forestier dense à un couvert végétal peu dense, et de 2 ordres de grandeur lorsque l'on passe à une surface cultivée. Pour simplifier l'analyse, les surfaces artificielles (2,8% du bassin), très hétérogènes, ont été exclues (coefficient égal à 0).

Occupation des sols	Coefficient O
Boisements denses	1
Boisements peu denses	5
Landes, friches et prairies permanentes	10
Surfaces cultivées	100
Surfaces artificielles	0
Roche nue	0
Plan d'eau	0

Tableau 12 : coefficient O représentant l'influence de l'occupation des sols sur l'exposition des sols à l'érosion

4^{ème} – Connexion au réseau hydrographique : une zone de 100 m de part et d'autre des branches du réseau hydrographique (soit une épaisseur totale de 200 m) a été considérée pour ne retenir que les parcelles dont les produits d'érosion sont susceptibles d'être introduits dans les cours d'eau.

3.2.1.4- Principe de la modélisation

Le principe de la modélisation est présenté dans la **figure 15**. Le premier résultat représente la sensibilité intrinsèque des sols à la production de sables par érosion (**carte n°16**). Dans un deuxième temps, on intègre l'occupation des sols (coefficient O) pour évaluer la production de sables en 1948, 1978 et 2008 (**carte n°17**). Le score obtenu par multiplication des coefficients, P, T et O n'a pas de signification volumétrique : il s'agit d'un indicateur sans unité qui permet de comparer l'intensité de la production de sables entre ces 3 dates. Un score de 1 correspond par exemple à la production d'un sol à faible teneur en sables (T=1), avec un couvert végétal dense (boisement dense soit O=1) sur une pente de 100% (P=1 en m/m). Dans un troisième temps, les surfaces éloignées du réseau hydrographique sont exclues pour évaluer la fourniture sableuse depuis les parcelles connectées au réseau hydrographique (**carte n°18**).

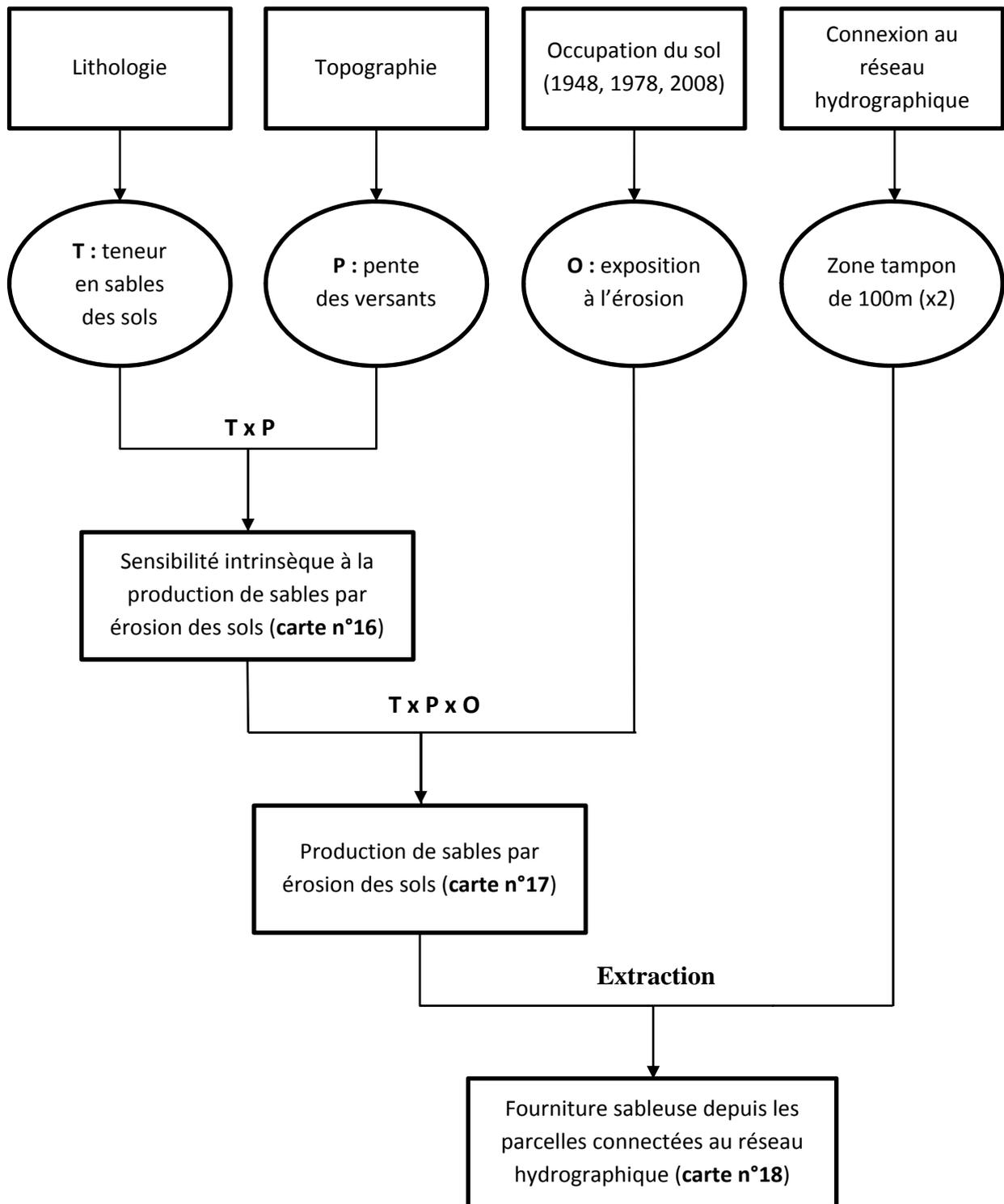


Figure 15 : principe du modèle établi pour évaluer la production et la fourniture sédimentaire sableuse par érosion des sols en 1948, 1978 et 2008

3.2.1.5- Résultats

Les résultats des trois étapes de calcul sont présentés sur les **cartes n°16, 17 et 18** et résumés dans les **tableaux 13 et 14**.

A l'échelle du bassin versant, on observe une diminution progressive du score obtenu par la modélisation, quelle que soit les surfaces considérées (avec ou sans exclusion des parcelles éloignées du réseau hydrographique) (**tableau 13**). En fait, la diminution est plus forte dans les zones situées à proximité des cours d'eau du fait du reboisement important des versants les plus escarpés du bassin versant, qui font la jonction entre les zones de plateaux et les fonds de vallée (cf. paragraphe 2.3). **La tendance globale de ces dernières décennies est donc clairement à la baisse des apports sableux aux cours d'eau par érosion des sols, dans les limites du modèle utilisé.**

La première source d'erreur du modèle réside dans l'évaluation de la teneur en sables des sols et dans l'absence de données relatives à l'érodibilité des sols (ou sensibilité à l'érosion liée à la stabilité texturale des sols). Néanmoins, on peut considérer que ces erreurs sont reproduites de manière analogue sur les 3 dates étudiées, si bien que les estimations sont comparables entre elles. **La deuxième source d'erreur correspond à la non prise en compte des pratiques culturales et autres pressions anthropiques** (prélèvements d'eau, irrigation, drainage, direction des labours, remembrements, cultures en terrasse, construction de routes et de pistes, utilisation d'engrais...) qui modifient à la fois l'érodibilité des sols et la circulation des eaux (voire celle des matériaux solides). Il faut également rappeler que **les données d'occupation des sols obtenues par photo-interprétation ne tiennent pas compte de la conversion de la majorité des prairies permanentes en prairies temporaires entre 1979 et 2000** (Recensement Général Agricole ; cf. paragraphe 2.4), ce qui constitue une troisième source d'erreur.

date / période	Score de production de sables sur l'ensemble du bassin versant *	Score de production de sables pour les parcelles connectées au réseau hydrographique **
1948	55,5	53,2
1978	46,5	41,4
2008	41,7	33,6
1948-1978	-16%	-22%
1978-2008	-10%	-19%
1948-2008	-25%	-37%

Les scores correspondent à une moyenne par pixel ; * évaluation de la production de sables par érosion des sols ; ** évaluation de la fourniture sédimentaire sableuse aux cours d'eau (la plupart des matériaux érodés sur les versants ne parviennent pas au réseau hydrographique)

Tableau 13 : synthèse des résultats de la modélisation de la production de sables par érosion des sols

A l'échelle des sous-bassins, la diminution globale évoquée ci-dessus reste valable dans la majorité des cas. On dénombre seulement 9 sous-bassins qui présentent une augmentation de score durant l'une des périodes étudiées (1948-1978 ou 1978-2008) (**tableau 14**). Seules les parcelles riveraines du ravin de Bouscayrols présentent un solde positif sur les 2 périodes et celui n'est pas significatif (faible augmentation de la production sur un sous-bassin déjà peu producteur). **Quatre ruisseaux montrent néanmoins une augmentation notable durant la dernière période (1978-2008) : Muzette amont (23b),**

Sagette (24b), Muse amont (25) et Coste Cave (23a). Il s'agit donc des principaux affluents de la Muzette et de la Muse en amont de leur confluence.

Sous-bassin	Evolution du score de production de sables sur les parcelles connectées au réseau hydrographique			score moyen en 2008
	1948-1978	1978-2008	1948-2008	
9 - Fouyrouse	-11,7	1,0	-10,7	56,5
17 - Rivaldiès	5,3	-6,9	-1,6	27,3
18 -	5,1	-12,1	-7,0	14,6
19 - Brinhac aval	4,9	-23,4	-18,6	26,9
22 - Bouscayrols	1,7	-1,0	0,7	6,9
23a - Coste Cave	-30,4	5,3	-25,1	101,6
23b - Muzette amont	-18,5	12,3	-6,2	45,9
24b - Sagette	-22,5	8,4	-14,1	64,7
25 - Muse amont	-15,3	4,8	-10,5	51,8
<i>bassin entier</i>	-11,7	-7,8	-19,5	33,6

Les scores correspondent à une moyenne par pixel

Tableau 14 : progression de la production de sables par érosion des sols sur quelques sous-bassins- les valeurs en gras mettent en évidence les augmentations (évolutions positives)

On peut encore s'intéresser plus finement aux évolutions spatiales liées à la nouvelle répartition des catégories d'occupation du sol (cf. paragraphe 2.3). La **carte n°19** permet de localiser les évolutions de la fourniture sableuse dans les différentes parties du bassin. On remarque qu'une partie des secteurs amont des ruisseaux de Brinhac, des Landes et de Rivaldiès montrent une évolution positive entre 1948 et 2008. C'est également le cas des ruisseaux de Sagette, de Fouyrouse, de Falguières, de la Muse amont, de la Muzette amont (et dans une moindre mesure Roubayrolles et Coste cave) sur les 3 dernières décennies (1978-2008).

En définitive, on observe donc **une nette diminution de la production sableuse globale si bien que les apports de sables à la Muse dans sa partie aval sont désormais largement inférieurs aux apports antérieurs.** En revanche, **l'augmentation de l'érosion des terres sur les têtes de bassin versant de la plupart des affluents de rive droite depuis 1978 favorise l'introduction de sédiments fins dans les tronçons amont du réseau hydrographique.**

3.2.2- Analyses statistiques multi-paramètres

Ce travail vise à mettre en évidence par les outils statistiques les paramètres responsables (ou explicatifs) de l'ensablement des affluents. Etant donné l'influence fondamentale de la lithologie, les affluents de rive gauche (peu ensablés) ont été exclus des analyses. Celles-ci reposent donc sur les 43 stations d'ensablement établies sur les affluents de rive droite (à l'ouest), ainsi que sur la Muse amont, Sagette et Roubayrolles (au nord).

Les paramètres examinés sont les suivants :

- la pente du cours d'eau ;
- la pente des versants ;
- la proportion des différentes classes d'occupation des sols ;
- le taux d'évolution des principales classes d'occupation des sols depuis 1978 (reboisement, mise en culture...) ;
- les drains agricoles implantés sur les parcelles connectées au réseau hydrographique (c'est-à-dire en contact direct avec les cours d'eau).

Dans un souci pratique, nous ne détaillerons pas l'ensemble des analyses réalisées mais nous présenterons les résultats les plus significatifs.

*N.B. : il s'est avéré impossible d'obtenir à partir des archives des informations précises sur l'ampleur et la localisation des travaux de drainages réalisés (contacts : Chambre d'Agriculture, Société d'Aménagement Foncier Aveyron-Lot-Tarn, DDT – Service de la Police de l'Eau, Association Départementale de Rénovation Agricole de l'Aveyron). L'intégration des données relatives aux drains repose sur un inventaire de terrain réalisé durant 12 jours en décembre 2010 et janvier 2011 par Céline Delagnes (PNRGC), Jérôme Bussière (PNRGC), Stéphane Sol (Conseil Général de l'Aveyron), Guillaume LECHAT (Agence de l'Eau) et Thibaut DORADO (Agence de l'Eau). **Cet inventaire a été réalisé de manière exhaustive dans les fonds de vallée des affluents de rive droite et sur la partie amont de la Muse, à l'exception des fonds de vallée boisés qui ne sont pas susceptibles d'être drainés, et uniquement sur les parcelles situées à proximité ou en contact direct avec le réseau hydrographique (carte n°21b).***

3.2.2.1- Corrélations simples entre et les caractéristiques des affluents et leur ensablement

a- Analyse graphique

Une première analyse graphique révèle que **quatre paramètres principaux peuvent expliquer le degré d'ensablement des cours d'eau (figure 16)**. Il s'agit de :

- la **pente du cours d'eau** qui contrôle l'énergie des écoulements donc leur capacité à évacuer les sédiments sableux ;
- l'importance des **boisements** (en % de la surface du bassin) qui filtrent les apports de sédiments fins depuis les versants (effet de peigne) ;
- l'importance des **terres cultivées** (en % de la surface du bassin) qui tendent au contraire à favoriser l'introduction de sédiments fins produits par le retournement des sols et leur érosion en phase non végétative (sols nus) ;
- l'importance des **drainages agricoles** (parcelles drainées et connectées au réseau hydrographique en % de la surface du bassin) qui sont suspectés d'accroître les apports de sédiments sableux depuis les terres cultivées, notamment en modifiant l'humidité des sols et donc leur érodibilité.

A mesure que les deux premiers paramètres augmentent, l'ensablement diminue. A l'inverse, les cours associées aux classes d'ensablement 3 et 4 (ensablement important à très important) sont davantage bordées de terres cultivées et de parcelles drainées (**figure 16**).

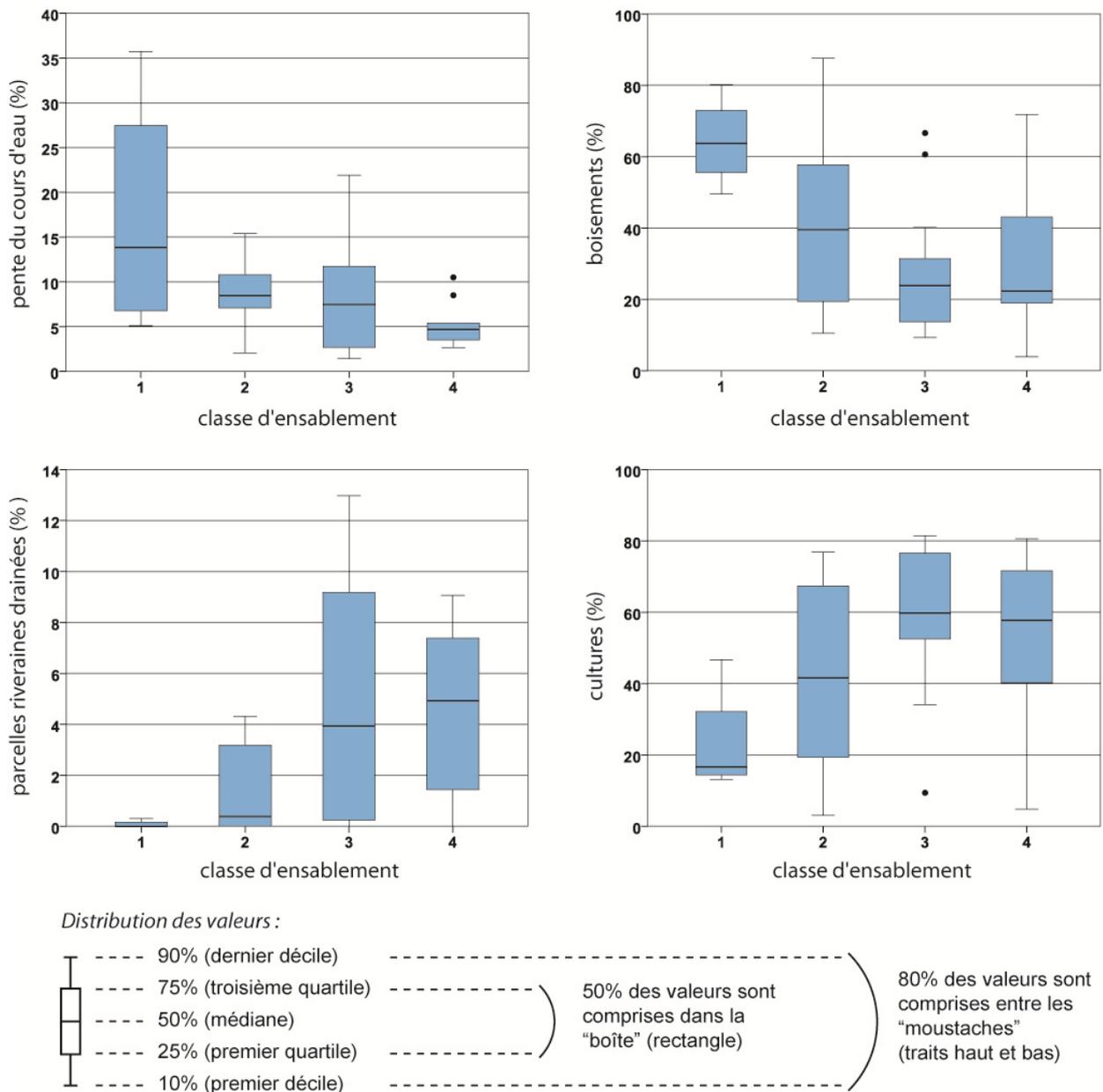


Figure 16 : graphiques en boîtes montrant la dispersion des 4 principaux paramètres explicatifs en fonction de la classe d'ensablement

b- Analyse de variance

Les relations suggérées ci-avant entre ces quatre paramètres et le degré d'ensablement se vérifient par les analyses de variance de Fisher-Snedecor (**tableau 15**). Ces analyses permettent de déterminer si les différences de pente et de versants boisés, cultivés ou drainés sont significatives entre chaque classe d'ensablement.

paramètre explicatif	intensité de la relation (% d'ensablement expliqué)	indice F de Fisher-Snedecor	significativité de la relation (risque d'erreur en %)
pente du cours d'eau	22%	2,87	< 5%
% boisements	25%	3,26	< 5%
% cultures	20%	2,54	< 10%
% drainages	25%	3,27	< 5%

Tableau 15 : résultats des analyses de variance pour les quatre paramètres explicatifs de l'ensablement

Le risque d'erreur associée aux relations simples entre chacun des quatre paramètres précédents et la classe d'ensablement sont faibles (*N.B.* : on accepte généralement un risque d'erreur de 10%). On peut donc conclure que **ces relations sont significatives, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas le fruit du hasard** mais que ces paramètres sont bien statistiquement corrélés à l'ensablement des cours d'eau.

En revanche, l'intensité des relations établies est relativement faible : les variations de pente et du pourcentage de boisements, de cultures et de parcelles drainées n'expliquent individuellement que 20 à 25% des différences d'ensablement observées entre les affluents de rive droite. Cela signifie qu'**aucun de ces paramètres ne permet à lui seul d'expliquer l'ensablement**. Par conséquent, on peut supposer que l'ensablement est contrôlé par l'interaction de plusieurs de ces paramètres, voire par d'autres paramètres non intégrés dans nos analyses (ex. : régime des crues, pratiques culturelles...).

Le paramètre le mieux corrélé à l'ensablement (donc théoriquement la « meilleure explication ») est le pourcentage de parcelles drainées connectées au réseau hydrographique. **Il faut néanmoins souligner que ces 4 paramètres sont étroitement liés entre eux étant donné l'organisation géographique du bassin versant de la Muse** : les zones de plateaux sont à la fois les moins pentues, les plus cultivées et donc les moins boisées ; ce sont également les plus drainées car l'importance des drainages agricoles augmente évidemment lorsque la part des terres cultivées augmente. **Autrement dit, à mesure que l'on descend vers l'aval, ces quatre paramètres évoluent conjointement de manière à limiter l'ensablement**. Les analyses réalisées ci-avant ne permettent donc pas de dissocier l'influence respective de chaque paramètre. Ceci est l'objet du paragraphe suivant.

3.2.2.2- *Corrélations multiples ou complexes*

Nous étudions ici l'influence relative de chacun des paramètres précédents sur l'ensablement.

a- Variance résiduelle

La première série d'analyse est une analyse de variance résiduelle, qui consiste à s'affranchir de l'influence fondamentale de la pente pour examiner l'influence des autres paramètres. Il s'agit de savoir si les effets apparents (d'après les résultats du paragraphe précédent) des boisements, des cultures et des parcelles drainées sont réels ou s'ils ne traduisent pas seulement l'évolution amont-aval de l'ensablement liée à l'augmentation de la pente vers l'aval.

Les résultats présentés dans le **tableau 16** indiquent que les 3 paramètres restants permettent d'expliquer les écarts observés entre les cours d'eau en termes d'ensablement même lorsque l'on élimine l'effet de la pente. Ils nous apportent donc deux informations :

- d'une part, cela confirme que **l'ensablement des cours d'eau dépend effectivement de ces 4 paramètres à la fois** ;
- d'autre part cela nous informe sur l'influence relative des 3 paramètres liés à l'utilisation et à l'occupation des sols : **les drainages expliquent davantage l'ensablement que les boisements et les terres cultivées.**

paramètre explicatif	intensité de la relation (% d'ensablement expliqué)	indice F de Fisher-Snedecor	significativité de la relation (risque d'erreur en %)
% boisements	18%	2,35	< 10%
% cultures	17%	2,16	≈ 10%
% drainages	26%	3,31	< 5%

Tableau 16 : résultats des analyses de variance résiduelle pour les trois paramètres secondaires

b- Régression logistique

La seconde série est une analyse de régression logistique. Elle consiste à établir un modèle de prédiction de l'ensablement (classes 1 et 2 : non ensablé ; classes 3 et 4 : ensablé) en fonction d'un certain nombre de paramètres explicatifs, puis à examiner l'influence de chacun de ces paramètres vis-à-vis de l'ensablement. Le **tableau 17** présente les résultats du meilleur modèle, obtenu en intégrant les 4 paramètres précédents. Cela confirme une fois de plus que l'ensablement est effectivement contrôlé par ces paramètres. Ces résultats montrent également que **le paramètre le plus influent serait l'importance des drainages, suivi de la pente du cours d'eau puis des boisements et enfin des cultures.**

paramètre / modèle	influence relative des paramètres *			qualité du modèle **		
	indice de Wald	significativité (risque d'erreur)	influence	taux de réussite des prédictions	significativité (risque d'erreur)	intensité (% expliqué)
% drainages	4,80	2,8%	forte			
pente	2,46	11%	moyenne			
% boisements	1,24	27%	faible			
% cultures	0,56	45%	faible			
modèle				79,1%	5,8%	45,7%

* l'influence de chaque paramètre est d'autant plus forte que le risque d'erreur (calculé en fonction de l'indice de Wald) est faible ; ** la qualité du modèle est évaluée d'après son taux de réussite (79,1% des observations sont reclassées avec succès dans leur catégorie *ensablé* ou *non ensablé*), sa significativité (estimée d'après le test de Hosmer-Lemeshow) et son intensité (la modèle explique 46% des variations d'ensablement d'après le r^2 de Nagelkerke)

Tableau 17 : résultats du modèle de régression logistique

3.2.2.3- Bilan sur l'approche statistique

Les résultats des analyses statistiques peuvent être résumés et commentés de la manière suivante :

- quatre paramètres permettent d'expliquer les différences d'ensablement des affluents de rive droite : la pente du cours d'eau, le pourcentage des parcelles drainées connectées au réseau hydrographique, le pourcentage du bassin versant boisé et le pourcentage du bassin versant cultivé ;
- l'importance des drainages ressort de chaque analyse comme étant le facteur le plus influent dans le degré d'ensablement des cours d'eau, nettement devant la part des boisements ou des cultures ;
- l'influence de la pente est néanmoins mal représentée par nos résultats car la relation pente-ensablement n'est pas linéaire ou proportionnelle : l'ensablement ne diminue plus ou peu lorsque l'on atteint des pentes très élevées (ex. : peu de différence à occupation du sol égale entre deux tronçons avec une pente de 20% et 30%) ; de plus, à mesure que la pente augmente, la morphologie des cours d'eau tend à s'organiser en séquences chute-cuvette plutôt qu'en séquences radier-mouille ou radier-plat, et les cuvettes favorisent davantage le dépôt des sédiments que les mouilles ou les plats.

Il convient donc de considérer la pente comme le principal facteur de contrôle de l'ensablement, qui traduit la capacité du cours d'eau à transporter ou à stocker les sédiments fournis depuis l'amont et depuis les versants adjacents.

Les drainages agricoles apparaissent comme le deuxième facteur permettant d'expliquer les différences d'ensablement entre les affluents. S'il est statistiquement démontré que les drainages ont un impact négatif sur l'ensablement, il est en revanche impossible d'expliquer pourquoi ou comment. De manière très générale, les sols secs sont néanmoins plus propices au ruissellement et à l'érosion sous l'effet des gouttes de pluie (« effet splash »).

Le taux de boisement et le taux de surfaces cultivées ont une influence plus faible.

Il faut préciser que ces analyses statistiques ne prennent pas en compte l'ensemble des facteurs pouvant influencer l'ensablement des cours d'eau. Aux résultats précédents peuvent donc s'ajouter des impacts liés aux pratiques culturales (irrigation, fréquence et sens des labours...), à un éventuel changement du régime des crues, ou aux exploitations forestières.

3.2.3- Problématique des avens

Les avens sont des cavités qui se forment dans le sous-sol par dissolution des formations calcaires par les eaux souterraines. Ils se développent donc généralement de manière naturelle dans les régions calcaires mais peuvent également être favorisés par certaines pratiques humaines.

Dans le bassin versant de la Muse, un petit aven est récemment apparu sur un affluent de la Muzette en aval de Castries (Saint-Laurent-de-Lévézou ; **figures 17a et 17b**). Celui-ci s'est formé après modification du tracé naturel du cours d'eau. En effet, pour faciliter l'exploitation de la parcelle agricole, le cours d'eau a été déplacé en limite de parcelle (au nord) si bien qu'il ne s'écoule plus dans le thalweg (**figure 17c**). Notons que ce déplacement pourrait être ancien. Toutefois, une partie des eaux s'infiltrer et

s'écoule souterrainement (de quelques décimètres à quelques mètres de profondeur seulement) en direction du thalweg. Ces eaux ont progressivement entraîné la dissolution du sol calcaire qui s'est alors effondré approximativement à mi-distance du chenal actuel (qui s'apparente à un fossé) et du thalweg.

Ce phénomène a donc clairement une origine humaine, récente ou ancienne, qui se répercute désormais à la fois sur la parcelle elle-même et sur le cours d'eau plus en aval. Nombreux témoignages rapportent que depuis la formation de cet aven, les eaux de la Muzette en aval sont très turbides (forte concentration en matières en suspension) après les évènements pluvieux.

Notons qu'il n'existe qu'une solution pour prévenir ou résoudre ce type de problème : respectivement maintenir ou rétablir le tracé naturel du cours d'eau.

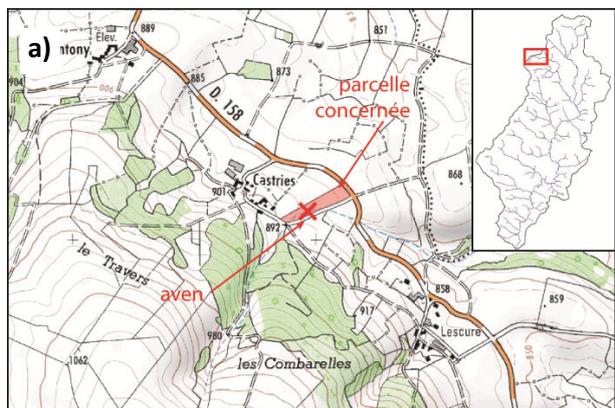
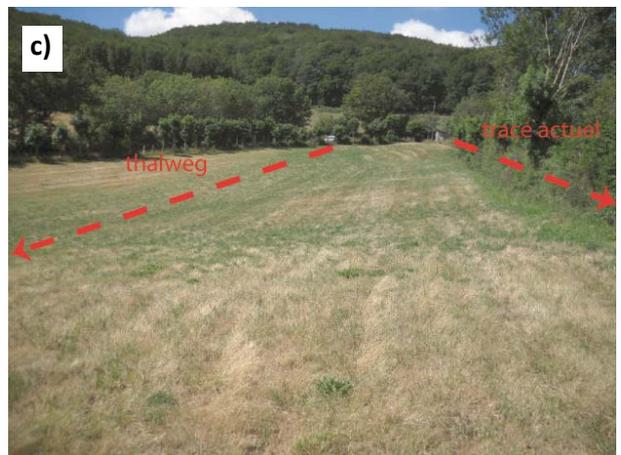


Figure 17 : aven en aval de Castries
a) plan de situation ;
b) l'aven au milieu de la parcelle ;
c) localisation du thalweg et du tracé actuel (le chenal est perché par rapport au thalweg)



ETUDE HYDROLOGIQUE

L'objectif de l'analyse hydrologique est de déterminer l'influence de l'évolution de l'occupation des sols sur l'hydrologie du bassin versant de la Muse. Elle se décompose en deux approches complémentaires :

- caractérisation hydrologique et météorologique du bassin versant ;
- analyse de l'évolution hydrologique du bassin au cours durant les dernières décennies.

1- Caractéristiques hydrométéorologiques du bassin versant

La Muse draine un bassin versant de 112 km², qui s'étend sur 30 km environ depuis le Tarn. L'altitude du bassin versant est comprise entre 325 m, à la confluence avec le Tarn et 1101 m au droit du Plateau du Lévézou (sur le territoire de la commune de Castelnau-Pégayrols).

La Muse prend sa source en amont de l'étang du Bois du Four.

1.1- Régime hydrologique

La Muse fait l'objet d'un suivi hydrologique, au droit de la station de St Hippolyte (sur la commune de Montjoux). Elle contrôle le débit de la Muse, en aval du bassin versant, au droit du franchissement de la RD47 au lieu-dit Saint Hippolyte, à Montjoux. Au droit de la station, le lit est composé de galets et peut donc être instable, pouvant entraîner des modifications des courbes de tarage en fonction des crues (ce point est confirmé par le service gestionnaire : DREAL Midi-Pyrénées).

Les principales caractéristiques de la station de mesure sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Station de mesure	Gestionnaire	Date de mise en service	Situation actuelle	Période d'observation	Bassin versant contrôlé	Altitude du zéro de l'échelle
La Muse à St Hippolyte	DREAL Midi-Pyrénées	01/01/1968	En service	1968-2010*	99,3 %	~330 mNGF

*1968 et 2010 sont des années incomplètes

Tableau 18 : caractéristiques de la station de la Muse à St Hippolyte

La rivière présente des fluctuations saisonnières des débits assez marquées. Il s'agit d'un régime pluvio-nival avec des périodes de hautes eaux en hiver, du fait des précipitations, et au début du printemps lors de la fonte des neiges et une période de basses eaux en été de juillet à début octobre.

Pour les besoins de l'étude, nous nous sommes procurés via la banque HYDRO :

- les maxima annuels des débits de pointe, soit un échantillon de 41 valeurs ;
- les débits moyens journaliers, soit un échantillon de 14610 valeurs pour les 41 années d'observation.

1.2- Pluviométrie locale

Au droit du bassin versant de la Muse, les seules données pluviométriques disponibles sont des données journalières, observées au droit d'une ancienne station pluviométrique, ouverte entre 1982 et 2000 à Saint-Beauzély. Cette station présente une période d'observation plus réduite que celle de la station hydrométrique.

Quelques stations pluviométriques avec de plus longues périodes d'observations sont situées à proximité du bassin versant de la Muse :

Station	Gestionnaire	Position	Mise en service	Situation actuelle	Période d'observation	Altitude
Saint-Beauzély	Meteo France	BV Muse	1982	Hors service	1982-2000	800 m
Salles-Curan	Meteo France	Ouest du BV	1947	En service	1947-2010	960 m
Vézins de Lévézou	Meteo France	Nord du BV	1953	En service	1953-1976 1976-2010	920 m 980 m
Viala du Tarn	Meteo France	Sud-Ouest du BV	1952	Hors service	1952-2000	295 m
Millau	Meteo France	Est du BV	1964	En service	1964-2010	714 m

Tableau 19 : caractéristiques des stations pluviométriques situées à proximité de la zone d'étude

La station de Vézins de Lévézou a été déplacée en 1976 mais il n'y a pas de discontinuité dans l'enregistrement des précipitations.

Pour la suite de l'étude, nous avons écarté le pluviomètre de Viala du Tarn, positionné à une altitude de 295 m environ, soit à une altitude inférieure à l'ensemble du bassin versant.

1.2.1- Recueil des données pluviométriques

Pour les besoins de l'étude, nous avons acheté auprès de Météo France les données pluviométriques suivantes :

- dans un premier temps, les valeurs maximales annuelles des pluies quotidiennes et le cumul annuel des pluies au droit des stations de Saint-Beauzély (38 valeurs), de Salles-Curan (124 valeurs), de Vézins de Lévézou (116 valeurs) et de Millau (92 valeurs), soit un nombre total de données de 370 ;
- dans un second temps, pour nous permettre d'approfondir l'analyse hydrologique, les pluies journalières au droit du pluviomètre de Vézins de Lévézou, de 1970 à 2009, soit un échantillon de 14 610 valeurs.

L'ensemble de ces données sera remise au PNRGC ainsi qu'aux partenaires financiers en fin d'étude.

1.2.2- Analyse des pluies annuelles et journalières

Nous nous sommes procurés auprès de Météo France les valeurs des maxima saisonniers des précipitations quotidiennes au droit des stations retenues. Des ajustements de Gumbel sur les valeurs

extrêmes journalières a permis d'estimer les pluies journalières pour différentes périodes de retour (**tableau 20**). La pluie journalière centennale n'a pas été estimée au droit du pluviomètre de Saint-Beauzély, du fait du nombre d'années d'observation insuffisant.

Station	Nombre d'années d'observation	Pluie moyenne annuelle (mm)	Pluie journalière décennale (mm)	Pluie journalière centennale (mm)
Saint-Beauzély	19	1102	91	-
Salles-Curan	62	1106	92	134
Vézins de Lévézou	58	1105	87	125
Millau	46	757	81	117

Tableau 20 : estimations des pluies journalières

A l'exception des valeurs obtenues à la station de Millau, les pluies calculées sont sensiblement identiques, à quelques millimètres près, au droit des 3 autres pluviomètres. Pour la suite de l'étude, nous retiendrons comme pluviométrie représentative du bassin versant de la Muse :

- **pluie annuelle moyenne : 1 105 mm ;**
- **pluie journalière décennale : 90 mm ;**
- **pluie journalière centennale : 125 mm.**

1.3- Données Pluviométriques à faible pas de temps

La station la plus proche du bassin versant fournissant des données horaires de précipitation se situe à Millau. Toutefois, la pluviométrie moyenne du bassin versant de la Muse est légèrement supérieure à la pluviométrie moyenne au droit de la station de Millau. Ainsi, les coefficients de Montana ont été ajustés à partir des données de pluie journalière calculées au droit du bassin versant étudié (**tableau 21**).

Période de retour	6 < t < 30 min		t > 30 min	
	a	b	a	b
T = 10 ans	250	-0,47	504	-0,67
T = 100 ans	365	-0,48	721	-0,68

Tableau 21 : coefficients de Montana retenus au droit du bassin versant de la Muse

1.4- Hydrologie de crue

1.4.1- Analyse des données au droit de la station de St Hippolyte

Une analyse statistique des maxima annuels des débits de pointe, par des ajustements de Gumbel, a permis de définir les débits de crue pour différentes périodes de retour. Le **tableau 22** synthétise les estimations obtenues.

Station	Taille de l'échantillon	Débit décennal (m ³ /s)	Débit centennal (m ³ /s)
La Muse à Saint-Hippolyte	41	40	80

Tableau 22 : débits décennal et centennal au droit de la station à St Hippolyte (estimation par ajustement statistique)

On notera que les différentes courbes de tarage qui se sont succédées depuis 1968 sont extrapolées à partir de débits au-delà de 5,4 m³/s, correspondant au plus fort jaugeage réalisé le 19/02/1969. Ainsi, les courbes de tarage sont peu fiables en crue, les valeurs calculées pour 10 ans et 100 ans sont donc extrapolées fortement.

1.4.2- Utilisation des formules empiriques ou semi-empiriques

Trois méthodes ont été appliquées pour estimer les débits de crues :

- la méthode rationnelle qui consiste à évaluer le débit de pointe en fonction de l'intensité de la pluie et d'un coefficient de ruissellement empirique attribué à chaque type de surface (coefficients en **annexe 1**) ;
- la méthode SCS (*Soil Conservation Service*) qui tient compte, à l'aide de coefficients empiriques, de l'évolution des capacités d'infiltration des sols en fonction de la chronologie de la pluie ;
- la méthode du Gradex, réservée à l'estimation des débits de pointe extrêmes (100 à 1000 ans), qui se base sur les hydrogrammes de crue et de hiérogrammes de pluie mesurés.

1.4.2.1- Détermination du débit décennal

	Méthode rationnelle	SCS
Débit décennal (m ³ /s)	53	49

Tableau 23 : estimations du débit décennal

Le temps de concentration retenu pour l'application de la méthode rationnelle est ~9,5 h. Les différentes formules de temps de concentration utilisées indiquent un temps de concentration comprise entre 7 et 12h, entraînant une variation du débit de 44 à 64 m³/s. Le coefficient de ruissellement pris en compte pour le calcul est celui correspondant à l'occupation des sols datant de 2008, soit 0,24.

1.4.2.2- Détermination du débit centennal

Par application des méthodes rationnelle, SCS et du Gradex, le **tableau 24** ci-dessous récapitule les débits calculés pour la période de retour 100 ans.

	Méthode rationnelle	SCS	Gradex
Débit centennal (m ³ /s)	74	102	153

Tableau 24 : estimations du débit centennal

On remarque un écart important entre les différentes estimations, allant du simple au double. La valeur fournie par l'application de la méthode rationnelle semble sous-estimée. En effet le rapport Q_{100} / Q_{10} est de l'ordre de 1,4, inférieur aux valeurs communément admises, comprises entre 1,5 et 2 pour ce type de bassin versant. Le calcul du débit centennal à partir de la méthode du Gradex conduit souvent à des valeurs de débit élevées. Dans le cas du bassin versant de la Muse, le rapport Q_{100} / Q_{10} est de l'ordre de 3, valeur très élevée pour un bassin versant de cette taille et situé dans cette région. Cette valeur correspond plutôt à des petits bassins versants de l'Arc Méditerranéen. Ainsi, **le débit centennal de la Muse est vraisemblablement compris entre 80 et 100 m³/s.**

2- Evolution du fonctionnement hydrologique du bassin versant

2.1- Influence de l'occupation des sols sur le ruissellement

L'évolution de l'occupation des sols peut se traduire par des modifications de l'imperméabilisation du bassin versant ; celle-ci se matérialise d'un point de vue hydrologique par une aptitude plus ou moins importante au ruissellement. De manière empirique, la méthode rationnelle utilisée comme transformation Pluie-Débit pour l'estimation des débits de crue, prend en compte un coefficient de ruissellement, pouvant être rattaché à un type d'occupation du sol.

2.1.1- A l'échelle du bassin versant

A partir du découpage du bassin versant en classes d'occupation des sols, nous avons pu déterminer un coefficient de ruissellement pour chaque année étudiée : 1948, 1978 et 2008. A chaque classe d'occupation du sol est associé un coefficient. La moyenne de ces coefficients, pondérée par les surfaces des différentes classes, fournit le coefficient de ruissellement estimé du bassin versant (**tableau 25**).

	1948	1978	2008
coefficient de ruissellement	0,266	0,242	0,238

Tableau 25 : coefficient de ruissellement du bassin versant selon la date considérée (en fonction de l'occupation des sols)

Remarque : les surfaces des zones imperméables en 1948 et 1978 sont légèrement sous-estimées, du fait d'une moindre qualité des photographies aériennes. Néanmoins, au regard de l'étendue de ces surfaces par rapport à la superficie totale du bassin versant, cela n'a pas d'impact significatif sur les valeurs du coefficient de ruissellement.

Globalement, l'analyse de l'occupation des sols entre 1948 et 2008 a montré un reboisement du bassin versant de la Muse, au détriment des terres cultivées, des prairies, des landes et des friches. Ainsi, **le coefficient de ruissellement global du bassin versant de la Muse aurait diminué depuis 1948**, avec une variation plus importante entre 1948 et 1978, qu'après 1978. La diminution observée reste tout de même relativement faible, l'augmentation du boisement et la diminution des zones de culture étant compensées par l'augmentation des zones imperméables, notamment l'urbanisation des villages.

Cette diminution théorique du coefficient de ruissellement se traduirait ainsi par une **baisse des débits de pointe** calculés par la méthode rationnelle **de quelques m³/s (tableau 26)**. Cela s'explique physiquement par le fait que le reboisement du bassin versant peut diminuer la quantité d'eau qui ruisselle lors des événements pluvieux, en augmentant l'évapotranspiration et l'infiltration.

	1948	1978	2008
Q ₁₀ (m ³ /s)	59	54	53
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	83	75	74

Tableau 26 : évolutions des débits décennaux et centennaux (d'après la méthode rationnelle)

2.1.2- A l'échelle des sous-bassins

L'évolution de certains sous-bassins ne suit pas la tendance globale (cf. p. 11-12). Bien que la surface totale des zones cultivées ait diminué, elles ont également été déplacées et concentrées, entraînant des augmentations de la surface de culture sur certains sous-bassins, et plus particulièrement en tête de bassin versant (**carte n°3**). Pour la période 1948-2008, cela concerne notamment les sous-bassins n°9, 17, 19a, 19b, 23a et 23b. Le **tableau 27** présente l'évolution des surfaces cultivées et du coefficient de ruissellement « théorique » par sous-bassin entre 1948 et 2008.

On remarque que le coefficient de ruissellement « théorique » ne permet pas de mettre en évidence une augmentation de l'aptitude au ruissellement corrélée à l'augmentation des surfaces cultivées (idée communément admise), car cette augmentation semble compensée par le reboisement important des bassins au détriment des landes, friches et prairies.

Comme pour le bassin versant global de la Muse, les coefficients de ruissellement auraient diminué depuis 1948, entraînant une diminution des réponses hydrologique du bassin versant (approche par transformation Pluie-Débit par la méthode rationnelle).

Ces résultats font apparaître les limites de ce type d'analyse qui ne permet pas de prendre en compte la localisation des types de surface sur le bassin versant (repose uniquement sur leur étendue). En effet, d'autres paramètres interviennent à priori dans l'aptitude au ruissellement d'un bassin versant tel que sa géologie, les pentes... Ainsi, **la localisation de surfaces cultivées en tête de bassin versant peut entraîner une aggravation des extrêmes hydrologiques : des crues plus fortes et des étiages plus sévères.**

Le drainage des parcelles agricoles, non pris en compte dans cette analyse, peut également jouer un rôle important dans le comportement hydrologique des bassins versants. En effet, du fait du drainage, les eaux interceptées par le sol retournent plus facilement dans les fossés et ruisseaux. La concentration des eaux vers les exutoires étant plus rapide, on peut s'attendre à une accélération de la cinétique de la genèse des épisodes de crue et à une **augmentation des débits de pointe**, illustrée par la **figure 18**.

bassin	Cultures sur le bassin versant			Coefficient de ruissellement « théorique »		
	Superficies (km ²)		Taux d'évolution (% de la superficie des bassins)	Coefficients		Taux d'évolution
	1948	2008	1948-2008	1948	2008	1948-2008
1	0,03	0,02	-14,1%	0,23	0,19	-18,9%
2	0,03	0,01	-22,9%	0,23	0,16	-30,5%
3	0,05	0,02	-21,0%	0,24	0,18	-26,9%
4	0,02	0,01	-13,6%	0,29	0,23	-19,9%
5	0,05	0,03	-15,1%	0,23	0,17	-25,8%
6	0,02	0,02	-21,7%	0,30	0,24	-19,7%
7	0,02	0,01	-3,8%	0,22	0,19	-13,0%
8	0,06	0,05	-1,6%	0,22	0,19	-15,2%
9	0,43	0,50	8,0%	0,26	0,26	-1,5%
10	0,03	0,01	-27,3%	0,24	0,17	-31,2%
11	0,43	0,29	-17,3%	0,27	0,22	-16,9%
12	0,09	0,05	-22,8%	0,28	0,24	-14,6%
13	0,05	0,04	-6,8%	0,26	0,23	-9,4%
14	0,26	0,17	-17,7%	0,28	0,25	-11,0%
15	0,05	0,04	-12,2%	0,28	0,25	-13,1%
16	0,28	0,25	-4,0%	0,27	0,22	-17,6%
17	0,16	0,18	5,3%	0,24	0,22	-6,5%
18	0,06	0,05	-7,7%	0,27	0,25	-7,6%
19	0,03	0,01	-26,6%	0,23	0,19	-17,3%
19a	0,14	0,16	7,2%	0,25	0,25	-2,0%
19b	0,34	0,40	7,2%	0,26	0,25	-4,3%
20	0,12	0,10	-10,6%	0,27	0,24	-9,9%
21	0,02	0,01	-11,9%	0,26	0,18	-28,1%
22	0,47	0,43	-5,9%	0,29	0,27	-6,2%
23	0,19	0,15	-12,3%	0,27	0,24	-12,5%
23a	0,19	0,19	0,1%	0,30	0,30	-2,1%
23b	0,18	0,19	1,6%	0,26	0,26	-1,9%
24	0,01	0,00	-27,3%	0,27	0,19	-24,4%
24a	0,13	0,10	-15,5%	0,31	0,27	-14,1%
24b	0,17	0,16	-5,6%	0,33	0,31	-5,9%
25	0,48	0,44	-5,2%	0,30	0,29	-3,2%
26	0,41	0,21	-16,0%	0,24	0,19	-17,8%
27	0,24	0,17	-14,3%	0,26	0,23	-12,2%
28	0,34	0,28	-10,0%	0,29	0,28	-5,4%
Muse	5,58	4,76	-7,3%	0,27	0,24	-10,5%

Tableau 27: évolution des surfaces cultivées et du coefficient de ruissellement par sous-bassin versant (la carte n°1 permet de repérer les sous-bassins)

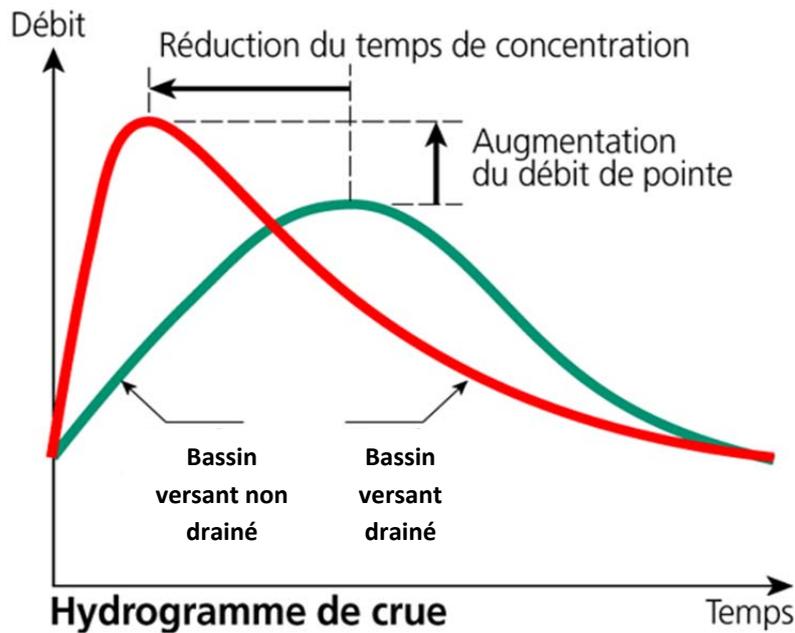


Figure 18 : augmentation du débit de pointe par réduction du temps de concentration

2.2- Evolution des chroniques de débits et de pluie

L'objectif est de pouvoir identifier des changements survenus dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Muse, en analysant les débits enregistrés à St Hippolyte et les pluies enregistrées aux pluviomètres pris comme référence sur le bassin versant. Les données ont été comparées sur les 4 dernières décennies, date de mise en service de la station hydrométrique sur la Muse.

2.2.1- Débit moyen / pluie annuelle

Les débits moyens annuels ont été établis à partir des débits journaliers enregistrés à la station de St Hippolyte et les pluies annuelles à partir des pluies journalières au droit du pluviomètre de Vézins de Lévézou. Ces valeurs ont été calculées par année hydrologique, c'est-à-dire de septembre à aout.

Les données pluviométriques de la station de Saint-Beauzély, implantée dans le bassin versant de la Muse, ne couvrent pas l'intégralité de la période étudiée (seulement de 1982 à 2000). La comparaison des pluies annuelles entre 1982 et 2000 au droit des 3 pluviomètres potentiellement exploitables montrent que les mesures à Vézins de Lévézou sont les plus proches de celles de Saint-Beauzély. C'est pourquoi nous avons étudié les données enregistrées à la station de Vézins de Lévézou, plutôt que celles de Salles-Curan. La chronique des pluies annuelles est représentée sur la **figure 19**.

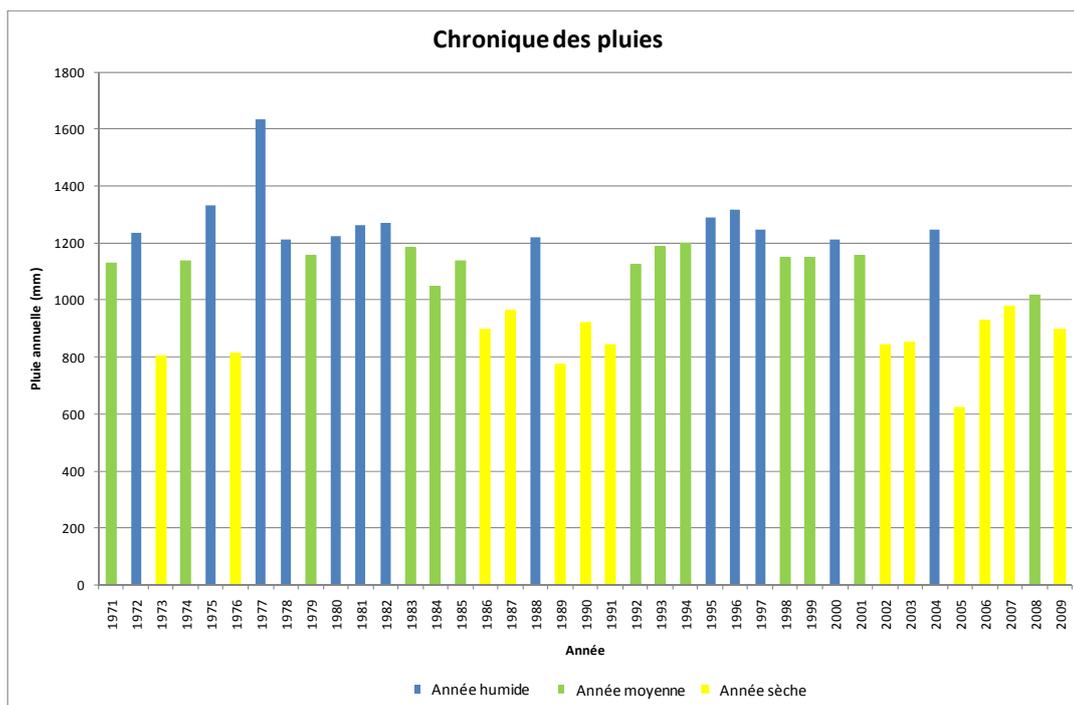


Figure 19 : débits moyens annuels en fonction des pluies annuelles

La **figure 20** présente la répartition des débits moyens annuels en fonction des pluies annuelles, par décennie. Globalement, l'ensemble des valeurs est réparti de part et d'autre de la courbe de tendance (déterminée par régression linéaire) : il n'y a donc **pas de tendance d'évolution du débit moyen en fonction de la pluie annuelle**. Toutefois, l'analyse des graphiques montre que :

- **la dernière décennie a été moins arrosée que les précédentes ;**
- les années 2004 et 2005 semblent présenter des anomalies :
 - o 2005 : malgré une pluviométrie très faible (623 mm), le débit moyen reste dans la moyenne interannuelle ;
 - o 2004 : le débit moyen de la Muse est très important (3,5 m³/s) avec une pluviométrie annuelle dans la moyenne (1 250 mm).

Ces anomalies sont également visibles sur la comparaison des lames d'eau écoulées et précipitées (**figure 21**).

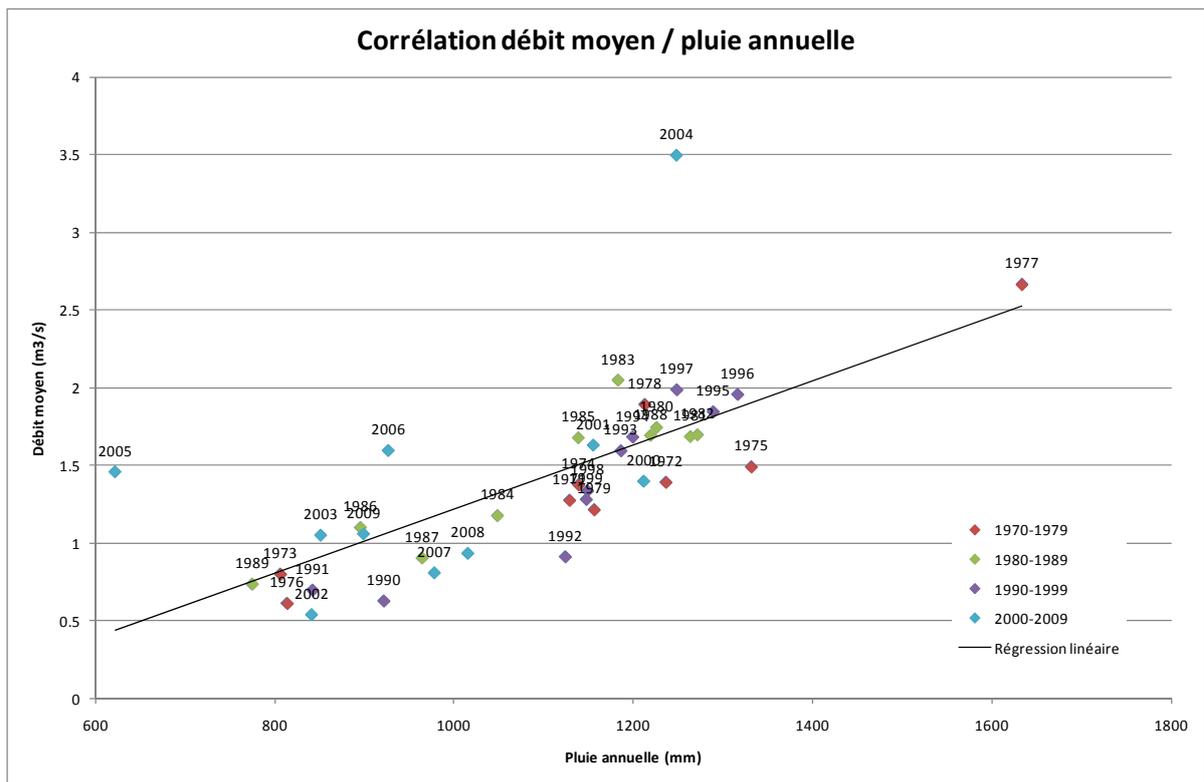


Figure 20 : débits moyens annuels en fonction des pluies annuelles

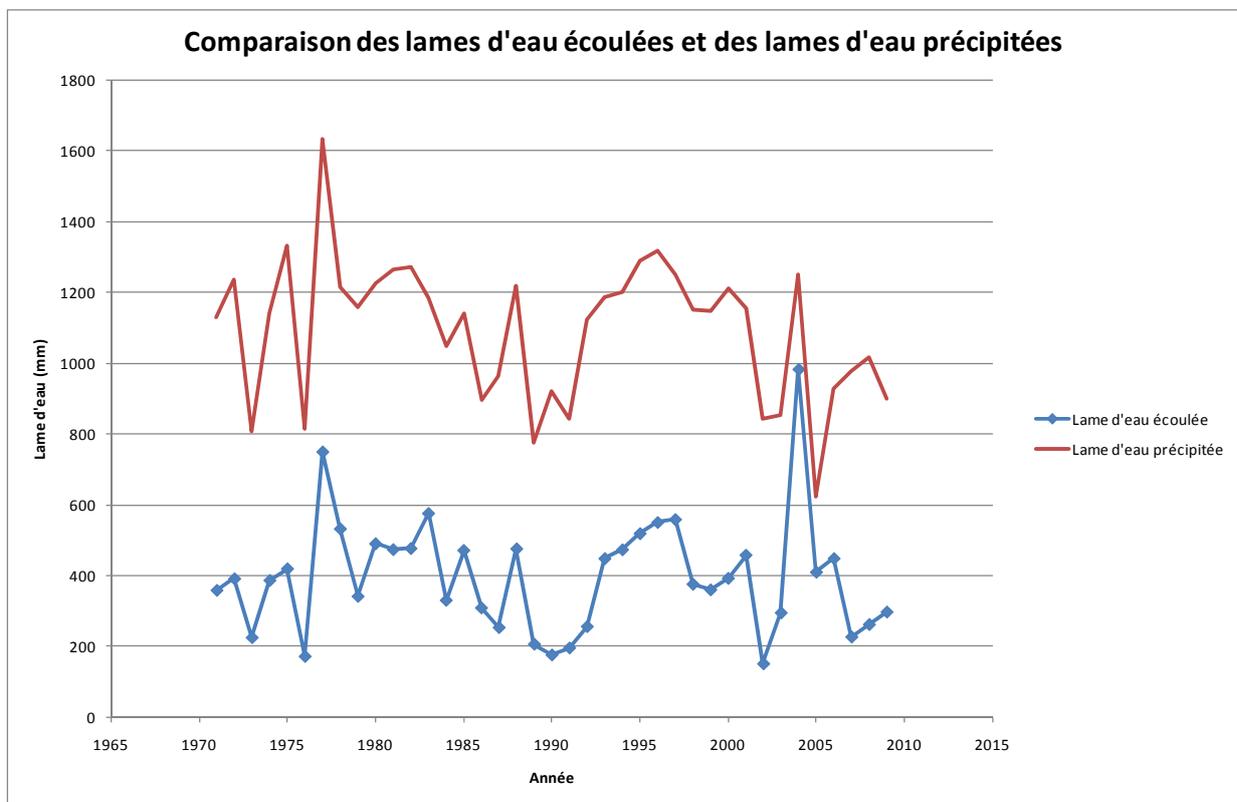


Figure 21 : lame d'eau écoulée au droit de la station de St Hippolyte et lame d'eau précipitée sur le bassin versant

2.2.2- Débits d'étiage

La **figure 22** représente les débits mensuels minimaux annuels (QMNA) enregistrés à la station de St Hippolyte entre 1969 et 2010. Elle montre une **nette tendance à la baisse du QMNA depuis les années 80 environ**, ce qui traduit une aggravation des étiages. Il faut néanmoins préciser que cette tendance est en partie liée aux conditions pluviométriques, l'allure de la **figure 22** étant effectivement proche de celle de lame d'eau précipitée sur la **figure 21**. Autrement dit, il est possible que l'aggravation des étiages soit davantage liée aux récentes conditions pluviométriques plutôt qu'à un changement du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

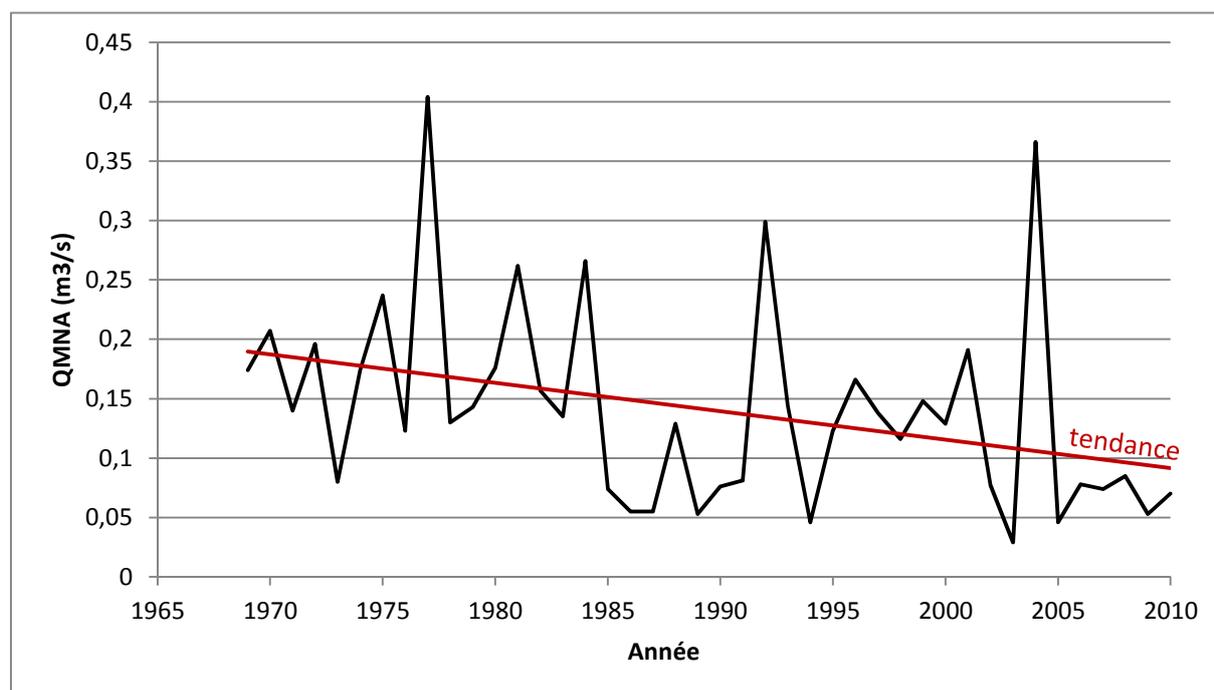


Figure 22 : débits mensuels minimaux annuels (QMNA) à la station de St Hippolyte

2.2.3- Chronique de débits journaliers et de pluies journalières

L'analyse des débits moyens annuels (cf. 2.2.1) n'a pas permis de mettre en évidence de tendance d'évolution dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En effet, le pas de temps annuel n'est sans doute pas assez précis pour mettre en évidence une évolution, du fait d'un lissage des extrêmes (crues et étiages). L'analyse des débits mensuels minimaux annuels (cf. 2.2.2) montrent une tendance à l'aggravation des étiages qui est au moins en partie liée aux conditions pluviométriques récentes. Nous avons donc réalisé une troisième analyse afin d'évaluer les changements fonctionnels de l'hydrologie du bassin en étudiant les relations entre les débits et les pluies.

Le Cemagref a développé, depuis les années 1980, des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur le bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Ce type de modèle peut permettre de détecter des changements survenus dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, en identifiant dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements des caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002, Andréassian et al., 2003).

Nous avons donc utilisé le modèle conceptuel global GR4j (Perrin et al., 2003), permettant de réaliser des simulations de débit au pas de temps journalier. C'est un modèle de transformation pluie-débit global à réservoirs, à quatre paramètres optimisables. Ces paramètres n'ont pas de liens directs avec les caractéristiques physiques des bassins versants étudiés et ils sont déterminés par calage du modèle.

2.2.3.1- Principe de modélisation

Il s'agit de découper les chroniques de 40 années, de 1970 à 2009, de débits et de pluies journalières en 4 périodes de 10 ans. On cale le modèle GR4j sur un des échantillons et on le valide sur tous les autres. Cette opération est répétée sur tous les échantillons, ce qui revient à faire tourner GR4j 4 fois en calage et 4x3 fois en validation, soit 16 fois en tout.

Le calage du modèle s'effectue en optimisant les performances du modèle à partir de différents critères permettant de mesurer l'adéquation des débits calculés aux débits mesurés (critère de Nash) et/ou l'erreur entre les volumes calculés et ceux observés (indice des bilans)... On peut également évaluer les performances du modèle à restituer les forts débits et les faibles débits

Le calage du modèle a été réalisé en optimisant le critère de Nash, à savoir l'aptitude du modèle à reproduire les débits observés.

N.B. : Le critère de Nash, critère communément utilisé en hydrologie pour comparer une série calculée à une série observée, est donné par :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{CAL} - Q_{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{Q} - Q_{OBS})^2}$$

Sa valeur est théoriquement comprise entre $-\infty$ et 100% (100% pour une parfaite concordance)

2.2.3.2- Résultats

Les premiers résultats de calage sur chacune des 4 périodes indiquent que pour la période 2000-2009, les performances du modèle sont moyennes à mauvaises, avec en particulier une mauvaise restitution des forts et des faibles débits. Les anomalies repérées précédemment pour les années 2004 et 2005 sont probablement la cause de l'inaptitude du modèle à reproduire les débits sur cette période. Ainsi, l'échantillon de données de 2000 à 2009 a été tronqué pour la suite de l'analyse permettant d'obtenir de meilleures performances de restitution.

Nous présentons ci-après deux tableaux de résultats : le critère de Nash (**tableau 28**) et l'indice des bilans (**tableau 29**).

Critère de Nash		axe des calibrations					
		70-79	80-89	90-99	00-09		
axe des validations	70-79					-1000 à 20	
	80-89					20 à 50	
	90-99					50 à 70	
	00-09					70 à 80	
						80 à 90	
					90 à 100		

Tableau 28 : critères de Nash en calages / validations croisées, exprimés en pourcentage - Indication de l'aptitude de restitution des débits observés

Le **tableau 28** permet de juger de la capacité d'un modèle calé sur une période à simuler les débits observés sur une autre période. On remarque que les critères de Nash des périodes elles-mêmes (éléments diagonaux) dépassent 80%. On constate également que le modèle calé sur la période 2000-2009 a une moins bonne aptitude à simuler les débits des autres périodes. De même, les modèles calés sur les autres périodes reproduisent moins bien les débits observés entre 2000-2009.

Indice des bilans		axe des calibrations					
		70-79	80-89	90-99	00-09		
axe des validations	70-79					-100 à -50	
	80-89					-50 à -30	
	90-99					-30 à -20	
	00-09					-20 à -10	
						-10 à 11	
					11 à 25		
					25 à 43		
					43 à 100		
					100 à 1000		

Tableau 29 : indices des bilans en calages / validations croisées, exprimés en pourcentage - Indication des écarts entre les volumes calculés et les volumes observés

Le **tableau 29** permet de rendre compte de la qualité des estimations des volumes :

- les bonnes estimations sont représentées en vert ;
- les surestimations des écoulements sont représentées du turquoise au violet ;
- les sous-estimations des écoulements sont représentées du vert clair au rouge.

Il apparaît que les « mauvaises » estimations correspondent à ce qui a été observé sur le critère de Nash, qui se traduisent au niveau des volumes par une très légère surestimation des écoulements de 2000-2009 par presque tous les modèles calés sur les autres périodes (ligne turquoise) et une sous-estimation des écoulements de toutes les autres périodes par les modèles calés sur 2000-2009 (colonne vert clair).

En conclusion, les résultats des simulations et calages du modèle hydrologique tendent à montrer que **le fonctionnement hydrologique du bassin versant s'est modifié principalement dans la dernière décennie, avec une légère tendance à la baisse des débits**. Toutefois, ces résultats sont à utiliser avec précaution. En effet, le choix du mode d'optimisation peut avoir une influence non négligeable sur les résultats, puisqu'il existe une multitude de critères d'optimisation et leurs combinaisons possibles.

On notera que la restitution des faibles débits est relativement bonne, par contre celle concernant les forts débits est moins satisfaisante, plus particulièrement pour la période 2000-2009. Ainsi, **la tendance**

à la baisse concernerait plutôt les étiages et les débits moyens, et il n'est pas possible de s'exprimer quant aux débits de crue.

2.3- Synthèse

L'évolution du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Muse a été analysée à partir de deux méthodes :

- **analyse de son aptitude au ruissellement (coefficient de ruissellement) corrélée à l'occupation des sols**

Globalement, le bassin versant de la Muse s'est reboisé depuis les années 50, au détriment des cultures, prairies, landes et friches. **Cette évolution, à l'échelle du bassin versant total, se traduit par une légère diminution du coefficient de ruissellement « théorique », entraînant une diminution de quelques m³/s des débits de crue estimés par la méthode rationnelle** (méthode de transformation pluie-débit qui tient compte du coefficient de ruissellement).

Une analyse plus fine, à l'échelle des sous-bassins versants, montre que les surfaces cultivées, globalement en recul depuis 1948, se sont déplacées et concentrées sur certains sous bassins versants, notamment en tête de bassin versant. **Le déplacement des surfaces cultivées devrait avoir pour conséquence d'aggraver les extrêmes hydrologiques : des crues plus fortes et des étiages plus sévères.** En revanche, cela ne peut pas apparaître dans l'évolution des coefficients de ruissellement, qui suit la tendance générale du bassin versant, mettant ainsi en évidence les limites de ce type d'analyse.

- **analyse des chroniques de pluies et de débits**

L'analyse des pluies et débits moyens annuels ne permet pas de mettre en évidence une tendance d'évolution à la hausse ou à la baisse des débits moyens. Par contre, il ressort que les années 2004 et 2005 présentent des anomalies, soit en termes de débit, soit en termes de pluviométrie. Il ressort également une nette diminution des débits d'étiage depuis les années 80 environ. Cette dernière tendance est néanmoins liée, au moins en partie, à l'évolution des précipitations.

La mise en œuvre d'un modèle hydrologique a permis une analyse plus fine, en traitant les données au pas de temps journalier. Il ressort que **le comportement hydrologique du bassin versant semble s'être modifié au cours de la dernière décennie, avec une légère tendance à la baisse des débits d'étiage et des débits moyens.** En ce qui concerne les débits de crue, la rareté de ces épisodes et leur non reproductibilité fait qu'il est impossible de conclure sur leur évolution au cours du temps.

En conclusion, les différentes analyses hydrologiques réalisées tendent à montrer que le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Muse a légèrement évolué depuis 1948 et plus particulièrement sur la dernière décennie : une tendance à la baisse des débits d'étiage et des débits moyens ressort, avec une évolution plus nette depuis les années 2000. Concernant les débits de crue, les analyses réalisées ne permettant pas de conclure quant à leur évolution. Toutefois, qualitativement, la position de surfaces cultivées en tête de bassin versant et le développement des drainages laissent supposer que les débits en crue auraient eu tendance à augmenter depuis les années 50.

INVENTAIRE ET DIAGNOSTIC DES CHAUSSEES

Ce chapitre se concentre sur la problématique des seuils artificiels (ou chaussées). Les fiches descriptives de chaque ouvrage sont regroupées dans un rapport annexe. Elles présentent en détail les points suivants :

- Informations générales : localisation (carte et PK), propriétaire, ancienneté ;
- Description : dimensions, matériaux, schémas et illustrations photographiques,
- Fonctionnement et état : état de l'ouvrage vis-à-vis des fuites, affouillements, fissures... état de la végétation riveraine, indice global de désordre ;
- Usage(s) ;
- Impacts et enjeux : remous solide, influence sur le transport solide, la stabilité des berges et la circulation piscicole, enjeux liés aux usages et aux terres riveraines.

La **carte n°20** montre la répartition des ouvrages, ainsi que les hauteurs de chute et possibilités de franchissement correspondantes. Il faut rappeler que la classification de la franchissabilité s'appuie en premier lieu sur la hauteur de chute mais que les aménagements permettant ou améliorant le franchissement sont pris en compte.

1- Localisation et description des chaussées

Les chaussées ont été dans un premier temps localisées lors de la campagne de terrain associée au diagnostic géomorphologique réalisé par DYNAMIQUE HYDRO. Elles ont ensuite fait l'objet d'un examen détaillé réalisé par HYDRETTUES.

Il faut préciser que les 25 chaussées caractérisées par les fiches ouvrages correspondent uniquement aux chaussées localisées sur les branches principales de la Muse et de la Muzette.

Plusieurs ouvrages (chaussées ou passages busés) ont également été découverts sur les affluents du bassin, lors de l'état des lieux de l'ensablement. Ces derniers ne sont indiqués sur la **carte n°20** qu'à titre indicatif (inventaire non exhaustif !), pour illustrer le fait qu'un grand nombre d'ouvrages, généralement à l'abandon, sont implantés sur le bassin versant et constituent des obstacles à la circulation piscicole dans le réseau hydrographique.

2- Recherches en archives et entretiens avec les propriétaires

Des recherches aux archives départementales ont été menées sans succès pour retrouver les propriétaires et dates d'implantation des chaussées. En effet, la plupart des ouvrages mentionnés dans les archives ont été détruits. La recherche des propriétaires a finalement pu aboutir avec le concours des communes du bassin versant.

Des entretiens téléphoniques ont été effectués auprès des propriétaires. Ils ont permis de compléter les observations collectées sur le terrain, notamment sur les points suivants :

- date d'implantation ;
- usage initial et actuel ;
- projet de modification (destruction, restauration, autre) ;
- attachement à l'ouvrage.

Le **tableau 30** synthétise les informations relatives à chaque chaussée.

chaussée	personnes interrogées	Construction	Usage initial	Usage actuel	Attachement	Projet	Commentaires
Mu1	1	< fin 18ème	M	0	Fort	R	moulin existant, canal d'aménagé fonctionnel
Mu2							aucun contact téléphonique
Mu3	1	années 80	P	0	0	0	
Mu4	1	< fin 18ème	M	0	Fort	R	moulin existant, canal d'aménagé comblé
Mu5	1	vieux	I/M ?	0	Fort	0	prise d'eau de l'ancien moulin de castelmus?
Mu6	1	vieux	I	I	Fort	0	
Mu7	1	vieux	I	0	Fort	0	
Mu8	1			0	0	0	
Mu9	1	vieux	I	0	0	0	
Mu10	2	vieux (<années 40)	I	0	ind.	0	
Mu11	1	vieux	I	0	0	D	
Mu12	1	années 70	E	0	0	D	
Mu13							refus
Mu14	1	vieux	I	0	0	0	
Mu15	1	vieux	I	0	Fort	0	
Mu16	2	vieux (<années 40)	I	0	0	0	
Mu17	2	vieux (<années 40)	I	autre	Fort	0	alimente un petit bassin en rive droite
Mu18	0		R	R	-	-	ouvrage de stabilisation de la RD96
Mu19	1	vieux	I	0	ind.	0	
Mu20	1	vieux	I	I	Fort	0	utilisation quand le climat le permet (dernière utilisation il y a 4 ou 5 ans)
Mu21							aucun contact téléphonique
Mz1	1	vieux	I	I	ind.	0	dernière utilisation il y a 8 ans. Souhait d'utiliser à nouveau
Mz2	1	< fin 18ème	M	0	ind.	0	prise d'eau d'un ancien moulin
Mz3	2	vieux	I/M ?	0	0	0	prise d'eau d'un ancien moulin ou irrigation ?
Mz4	1		P	P	Fort	0	moyen d'accès à une parcelle agricole en rive gauche

Légende:

I	Irrigation des parcelles riveraines
M	Prise d'eau d'un moulin
R	Radier (stabilisation d'ouvrage)
P	Passage à gué
E	Production électrique
autre	
Fort	Fort attachement à l'ouvrage
ind.	Indécis
R	Restauration
D	Destruction
0	Aucun usage, attachement ou projet

Tableau 30 : synthèse des résultats des entretiens téléphoniques avec les propriétaires de chaussée

2.1- Historique

La plupart des chaussées recensées ont une origine ancienne, voire très ancienne (antérieur à la fin du 18^{ème} siècle).

Leur usage principal était d'irriguer les prairies ou cultures riveraines des cours d'eau (**figure 24**). Selon les témoignages des riverains et des propriétaires interrogés lors des entretiens téléphoniques, les chaussées destinées à l'irrigation étaient nettement plus nombreuses au début du 20^{ème} siècle. Faute d'entretien, la plupart d'entre elles auraient été détruites par les crues successives durant les dernières décennies.

Quelques-unes constituaient des prises d'eau pour l'alimentation des moulins dont il subsiste quelques témoins, dans des états de conservation variable. La **figure 23** montre que les moulins à eau étaient effectivement fréquents sur le bassin à la fin du 18^{ème} siècle.

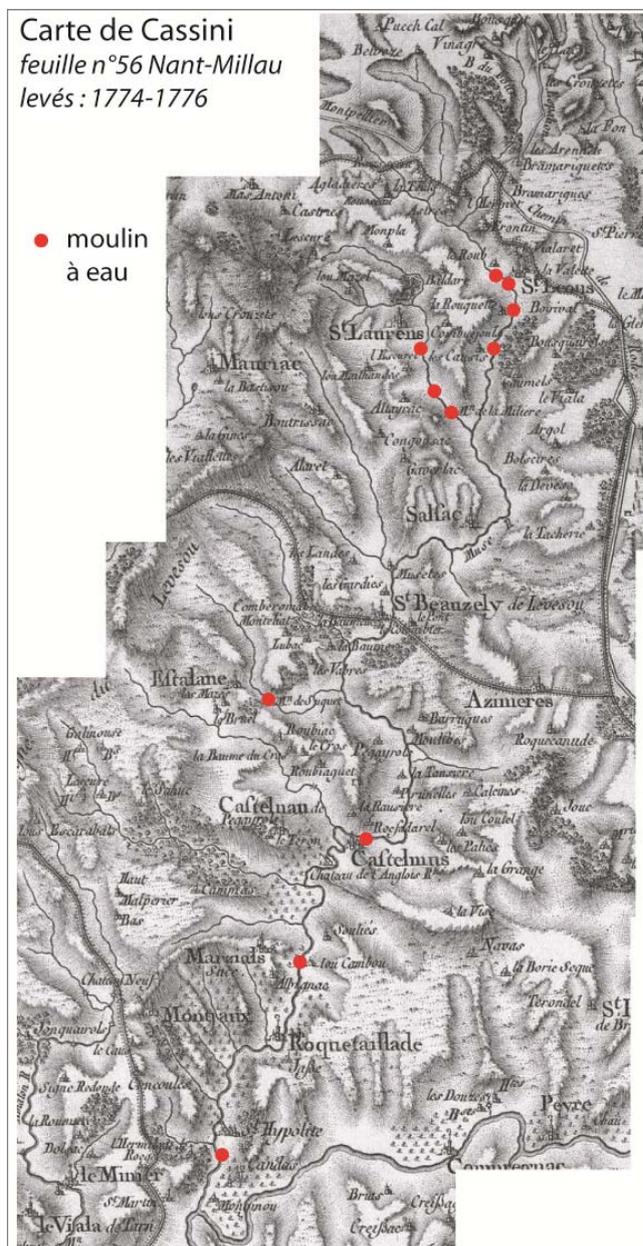


Figure 23 : localisation des moulins à eau inventoriés sur la carte de Cassini à la fin du 18^{ème} siècle

2.2- Usages actuels

La grande majorité des chaussées n'ont plus d'usage fonctionnel : seules 3 chaussées sont encore ponctuellement utilisées pour irriguer les parcelles riveraines (figure 24). En revanche, les propriétaires sont généralement très attachés à leurs ouvrages. Ils souhaitent les maintenir en place, mais assurent rarement leur entretien.

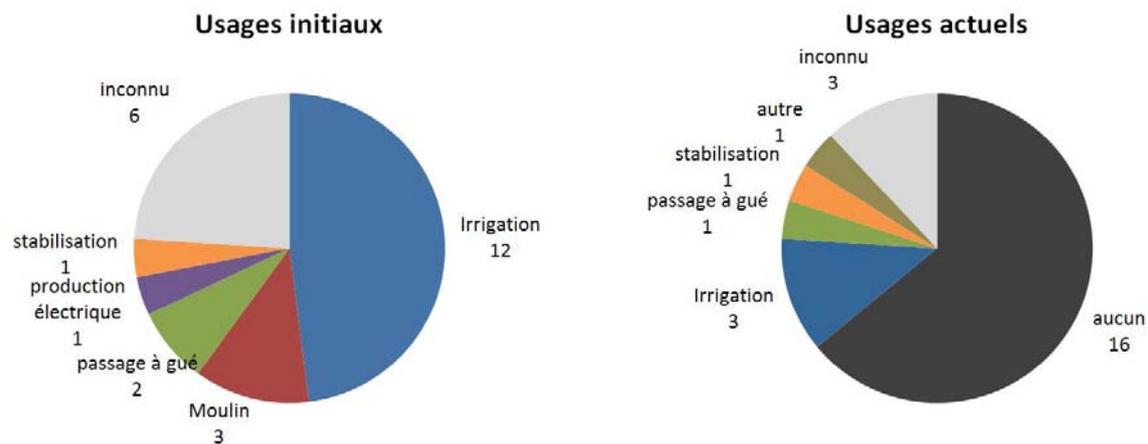


Figure 24 : usages des chaussées

3- Impact des chaussées sur la continuité écologique

3.1- Influence sur la circulation piscicole

La franchissabilité des ouvrages est difficile à évaluer car elle dépend de multiples facteurs. Pour un poisson donné et pour un débit donné, elle dépendra de la hauteur de chute, de la longueur et de la pente de l'ouvrage, de la profondeur et la longueur de la fosse d'appel (au pied de l'ouvrage), du fractionnement éventuel de la chute (ex. : franchissement en 2 sauts) et de la présence d'ouvrage de franchissement. Elle varie encore selon l'espèce et la taille de l'individu, ainsi qu'avec les conditions hydroclimatiques (vitesse des écoulements, hauteur d'eau et température de l'eau). Le classement des ouvrages présente donc une part d'incertitude et doit être considéré comme indicatif. Soulignons également que ce classement représente la franchissabilité à la montaison (sens aval-amont) car, de manière générale, les problèmes de franchissement des ouvrages en dévalaison (sens amont-aval) sont nettement moins importants durant les crues.

Nous nous sommes en grande partie appuyé sur la classification en 6 classes (notées de 0 à 5) du référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE ; ONEMA 2011). La dénomination des classes a néanmoins été légèrement modifiée. Par ailleurs, 8 des 25 ouvrages étaient déjà évalués par ce référentiel : 4 ont conservés la même note, 4 ont été surclassés.

La majorité des chaussées recensées sont infranchissables à difficilement franchissables (tableau 31). Le secteur S3, en amont des gorges de Castelmus (carte n°20), est particulièrement cloisonné. En aval (secteurs S1 et S2), seules deux chaussées constituent un réel obstacle à la circulation piscicole au

niveau de Saint Hippolyte et du Moulin de Cambon. Quelques ouvrages importants sont également présents sur la Muse amont et la Muzette.

Franchissabilité	Nombre d'ouvrages	Hauteur de chute	Nombre d'ouvrages
0 - Absence d'obstacle (ex. : vanne de fond)	1	< 0,5 m	4
1 - Permanente (libre circulation à l'exception des plus petits individus)	3	0,5 à 1 m	5
2 - Limitée (blocage lorsque les conditions hydroclimatiques sont défavorables)	4	1 à 1,5 m	7
3 - Difficile (impact important en conditions moyennes)	7	> 1,5 m	9
4 - Très difficile (franchissable uniquement lors de conditions exceptionnelles)	4		
5 - Infranchissable	6		

Tableau 31 : franchissabilité et hauteur de chute des chaussées recensées

L'impact des chaussées considérées ci-dessus sur la circulation piscicole est donc globalement important. De plus, les quelques ouvrages supplémentaires observés sur les affluents (inventaire non exhaustif) et les obstacles naturels (seuils, chutes et cascades) des portions aval rencontrés sur de nombreux affluents de rive droite viennent encore augmenter le cloisonnement des différentes portions du réseau hydrographique.

3.2- Influence sur le transport solide

Il s'agit d'aménagements anciens qui présentent une pente nulle ou très faible (différence d'altitude entre la crête du seuil et le fond du lit en amont). Du point de vue du transport solide, ils ne piègent donc plus sinon très peu de sédiments. En revanche, leur influence sur la pente de la ligne d'eau (et donc sur l'énergie des écoulements) dans les zones de remous solide (linéaire amont sous de la chute de l'ouvrage l'influence de la ligne d'eau) diminue la capacité de transport des écoulements.

Ces ouvrages n'entraînent pas de déficit sédimentaire significatif qui pourrait engendrer à son tour un phénomène de pavage et/ ou d'armurage du lit ou encore une incision (cf. paragraphe 2.3.2). L'incision du lit est par ailleurs impossible étant donné la fréquence des affleurements rocheux. **En revanche, les sédiments stockés dans les remous solides depuis leur implantation constituent une réserve intéressante pour favoriser davantage la recharge sédimentaire, et potentiellement, la qualité des habitats aquatiques.**

1- Description synthétique

Le bassin versant de la Muse présentent une faible activité érosive, du moins en ce qui concerne la production de matériaux grossiers qui contribuent à recharger le stock alluvionnaire des cours d'eau (graviers et galets constituant la charge de fond et généralement considérés comme les sédiments « utiles » au cours d'eau). Une grande partie du linéaire est bordée par des versants rocheux et/ou par des berges peu érodables qui fixent le tracé en plan des cours d'eau (contrôle horizontal). La dynamique latérale des cours d'eau est donc extrêmement faible, c'est-à-dire que leurs possibilités de divagation sont extrêmement réduites si bien que les érosions de berges le sont également. La fourniture sédimentaire est par conséquent prédominée par les apports des versants (érosion des sols par ruissellement, éboulements, glissements de terrain...) qui fournissent aux cours d'eau des matériaux de toutes tailles. Ces apports sont plus importants dans les fonds de vallée étroits et encaissés où la proximité, la pente et la hauteur des versants favorisent leur érosion et l'introduction des matériaux érodés dans les cours d'eau.

Les volumes de sédiments en transit sont donc relativement faibles. Pour autant, les cours d'eau ne présentent pas de déficit sédimentaire. De plus, il n'y a pas de risque d'incision car la majeure partie des chenaux sont fréquemment ponctués (sinon plus) par des affleurements rocheux qui contrôlent le niveau du lit (contrôle vertical).

En effet, une grande partie du linéaire se rapprochent des cours d'eau dits à lits rocheux : les fonds sont en partie constitués d'affleurements rocheux ou de fragments rocheux (blocs) qui dépassent la compétence des écoulements, et présentent relativement peu d'alluvions meubles ; ils s'agencent en séquences chute-cuvette ou marche-cuvette parfois associées à des rapides. Ces faciès d'écoulement et alternances de faciès permettent de dissiper une partie de l'énergie élevée des écoulements (liée à la pente forte). On retrouve particulièrement ces caractéristiques sur les tronçons intermédiaires des affluents qui font la jonction entre les zones de plateau et le fond de vallée de la Muse et de la Muzette, et sur les extrémités amont de certains affluents de rive droite (en tête des sous-bassins de Brinhac, Caves, Coste Cave, Falguières, Fouyrouse, Landes, Muzette et Rivaldiès). On les retrouve également sur les branches principales, de manière continue sur le secteur S2, de manière discontinue sur les secteurs S3 et S6, et de manière ponctuelle sur le secteur S5.

Ailleurs, les cours d'eau se rapprochent un peu plus des chenaux rectilignes ou peu sinueux à fond mobile avec une énergie modérée : ils s'organisent généralement en séquences seuil-mouille ou radier-plat et présentent un fond de vallée nettement plus alluvial (présence d'alluvions et la fréquence des affleurements rocheux est plus rare) ; leur mobilité latérale reste faible, voire très faible, mais elle est supérieure à celle des tronçons évoqués ci-dessus car ils s'écoulent dans des fonds de vallée plus larges ; leur pente modérée les rend plus sensibles à l'ensablement. On retrouve en fait ces caractéristiques essentiellement sur les cours d'eau du plateau du Lévezou. Dans une moindre mesure, certains tronçons des branches principales du réseau hydrographique se rapprochent également de cette description.

C'est davantage le cas sur le secteur S4 de la Muse et on peut encore observer ponctuellement ces caractéristiques au niveau des secteurs S1, S3, S5 et S6.

Enfin, il faut bien entendu distinguer les affluents de rive droite (parmi lesquels sont inclus les affluents de la Muse amont et de la Muzette, au nord du bassin) qui s'écoulent sur des roches métamorphiques, des affluents de rive gauche associés au système karstique des roches sédimentaires du Causse Rouge. La nature des roches sous-jacentes impose des fonctionnements hydrologiques et géomorphologiques très différents. Les premiers constituent des cours d'eau pérennes, régulièrement en eau et propices à la vie aquatique. Ils sont en revanche plus sensibles à l'ensablement et c'est d'autant plus le cas sur le plateau du Lévezou dont les terrains sont plus propices à la mise en cultures, ce qui favorise la production de sédiments fins. Les seconds sont des cours d'eau intermittents, en eau durant une très courte durée de l'année, qui fonctionnent par pulsations rythmées par les événements pluvieux importants.

2- Synthèse des évolutions

L'évolution de l'occupation du sol du bassin versant au cours de la seconde moitié du vingtième siècle est marquée par un important reboisement. Celui-ci s'est principalement réalisé au niveau des zones de fortes pentes qui font la jonction entre les plateaux et les fonds de vallée de la Muse et des tronçons aval des affluents, ainsi que sur les parties amont des bassins d'Estalane et de Falguières (en partie lié au développement d'exploitations forestières). Les secteurs amont des bassins de Fouyrouse, Brinhac, Rivaldiès, Landes et Coste Cave ont également été mis en cultures entre 1948 et 1978 en remplacement de surfaces classées en *landes, friches et prairies permanentes* qui dominaient toute la bordure ouest du bassin en 1948. Plus récemment, entre 1978 et 2008, ce fut encore le cas sur les bassins de Falguières, Sagette, la Muzette et la Muse amont, et à nouveau sur ceux de Brinhac, Fouyrouse et Rivaldiès. Enfin, la moitié des prairies permanentes ont été converties en prairies temporaires (ou artificielles), ce qui concerne environ 13% de la superficie totale du bassin versant.

D'un point de vue hydrologique, ces évolutions auraient eu pour conséquence de diminuer légèrement les volumes ruisselés et les débits de pointe des crues d'après les résultats de la méthode rationnelle (basée sur l'évolution du coefficient de ruissellement moyen). Toutefois, cette méthode présente deux limites fondamentales. La première réside dans le fait qu'elle n'intègre pas la localisation des types de surface sur le bassin versant. Aussi, les résultats obtenus ne prennent pas en compte l'impact du déplacement d'une partie des surfaces cultivées vers les têtes de bassin versant qui constituent généralement des réservoirs hydriques restituant l'eau progressivement (effet tampon). Une seconde limite réside dans la non prise en compte des drainages des parcelles agricoles, qui se seraient vraisemblablement développés à partir des années 70. Ces aménagements ont une forte influence sur le comportement hydrologique des bassins versants en interceptant une partie des eaux auparavant destinées à alimenter les écoulements souterrains et en accélérant l'évacuation des eaux superficielles du bassin versant. Il est donc nettement plus vraisemblable que l'évolution de l'occupation des sols et des pratiques ait entraîné une aggravation des extrêmes hydrologiques, c'est-à-dire des crues plus intenses et des étiages plus sévères. Il faut souligner que ces évolutions sont plus importantes au niveau des affluents. Le reboisement important du bassin tend à atténuer cet impact sur les secteurs aval de la Muse.

D'un point de vue géomorphologique, la mise en culture des têtes de bassin versant a contribué à l'érosion des sols et à la production de sédiments fins (sables et limons). Ceci a également été favorisé par la conversion d'une grande partie des prairies permanentes en prairies temporaires, qui implique un retournement plus fréquent des sols. De plus, les drainages agricoles ont un impact important sur l'ensablement des cours d'eau. En revanche, si l'influence des drainages est clairement démontrée par les analyses statistiques, il est difficile de préciser pourquoi. L'augmentation de l'érodibilité des sols par assèchement pourrait être une explication car les sols secs sont les plus sensibles à l'érosion. L'impact sur l'ensablement des cours d'eau se concentre sur les tronçons amont et intermédiaires des bassins affectés par ces évolutions de l'occupation des sols et des pratiques culturales (Brinhac, Coste Cave, Falguières, Fouyrouse, Landes, Rivaldiès, Sagette, Muse et Muzette amont) car, plus en aval, la pente importante des cours d'eau permet une évacuation rapide des sables. Ainsi, la plupart des affluents de rive droite du plateau du Lévézou présentent un ensablement important. Dans certains cas, et particulièrement sur le ruisseau d'Estalane, l'ensablement affecte également les tronçons aval qui présentent pourtant une pente élevée.

Enfin, le reboisement des versants les plus escarpés, qui font la jonction entre les plateaux et les fonds de vallée de la Muse et des tronçons aval des affluents, a conduit à une diminution de leur érosion. Il est difficile d'évaluer l'impact de cette évolution sur la fourniture sédimentaire aux cours d'eau, autant d'un point de vue quantitatif (volumes érodés) que qualitatif (type de matériaux). On peut supposer que cela peut avoir réduit la part des apports en matériaux grossiers dans les parties basses du réseau hydrographique (Muse, Muzette et les tronçons aval des affluents) par rapport aux apports en sédiments fins car les sources de sédiments grossiers sont rares.

3- Perturbations hydro-morphologiques, enjeux écologiques et orientations de gestion

3.1- Synthèse à l'échelle du bassin versant

3.1.1- Perturbations et dysfonctionnements

La **carte n°21a** localise les principaux dysfonctionnements ou sources de dysfonctionnement : ensablement, érosion, rupture de la continuité écologique (impact des chaussées vis-à-vis de la circulation piscicole et sédimentaire), drainages agricoles. Les captages d'eaux souterraines ou superficielles ne sont pas inclus car il n'existe pas à ce jour d'inventaire géolocalisé fiable et exhaustif (problèmes d'exhaustivité, de précision et d'ancienneté des bases de données disponibles).

D'un point de vue géomorphologique, **le principal problème rencontré sur le bassin versant de la Muse est l'ensablement des parties amont du réseau hydrographique**. La plupart des affluents de rive droite, à l'ouest du bassin, sont ensablés, et plus particulièrement sur le plateau. C'est également le cas de la Muse amont, de la Muzette et de leurs affluents, au nord du bassin. La pente des cours d'eau, qui traduit leur capacité à transporter ou à stocker les sédiments, constitue le principal facteur de contrôle de l'ensablement. Les analyses statistiques ont également confirmé que l'occupation des sols et certaines pratiques culturales ont un rôle déterminant : les surfaces cultivées favorisent la production et l'introduction de sédiments fins dans le cours d'eau ; les surfaces boisées protègent au contraire les sols

de l'érosion et jouent un rôle de filtre vis-à-vis des sédiments érodés sur les versants lorsqu'elles sont implantées en bordure de cours d'eau ; les analyses statistiques ont particulièrement montré que les drainages agricoles ont un impact encore plus important. Il faut rappeler que la localisation des drainages agricoles ne résulte pas d'un inventaire exhaustif mais qu'il s'est concentré sur les affluents de rive droite et la partie amont de la Muse (**carte n°21b**), et encore uniquement sur les parcelles situées à proximité ou en contact direct avec le réseau hydrographique (cf. page 40).

D'un point de vue hydrologique, de nombreux riverains ont témoigné de la **raréfaction des écoulements dans les cours d'eau de tête de bassin versant**, qui se traduit par de longues périodes d'assecs estivaux. Les drains agricoles favorisent nettement cette tendance. Les captages destinés à l'alimentation en eau potable ou à l'irrigation peuvent également participer à l'assèchement des cours d'eau. On observe également une tendance à l'**aggravation des étiages plus en aval**, à l'exutoire du bassin versant (diminution du QMNA ; **figure 20**). Bien que celle-ci soit en partie liée aux précipitations globalement plus faibles durant les dernières décennies, les différentes analyses pluie-débit révèlent que le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Muse a légèrement évolué depuis 1948, et plus particulièrement sur la dernière décennie, favorisant une diminution des débits d'étiage et des débits moyens.

Ces dysfonctionnements hydrologiques et géomorphologiques ont probablement un impact important sur l'écologie des cours d'eau. Il faut souligner qu'ils affectent principalement les tronçons amont du réseau hydrographique. Plus en aval, il n'y a pas de problème d'ensablement et la diminution des débits d'étiage n'a pas de conséquence aussi grave que sur les petits cours d'eau en amont.

Le suivi thermique des eaux réalisé par la FDPPMA de l'Aveyron (entre 2005 et 2009) met toutefois en évidence des **températures élevées en période estivale sur la Muse en aval de Moulibez** : la température moyenne des 30 jours les plus chauds dépasse ou approche très fréquemment 18°C. C'est donc à partir du secteur S3 (soit au niveau de Moulibez, en amont des gorges de Castelmus) où l'on dénombre 10 chaussées sur 3,5 km que la température constitue un problème pour la vie piscicole. Ces ouvrages contribuent au réchauffement des eaux en ralentissant les écoulements. Plus en amont, le plan d'eau du Bois des Fours est également responsable d'une partie du réchauffement.

Outre l'impact thermique, les chaussées constituent des obstacles à la continuité écologique, c'est-à-dire à la circulation de la faune aquatique et des sédiments. En fait, l'impact sur le transit sédimentaire est faible car les chaussées sont anciennes. Par conséquent, elles ralentissent le transport des sédiments mais elles ne les piègent pas (ou très peu). L'impact sur la circulation piscicole est en revanche nettement plus important car **la majorité des ouvrages recensés sont infranchissables ou difficilement franchissables à la montaison**. Soulignons néanmoins que **les chaussées constituent un problème secondaire au regard des contextes historiques et géomorphologiques du bassin versant**. D'une part, les populations piscicoles étaient réputées abondantes quelques décennies auparavant alors que les chaussées étaient largement plus nombreuses. D'autre part, un certain nombre d'obstacles naturels (cascades, chutes et seuils naturels) cloisonnent naturellement certaines portions du réseau hydrographique.

Enfin, nous signalons une incision régressive au niveau du confluent Muse-Brinhac. L'érosion du lit et des berges en amont reste limitée mais le phénomène pourrait éventuellement progresser.

3.1.2- Enjeux écologiques

La **carte n°22** présente les principaux enjeux écologiques. Elle résulte d'informations externes (données non collectées durant l'étude) :

- les zones humides potentielles (sources : PNRGC, ADASEA) ;
- les ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique) ;
- une note globale de qualité des habitats piscicoles sur la Muse établie d'après l'évaluation de la diversité des faciès, de l'abondance des frayères, et de l'abondance des abris et caches à poissons (source des données de base : FDPPMA de l'Aveyron – Schéma Départemental de Vocation Piscicole 1998) ;
- les tronçons proposés pour la révision du classement des cours d'eau au titre de l'article L214-17 du code de l'environnement, visant à réglementer la mise en place, l'entretien et l'équipement des ouvrages transversaux (source : DDT Aveyron – réunion départementale de concertation à Rodez le 22 octobre 2010) :
 - o la liste 1 correspond aux tronçons considérés en très bon état écologique ;
 - o la liste 2 correspond à des tronçons présentant des enjeux moindres mais tout de même intéressants pour la restauration de la continuité écologique.

Les deux premiers éléments constituent clairement des zones à préserver pour maintenir la biodiversité sur le bassin versant de la Muse. Les zones humides ont également un effet tampon qui permet une restitution progressive des eaux aux cours d'eau, et donc favorable au soutien des étiages. Les deux éléments suivants permettent d'évaluer sommairement ou de comparer l'intérêt écologique des différentes portions du réseau hydrographique.

Les affluents de rive droite présenteraient donc un fort intérêt écologique. Or, comme nous l'avons vu ci-avant, ils sont menacés par l'ensablement. Sur la Muse, les secteurs 2 (entre Castelmus et Roquetaillade) et 4 (entre la Muzette et Estalane) sont probablement les plus intéressants à ce jour d'un point de vue de la qualité des habitats piscicoles. La Muse et la Muzette amont (secteurs 5 et 6) sont en revanche fortement ensablés.

3.2- Dysfonctionnements et orientations de gestion par secteur

RAPPEL : les secteurs sont localisés sur la carte n°1 (annexe 2)

3.2.1- Affluents

Les affluents de rive gauche sont des cours d'eau non pérennes, en eau uniquement pour des événements pluvieux importants, dont la gestion n'apparaît pas pertinente.

Les affluents de rive droite (ainsi que les affluents de la Muse amont et de la Muzette, au nord du bassin), présentent plus d'intérêt d'un point de vue écologique. Certains d'entre eux sont par ailleurs proposés pour le classement en Liste 1 (Très Bon Etat écologique) au titre l'article L214-17 du code de l'environnement et leur gestion pourrait par conséquent constituer un axe majeur d'intervention (**carte n°22**). Ils présentent un ensablement important qui est favorisé par les terres cultivées en général, et par les parcelles drainées en particulier. Il faut souligner que les parcelles connectées au réseau hydrographique (en contact direct avec les cours d'eau) ont un impact plus important. Il est donc recommandé de développer ou de maintenir des zones tampons végétalisées entre le cours d'eau et les

parcelles agricoles. Outre le piégeage des flux de sédiments, ces zones tampons, souvent implantées sous la forme de bandes enherbées, permettent de limiter les apports de polluants (engrais et produits phytosanitaires). Lorsqu'elles sont implantées sous la forme d'un cordon végétal plus large et plus dense, incluant des arbres et arbustes, elles constituent souvent des espaces à fort intérêt écologique (pour la végétation et sur le plan ornithologique), et contribuent à limiter le réchauffement et l'évaporation des eaux.

Concernant le soutien des étiages, il n'y a malheureusement pas de « remèdes miracles » pour prévenir les assècs estivaux. Nous pouvons uniquement recommander de limiter l'implantation des drains agricoles, voire de supprimer les drains existants, et de limiter les prélèvements d'eau dans les cours d'eau ou dans les nappes en période estivale. Ces mesures sont néanmoins très contraignantes, notamment pour les exploitants agricoles.

Une démarche de sensibilisation des acteurs locaux aux problématiques locales de ressource en eau et d'ensablement des cours d'eau pourrait diminuer les pressions humaines sur le milieu naturel.

3.2.2- Secteur 7

Le ruisseau de Brinhac ne présente aucun dysfonctionnement apparent, du moins dans sa partie aval (identifiée comme le secteur S7 sur la **figure 1** et la **carte n°1**). Le lit est tout de même asséché en période estivale dans la partie intermédiaire du ruisseau (en amont, entre le hameau de la Coste et la confluence avec le ruisseau des Landes). L'amélioration des conditions hydrologiques dans ce dernier tronçon dépend du soutien des étiages de ses affluents plus en amont.

3.2.3- Secteurs 5 et 6

Les ruisseaux de la Muzette et de la Muse amont présentent tous deux un ensablement très important du lit qui constitue une altération majeure des habitats aquatiques. Une solution consiste à implanter deux bassins de dessablement (en génie végétal, muni d'un seul seuil de fond sans impact sur la circulation piscicole) à l'amont de ces secteurs pour piéger une grande partie des sables fournis par leurs affluents.

Un problème de deuxième ordre concerne la circulation piscicole, qui est limitée par 2 (Muse amont) et 4 (Muzette) seuils infranchissables ou difficilement franchissables (**carte n°20**). Le dérasement ou l'aménagement de ces ouvrages est donc préconisé.

Enfin, il faut rappeler que les suivis thermiques réalisés en étés 2007, 2008 et 2009 mettent en évidence un important réchauffement des eaux au niveau du plan d'eau du « Bois du Four » : la température moyenne maximale sur 30 jours consécutifs augmente de près de 2°C entre les tronçons amont et aval de ce plan d'eau.

3.2.4- Secteur 4

Ce secteur présente un ensablement important dans sa partie amont (essentiellement entre la Muzette et le ravin de Vayssède), puis retrouve une qualité d'habitat satisfaisante en aval du ruisseau du Rivaldiès. La mise en place des bassins de dessablement proposée ci-dessus bénéficierait également à cette partie du cours d'eau.

Un court tronçon présente une incision régressive (érosion verticale du lit consécutive à la destruction d'une chaussée au confluent Muse-Brinhac) sur la commune de Saint-Beauzély, juste en amont de la

confluence avec le ruisseau de Brinhac. L'incision est actuellement modérée mais récente donc elle pourrait encore progresser. Nous préconisons donc un suivi léger du tronçon pour suivre l'évolution verticale du lit et prévenir des détériorations potentielles sur une passerelle et sur les propriétés riveraines.

3.2.5- Secteur 3

Il s'agit d'un secteur très fortement cloisonné par un grand nombre de chaussées de hauteur importante, infranchissables ou difficilement franchissables. Celles-ci ont donc un impact considérable sur la circulation piscicole entre les secteurs amont et aval du réseau hydrographique. Elles altèrent également les conditions d'habitat en favorisant l'ennoiement d'une portion significative du cours d'eau (environ un quart), ce qui entraîne à la fois un réchauffement des eaux et une diminution de l'abondance des frayères. Ces ouvrages limitent enfin le transit sédimentaire bien que cela ne constitue pas un dysfonctionnement majeur du cours d'eau qui ne présente pas de déficit sédimentaire sur le secteur considéré et qui retrouve plus en aval (secteur S2 en gorges) une dynamique sédimentaire satisfaisante. Le stock de sédiments grossiers mobilisables par dérasement des chaussées constitue néanmoins une réserve intéressante pour augmenter la fourniture sédimentaire des tronçons aval.

En revanche, l'intérêt d'intervenir sur les chaussées de ce secteur doit être considéré globalement : l'aménagement (ex. : fractionnement de la hauteur de chute), l'équipement (passe à poissons) ou le dérasement (effacement total) d'un seul ouvrage présente un intérêt extrêmement limité car il ne permettrait de décroisonner qu'un très court linéaire de cours d'eau. Par conséquent, la restauration de la continuité écologique suppose un projet relativement ambitieux visant à intervenir sur la totalité des chaussées de grandes dimensions de ce secteur (remarque : 9 des 10 ouvrages recensés sont infranchissables ou difficilement franchissables et leur impact sur la température, le transit sédimentaire et la qualité des habitats est globalement d'autant plus fort que les dimensions de l'ouvrage sont importantes).

3.2.6- Secteur 2

Le secteur 2, prédominé par des tronçons encaissés dans les gorges entre Castelmus et Roquetaillade, présente un bon état général.

3.2.7- Secteur 1

Le secteur 1, à l'extrémité aval du bassin, présente deux chaussées de taille importante qui empêchent ou limitent la circulation piscicole. L'aménagement ou le dérasement de ces ouvrages permettraient de décroisonner une grande partie du réseau hydrographique en assurant la libre circulation depuis les gorges de Castelmus jusqu'au Tarn (soit près de 10 km de cours d'eau). Cela permettrait donc de reconnecter, d'un point de vue piscicole, les tronçons aval de la Muse au Tarn. L'intérêt de démanteler la première chaussée (Saint-Hippolyte) est de ce point de vue incertain et pourrait être évalué après avoir vérifié la présence éventuelle du barbeau méridional. Le cas échéant, le maintien de la chaussée de Saint-Hippolyte pourrait s'avérer avantageuse car cela limiterait la concurrence du barbeau fluviatile (ou barbeau commun).

Il faut préciser que ce secteur est proposé pour être classé en Liste 2 pour la révision du classement des cours d'eau au titre de l'article L214-17 du code de l'environnement, qui prévoit d'imposer l'équipement des ouvrages existants pour restaurer la continuité écologique.

Il faut également souligner que la réduction du nombre de chaussées en amont (notamment au niveau du secteur 3) bénéficierait directement au secteur 1, et dans une moindre mesure au secteur 2, en favorisant un réchauffement moins rapide des eaux.

Géomorphologie et hydraulique

Activité (d'une érosion) et indice d'activité : correspond à l'intensité d'une érosion, qui traduit la quantité approximative de sédiments produits par mètre carré de surface érodée. L'indice d'activité ne permet pas de calculer des mètres cubes de sédiments, mais il permet de comparer qualitativement les productions des différentes érosions recensées sur le réseau hydrographique. L'indice d'activité peut prendre les valeurs de 0,1 (faible), 0,4 (moyenne), ou 1 (forte).

Alluvions : sédiments d'origine fluviatile, qui ont été plusieurs fois transportés, déposés puis remobilisés par le cours d'eau (s'oppose aux colluvions).

Armurage et pavage : l'armurage et le pavage du lit d'un cours d'eau correspondent à la formation à la surface du lit d'une couche de matériaux nettement plus grossiers que les matériaux sous-jacents. L'armure est une forme « normale », fréquemment rencontrée dans les cours d'eau à substrat grossier (constitués de graviers et/ou galets), qui protège de l'érosion les sédiments sous-jacents. L'armure est constituée de sédiments mobilisables et est donc fréquemment remaniée lors des crues. En revanche, le pavage constitue une protection plus résistante à l'érosion (semi-permanente), qui n'est déstabilisée que très rarement, et qui révèle souvent un déficit sédimentaire.

Atterrissement / Banc / Accumulation : ces trois termes désignent un dépôt de matériaux fluviatiles (sédiments) émergeant en basses eaux. Ils se caractérisent par leur volume, leur granulométrie (galets, graviers, sables...) et leur mobilité.

Bande active : désigne l'espace fréquemment remanié par les écoulements (crues fréquentes). La bande active peut éventuellement se déplacer latéralement, se rétracter ou s'élargir. (Terme géomorphologique que l'on peut associer au terme hydraulique *lit moyen*).

Capacité de transport : correspond à la quantité maximale de matériaux (sédiments) qu'un tronçon de cours d'eau est capable de transporter (généralement défini pour un débit donné). La quantité de matériaux réellement transportée ne peut pas être supérieure à la capacité de transport. En revanche, elle peut être inférieure si la disponibilité en sédiments mobilisables (stock de sédiments mobilisables sur place au niveau du lit et des berges, fourniture sédimentaire depuis le tronçon amont, les affluents et les versants adjacents) est insuffisante.

Charge de fond : représente la partie grossière des matériaux en transit dans un cours d'eau, qui se déplace au contact du fond (par charriage ou saltation). La charge de fond s'oppose à la charge en suspension qui est transportée sans contact avec le fond.

Colluvions : sédiments provenant de l'érosion des versants (s'oppose aux alluvions). Contrairement aux alluvions, les colluvions ont généralement été transportées sur de courtes distances. Elles sont également moins triées, c'est-à-dire qu'elles peuvent être très hétérogènes en taille.

Compétence des écoulements : correspond à la taille maximale de particule qu'un tronçon de cours d'eau est capable de transporter (généralement défini pour un débit donné).

Connexion (d'une source sédimentaire au réseau hydrographique) et indice de connexion : qualifie la possibilité des produits d'une érosion à être transportés jusqu'à un cours d'eau. Les surfaces d'érosion pleinement connectées au réseau hydrographique participent donc fortement à la fourniture sédimentaire des cours d'eau. A l'inverse, la fourniture sédimentaire depuis une forme d'érosion située à grande distance du réseau hydrographique sera nulle. Elle sera faible dans le cas d'une érosion partiellement déconnectée par une terrasse, un banc figé, un replat, la végétation (effet de peigne) qui piègent une partie des matériaux produits par l'érosion. L'indice de connexion peut prendre les valeurs de 0,1 (faible), 0.4 (moyenne), ou 1 (forte).

Débits à pleins bords : représente la capacité d'écoulement du lit mineur avant débordement dans la plaine alluviale. Le débit à pleins bords s'écoule dans le chenal à pleins bords, c'est-à-dire que les écoulements occupent la totalité de la largeur (largeur à pleins bords) et de la profondeur (profondeur à pleins bords) du lit mineur.

Dynamique latérale : la dynamique latérale traduit la tendance d'un cours d'eau à divaguer dans son fond de vallée.

Dynamique sédimentaire : terme général qui désigne l'ensemble des processus d'érosion, de transport et de stockage des matériaux solides au sein d'un bassin versant. L'analyse de la dynamique sédimentaire repose sur l'étude des formes d'érosion et des dépôts de sédiments (matériaux en transit), et de leurs interrelations dans le temps et dans l'espace.

Espace de liberté (ou espace de mobilité) : il s'agit d'un concept général qui vise à maintenir en fond de vallée un espace nécessaire aux divagations du ou des chenaux fluviaux pour « permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres (SDAGE RMC). Ce concept n'est applicable qu'aux rivières mobiles à notre échelle de temps (ou potentiellement mobiles si elles sont aménagées) et il n'est pas approprié à tous les types de cours d'eau. En revanche, cette dernière remarque n'exclut pas « la possibilité de définir d'autres enveloppes de préservation, non mobilisables par le cours d'eau, mais qui peuvent présenter d'autres enjeux et que l'on nommera zones tampons. On peut ainsi déterminer des zones tampons hydrologiques (pour garantir l'écrêtement des crues), des zones tampons écologiques (pour conserver des milieux humides annexes), des zones tampons physico-chimiques (ripisylve de 15 à 20 m de large pour permettre le piégeage des nutriments)... » (Agence de l'Eau RMC, 1998).

Fourniture sédimentaire : désigne la quantité de matériaux fournis à un tronçon de cours d'eau. Les matériaux peuvent provenir du tronçon amont (affluents inclus) ou des berges et des versants adjacents. A l'échelle d'un bassin versant, la fourniture sédimentaire désigne la part de matériaux qui est réellement fournie aux cours d'eau. Elle se distingue donc de la production sédimentaire qui désigne l'ensemble des matériaux érodés, qu'ils atteignent ou non le réseau hydrographique.

Incision : il s'agit de l'enfoncement du lit d'un cours d'eau ou d'un tronçon de cours d'eau. Une incision est dite progressive si elle se propage vers l'aval, ou régressive si elle se propage vers l'amont. Une incision peut engendrer des dysfonctionnements préoccupants sur le tronçon affecté : déstabilisation des ouvrages et structures riveraines par affouillement, abaissement du niveau piézométrique (et ses impacts sur les captages d'eau potable et sur les peuplements végétaux), altération des faciès d'écoulements et des habitats aquatiques, augmentation de la fourniture sédimentaire vers les tronçons aval.

Indice d'efficacité (des érosions) : cet indice, compris entre 0 et 1, permet d'évaluer l'efficacité de la recharge sédimentaire des érosions. Il correspond au produit de l'indice d'activité et de l'indice de connexion. Il prend donc en compte deux paramètres : l'intensité de la connexion des surfaces d'érosions au lit mineur du cours d'eau, et l'intensité de l'activité des érosions (voir les définitions ci-dessus). Une surface active mais partiellement déconnectée du lit (par un banc, une terrasse...) produit beaucoup de sédiments mais seule une partie d'entre eux est réellement introduite dans le cours d'eau. Une surface peu active mais pleinement connectée (contact direct, ce qui représente la majeure partie des formes d'érosions recensées) produit peu de sédiments mais la totalité d'entre eux est fournie au cours d'eau.

Ordre de Strahler : l'ordination est un moyen de déterminer la position hiérarchique d'une partie de cours d'eau au sein d'un réseau hydrographique. Les changements d'ordre traduisent des changements importants au niveau hydrologique et, par conséquent, au niveau morphologique. La détermination de l'ordre de Strahler consiste à affecter l'ordre 1 aux cours d'eau pérennes de tête de bassin versant, puis à ajouter 1 à chaque confluence de cours d'eau de même rang (ex. : $1+1=2$; $2+2=3$; etc.).

Ralentissement dynamique des eaux : principe de gestion visant à atténuer les crues d'un cours d'eau en freinant les écoulements avant leur arrivée dans le cours d'eau, en favorisant les débordements en lit majeur, ou en stockant temporairement des volumes de crue dans des ouvrages spécifiques.

Remous solide : longueur de cours d'eau sous l'influence hydraulique d'un ouvrage faisant obstacle aux écoulements (ex. : chaussée, barrage). En pratique, la zone de remous solide correspond à la portion de cours d'eau qui présente, en amont de l'ouvrage, une hauteur d'eau relativement élevée et des vitesses d'écoulements faibles.

Ripisylve : le mot ripisylve vient du latin *Ripa* qui signifie rive et de *Sylva* qui signifie forêt. Il désigne une multitude de formations végétales et arborées en bordure de cours d'eau, comme les forêts ripariales, les forêts alluviales, les forêts galeries ou les boisements de berges. Cette diversité de formations traduit les nombreuses organisations possibles de la ripisylve, notamment en fonction de son extension plus ou moins importante dans le lit majeur du cours d'eau. En pratique, on distingue essentiellement deux types de formation :

- les boisements de berges lorsque la ripisylve se limite à un simple liseré limité en bordure de berge ;
- la forêt alluviale lorsque la ripisylve constitue une véritable forêt qui s'étend sur une étendue importante dans la plaine alluviale.

Transport solide et transit sédimentaire : le transport solide désigne le transport des matériaux solides par les cours d'eau. L'analyse du transit sédimentaire consiste à étudier les formes (ex. : localisation, volume, mobilité et granulométrie des atterrissements) et les mécanismes (ex. : modes de transport, vitesse et distance de transport, piégeage des sédiments par divers obstacles) qui participent au transport et au stockage des sédiments. Il faut préciser que, dans le cadre de cette étude, l'analyse des atterrissements sur un tronçon de cours d'eau reflètent à la fois les conditions de transport et de stockage des matériaux. Autrement dit, une grande quantité de matériaux accumulés peut témoigner d'un transit sédimentaire important, de conditions de transport défavorables (ex. : faible pente, nombreux obstacles au transport solide) ou bien des deux.

Unité morphodynamique (ou faciès d'écoulement) : entité fonctionnelle élémentaire d'un cours d'eau, homogène d'un point de vue physique. Les principaux critères de différenciation sont la hauteur d'eau,

la vitesse de l'écoulement et la pente. Grossièrement, on peut considérer que la longueur d'un faciès représente 1 à 10 fois la largeur du lit à pleins bords. On distingue essentiellement deux grandes catégories de faciès :

- les faciès lotiques caractérisés par un faible tirant d'eau, une pente et des vitesses d'écoulement élevées (ex. : chute, cascade, rapide, radier) ;
- les faciès lenticques qui présentent à l'inverse un tirant d'eau important et des vitesses faibles (ex. : mouilles, chenal lentique).

Hydrologie

Coefficient de ruissellement : rapport entre le volume d'eau ruisselé (calculé à partir des débits mesurés à l'exutoire du bassin versant) et le volume d'eau précipité.

Etiage : période de très basses eaux.

Evapotranspiration : ensemble des déperditions biologiques (ex. : absorption de l'eau par le couvert végétal) ou physiques (ex. : évaporation à la surface d'un plan d'eau) d'une surface en vapeur d'eau.

Exutoire : point de sortie des eaux superficielles d'un bassin versant.

Lame d'eau : volume hydrique (en m³) exprimé en unité de hauteur (en mm) en le divisant par la superficie qu'il occupe (ex. : le volume d'eau ruisselé peut être divisé par la superficie du bassin versant pour être comparé à la lame d'eau précipitée).

QMNA : débit mensuel minimal annuel, soit le plus faible débit moyen enregistré durant un mois (généralement en été) pour une année hydrologique.

Temps de concentration : temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée « hydrologiquement » de l'exutoire pour parvenir à celui-ci.

Temps de réponse : intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue (ou parfois du centre de gravité de l'hydrogramme de crue).

Pédologie

Erodibilité : représente « la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent sous l'action des gouttes de pluies et/ou de l'écoulement » (Le Bissonnais et al. 2005).

Battance : désigne la tendance des sols à se désagréger en surface sous l'action de la pluie puis à former une croûte fine et imperméable. En réduisant les possibilités d'infiltrations, la battance augmente les quantités d'eaux ruisselées en surface et favorise finalement l'érosion de sols.

Pédogénèse : processus de formation et d'évolution des sols.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : occupation du sol du bassin versant de la Muse en 1948, 1978 et 2008 et taux d'évolution moyens.....	10
Tableau 2 : taux d'évolution des principales classes d'occupation du sol (exprimés en % de la superficie des bassins) durant la période 1948-2008 – les valeurs en gras mettent en évidence les augmentations les plus significatives (>10%)	11
Tableau 3 : évolution des principales classes d'occupation du sol définies par le Recensement Général Agricole entre 1979 et 2000 (superficies renseignées pour les exploitations dont le siège se situe sur les communes du bassin versant, quelle que soit la localisation réelle des parcelles).....	13
Tableau 4 : densité des haies sur les terres cultivées en 1948, 1978 et 2008 et évolution.....	14
Tableau 5 : caractéristiques morphologiques moyennes des secteurs identifiés	18
Tableau 6 : synthèse des principaux résultats sur les formes d'érosions recensées sur les branches principales du réseau hydrographique.....	21
Tableau 7 : résultats des analyses granulométriques de 7 atterrissements grossiers (méthode d'échantillonnage surfacique de type grid sampling selon Wolman 1954) – les blocs (diamètre > 512 mm) ne sont pas pris en compte dans le calcul du tri et des diamètres médians et maximums	26
Tableau 8 : synthèse des principaux résultats sur les atterrissements recensés sur les branches principales du réseau hydrographique.....	27
Tableau 9 : synthèse des principaux résultats sur les embâcles et la ripisylve.....	30
Tableau 10 : caractérisation de la mobilité latérale des branches principales du réseau hydrographique	32
Tableau 11 : coefficient T représentant la teneur en sables des sols en fonction de la nature lithologique des roches sous-jacentes.....	37
Tableau 12 : coefficient O représentant l'influence de l'occupation des sols sur l'exposition des sols à l'érosion.....	38
Tableau 13 : synthèse des résultats de la modélisation de la production de sables par érosion des sols	40
Tableau 14 : progression de la production de sables par érosion des sols sur quelques sous-bassins– les valeurs en gras mettent en évidence les augmentations (évolutions positives)	41
Tableau 15 : résultats des analyses de variance pour les quatre paramètres explicatifs de l'ensablement	44
Tableau 16 : résultats des analyses de variance résiduelle pour les trois paramètres secondaires.....	45
Tableau 17 : résultats du modèle de régression logistique	45
Tableau 18 : caractéristiques de la station de la Muse à St Hippolyte	49
Tableau 19 : caractéristiques des stations pluviométriques situées à proximité de la zone d'étude	50

Tableau 20 : estimations des pluies journalières	51
Tableau 21 : coefficients de Montana retenus au droit du bassin versant de la Muse	51
Tableau 22 : débits décennal et centennal au droit de la station à St Hippolyte (estimation par ajustement statistique)	52
Tableau 23 : estimations du débit décennal	52
Tableau 24 : estimations du débit centennal	52
Tableau 25 : coefficient de ruissellement du bassin versant selon la date considérée (en fonction de l'occupation des sols)	53
Tableau 26 : évolutions des débits décennaux et centennaux (d'après la méthode rationnelle).....	54
Tableau 27: évolution des surfaces cultivées et du coefficient de ruissellement par sous-bassin versant (la carte n°1 permet de repérer les sous-bassins).....	55
Tableau 28 : critères de Nash en calages / validations croisées, exprimés en pourcentage – Indication de l'aptitude de restitution des débits observés	61
Tableau 29 : indices des bilans en calages / validations croisées, exprimés en pourcentage – Indication des écarts entre les volumes calculés et les volumes observés.....	61
Tableau 30 : synthèse des résultats des entretiens téléphoniques avec les propriétaires de chaussée...	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : sectorisation morphologique des branches principales du réseau hydrographique : découpage en 7 secteurs homogènes du point de vue des caractéristiques fondamentales du cours d'eau et du fond de vallée – le profil en long correspond au linéaire d'ordre 3 à 5 selon Strahler	19
Figure 2 : répartition des superficies érodées par type de processus érosif sur l'ensemble des branches principales du réseau hydrographique.....	22
Figure 3 : exemples d'érosions localisées sur le bassin versant.....	22
Figure 4 : surface efficace des érosions ($S_e.l_e$) et type de processus érosif.....	23
Figure 5 : densité efficace des érosions ($S_e.l_e/L$) et type de processus érosif	23
Figure 6 : surface efficace des érosions ($S_e.l_e$) et type de matériaux produits.....	24
Figure 7 : densité efficace des érosions ($S_e.l_e/L$) et type de matériaux produits	24
Figure 8 : nombre d'érosions par kilomètre de cours d'eau.....	25
Figure 9 : pourcentage surfacique des principales fractions granulométriques et des affleurements rocheux sur les faciès lotiques	26
Figure 10 : volume des atterrissements et type de matériaux stockés	28
Figure 11 : densité des atterrissements et type de matériaux stockés	28
Figure 12 : densité des atterrissements par unité de largeur et type de matériaux stockés	28
Figure 13 : densité des embâcles par catégorie de taille	31
Figure 14 : sensibilité des berges à l'érosion (berges aménagées exclues)	33
Figure 15 : principe du modèle établi pour évaluer la production et la fourniture sédimentaire sableuse par érosion des sols en 1948, 1978 et 2008.....	39
Figure 16 : graphiques en boîtes montrant la dispersion des 4 principaux paramètres explicatifs en fonction de la classe d'ensablement.....	43
Figure 17 : aven en aval de Castries	47
Figure 18 : augmentation du débit de pointe par réduction du temps de concentration.....	56
Figure 19 : débits moyens annuels en fonction des pluies annuelles.....	57
Figure 20 : débits moyens annuels en fonction des pluies annuelles.....	58
Figure 21 : lame d'eau écoulee au droit de la station de St Hippolyte et lame d'eau précipitée sur le bassin versant.....	58
Figure 22 : débits mensuels minimaux annuels (QMNA) à la station de St Hippolyte.....	59
Figure 23 : localisation des moulins à eau inventoriés sur la carte de Cassini à la fin du 18 ^{ème} siècle.....	65
Figure 24 : usages des chaussées	66

BIBLIOGRAPHIE

- Andréassian V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat. Université de Paris 6, France, 262p.
- Andreassian V., Parent E., Michel C., 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water resources Research*, 39 (9), pp. 12-22.
- Antoni V., Le Bissonais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J., Arrouays D., 2006. Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et Gestion des Sols*, 13 (3), pp. 201-222.
- Cerdan O., Le Bissonais Y., Souchère V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I. Arrouays D., Desprats JF., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°3 : synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, 85 p.
- Chambre Régionale d'Agriculture, 1995. Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées. A. Delaunois, C. Longueval, 537 p.
- Desprats JF., Bourguignon A., Cerdan O., Le Bissonais Y., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°1 : étude de sensibilité sur le département de l'Hérault. Rapport BRGM-RP-55049-FR, 67 p.
- Le Bissonais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M., 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3), pp. 307-321.
- Office nationale de l'eau et des milieux aquatiques, 2011. Descriptif du contenu du référentiel des obstacles à l'écoulement – version 2. 33p.
- Pauly G., 2006. Soutien d'une population de truites communes (*Salmo Trutta L.*) par alevinages en pré-estivaux. Mémoire de stage, 31 p.
- Perrin C., Michel C., Andréassian,V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279 (1-4), pp. 275-289.
- Saunier Environnement, 2002. Schéma communal d'assainissement – Commune de Castelnaud-Pégayrols. 26 p. +annexes.
- Saunier Environnement, 2002. Schéma communal d'assainissement – Commune de Montjoux. 26 p. +annexes.
- Saunier Environnement, 2002. Schéma communal d'assainissement – Commune de Saint-Beauzély. 25 p. +annexes.
- Surdyk N., Cerdan O., Dubus I., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°2 : étude de sensibilité sur le département de l'Oise. Rapport BRGM-RP-55103-FR, 60 p.
- Wolman M.G., 1954. A method of sampling river-bed material. *American Geophysical Union*, 35 (6), pp. 951-956.

ANNEXES

Annexe 1 : Coefficient de ruissellement appliqué pour la méthode rationnelle en fonction du type de surface

Annexe 2 : Atlas cartographique

- Carte n°1 : Présentation du bassin versant de la Muse
- Carte n°2 : Occupation des sols en 1948, 1978 et 2008
- Carte n°3 : Evolution de l'occupation des sols entre 1948 et 2008
- Carte n°4 : Evolution de la densité des haies entre 1978 et 2008
- Carte n°5 : Inventaire des surfaces d'érosion
- Carte n°6 : Inventaire des atterrissements
- Carte n°7 : Mobilité des atterrissements
- Carte n°8 : Inventaire des embâcles
- Carte n°9 : Inventaire des affleurements rocheux
- Carte n°10 : Inventaire des principaux aménagements (chaussées exclues ; cf. carte n°20)
- Carte n°11 : Densité de la ripisylve
- Carte n°12 : Stabilité de la ripisylve
- Carte n°13 : Inventaire des enrochements de berges
- Carte n°14 : Dynamique latérale
- Carte n°15 : Ensablement des cours d'eau
- Carte n°16 : Sensibilité intrinsèque des sols à la production de sables par érosion
- Carte n°17 : Production de sables par érosion des sols
- Carte n°18 : Production de sables sur les versants connectés au réseau hydrographique
- Carte n°19 : Evolution de la fourniture en sables
- Carte n°20 : Inventaire des chaussées
- Carte n°21a: Synthèse des dysfonctionnements
- Carte n°21b: Inventaire des drains agricoles
- Carte n°22 : Synthèse des enjeux écologiques

ANNEXE 1

Coefficient de ruissellement appliqué pour la méthode rationnelle en fonction du type de surface

Type d'occupation des sols	Coefficient de ruissellement
Forêt dense	0,1
Forêt de densité moyenne	0,15
Landes, friches et prairies	0,2
Culture	0,35
Roche à nue	0,5
Surfaces artificielles, zones d'urbanisation	0,5
Plan d'eau	1

ANNEXE 2

Atlas cartographique

- Carte n°1 : Présentation du bassin versant de la Muse
- Carte n°2 : Occupation des sols en 1948, 1978 et 2008
- Carte n°3 : Evolution de l'occupation des sols entre 1948 et 2008
- Carte n°4 : Evolution de la densité des haies entre 1978 et 2008
- Carte n°5 : Inventaire des surfaces d'érosion
- Carte n°6 : Inventaire des atterrissements
- Carte n°7 : Mobilité des atterrissements
- Carte n°8 : Inventaire des embâcles
- Carte n°9 : Inventaire des affleurements rocheux
- Carte n°10 : Inventaire des principaux aménagements (chaussées exclues ; cf. carte n°20)
- Carte n°11 : Densité de la ripisylve
- Carte n°12 : Stabilité de la ripisylve
- Carte n°13 : Inventaire des enrochements de berges
- Carte n°14 : Dynamique latérale
- Carte n°15 : Ensablement des cours d'eau
- Carte n°16 : Sensibilité intrinsèque des sols à la production de sables par érosion
- Carte n°17 : Production de sables par érosion des sols
- Carte n°18 : Production de sables sur les versants connectés au réseau hydrographique
- Carte n°19 : Evolution de la fourniture en sables
- Carte n°20 : Inventaire des chaussées
- Carte n°21a: Synthèse des dysfonctionnements
- Carte n°21b: Inventaire des drains agricoles
- Carte n°22 : Synthèse des enjeux écologiques

Présentation du bassin versant de la Muse



Saint-Laurent-de-Lévézou

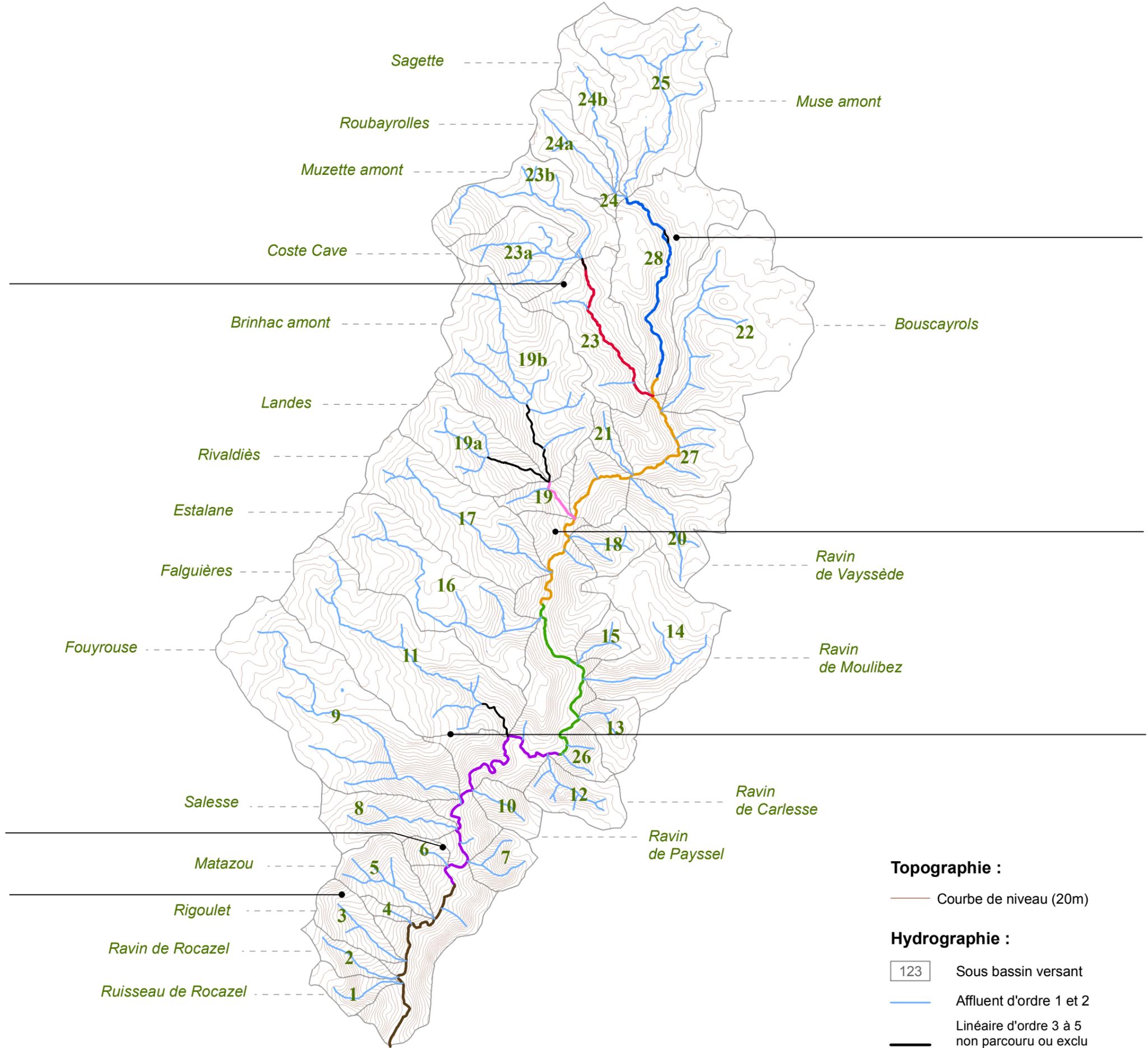
Saint-Léons

Saint-Beauzély

Castelnau-Pégayrols

Marzials

Montjaux



Topographie :

— Courbe de niveau (20m)

Hydrographie :

123 Sous bassin versant

— Affluent d'ordre 1 et 2

— Linéaire d'ordre 3 à 5 non parcouru ou exclu de la sectorisation

Sectorisation :

— Secteur 1

— Secteur 2

— Secteur 3

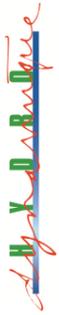
— Secteur 4

— Secteur 5

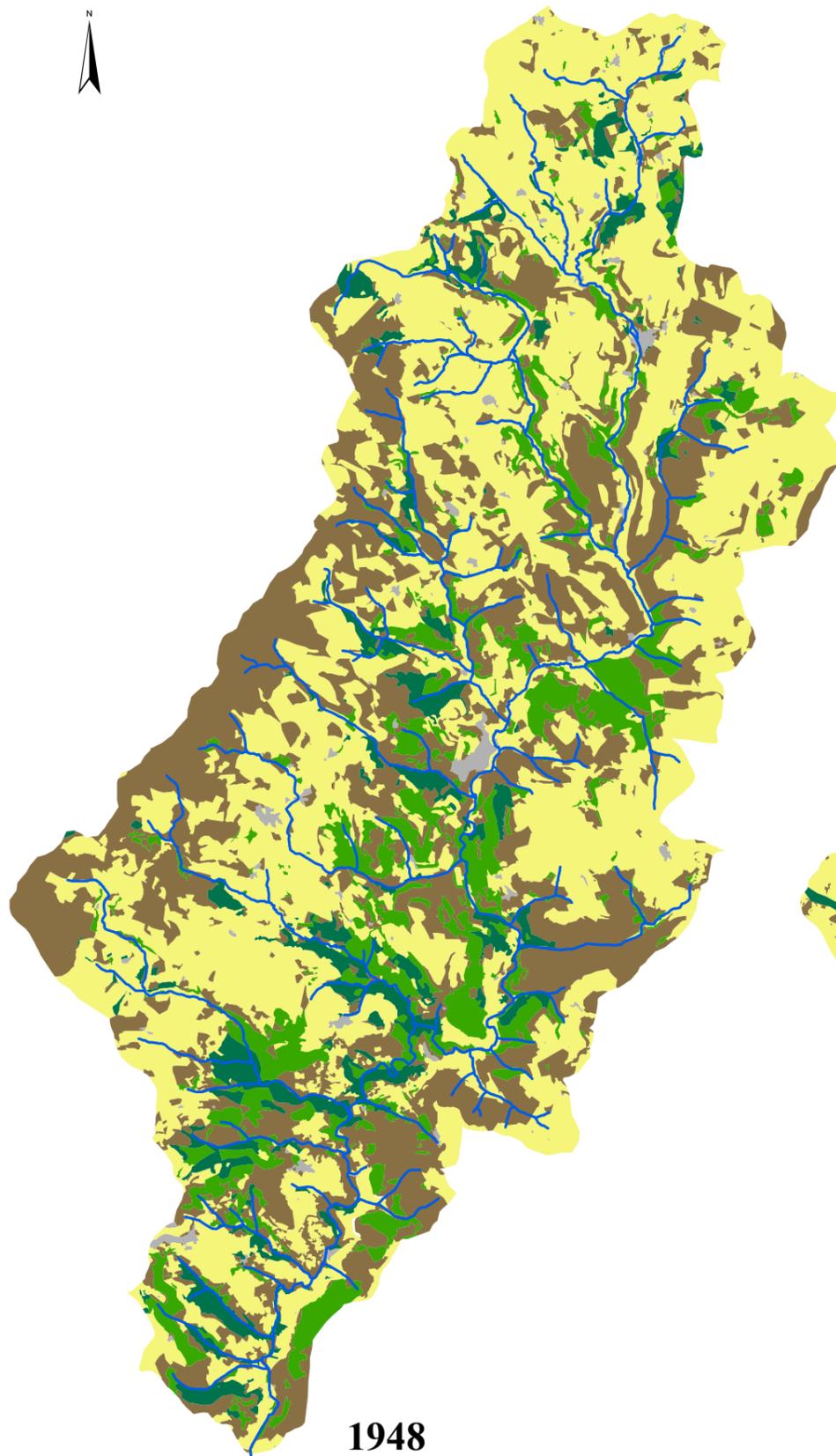
— Secteur 6

— Secteur 7

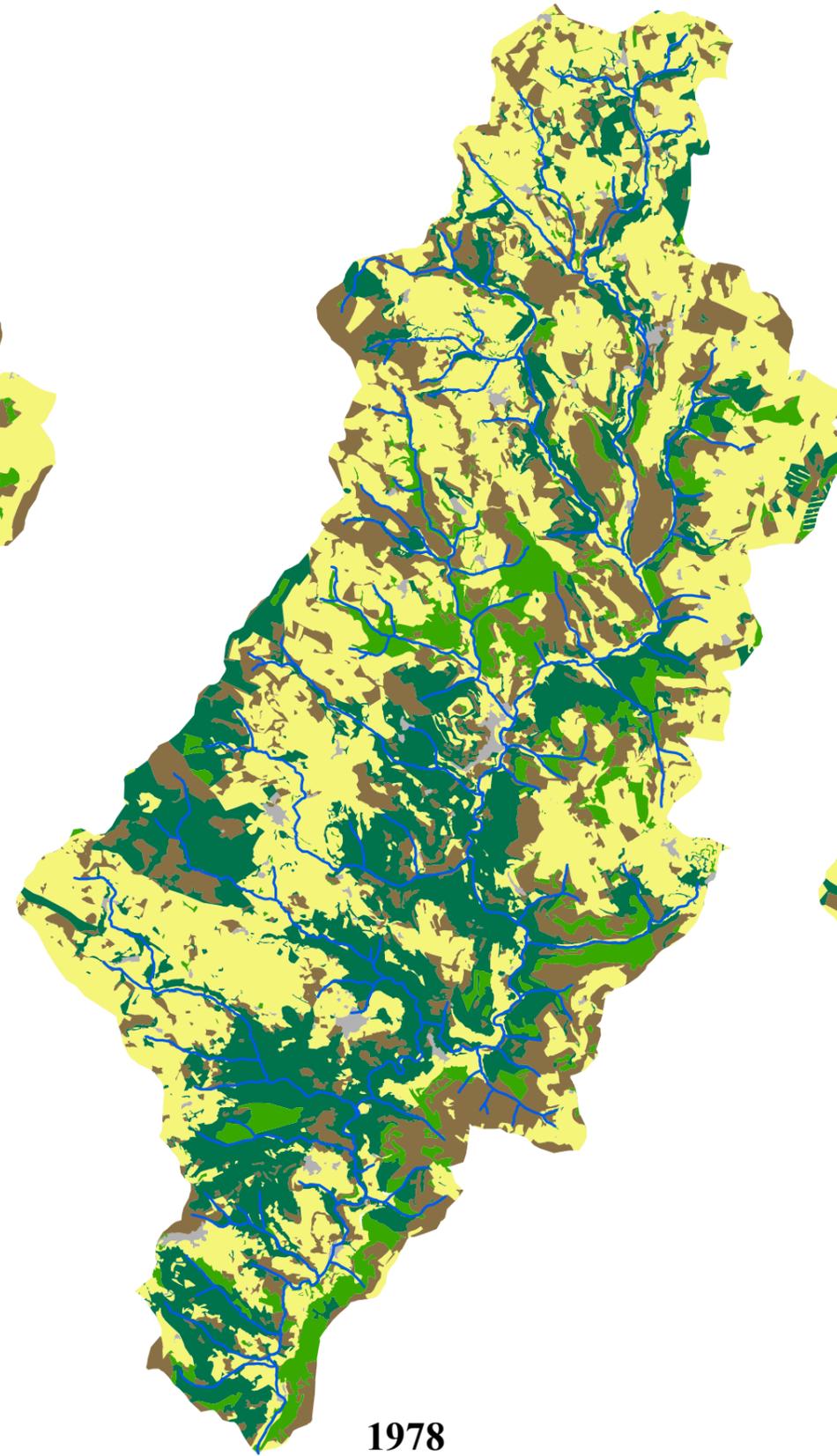
0 500 1000
Metres



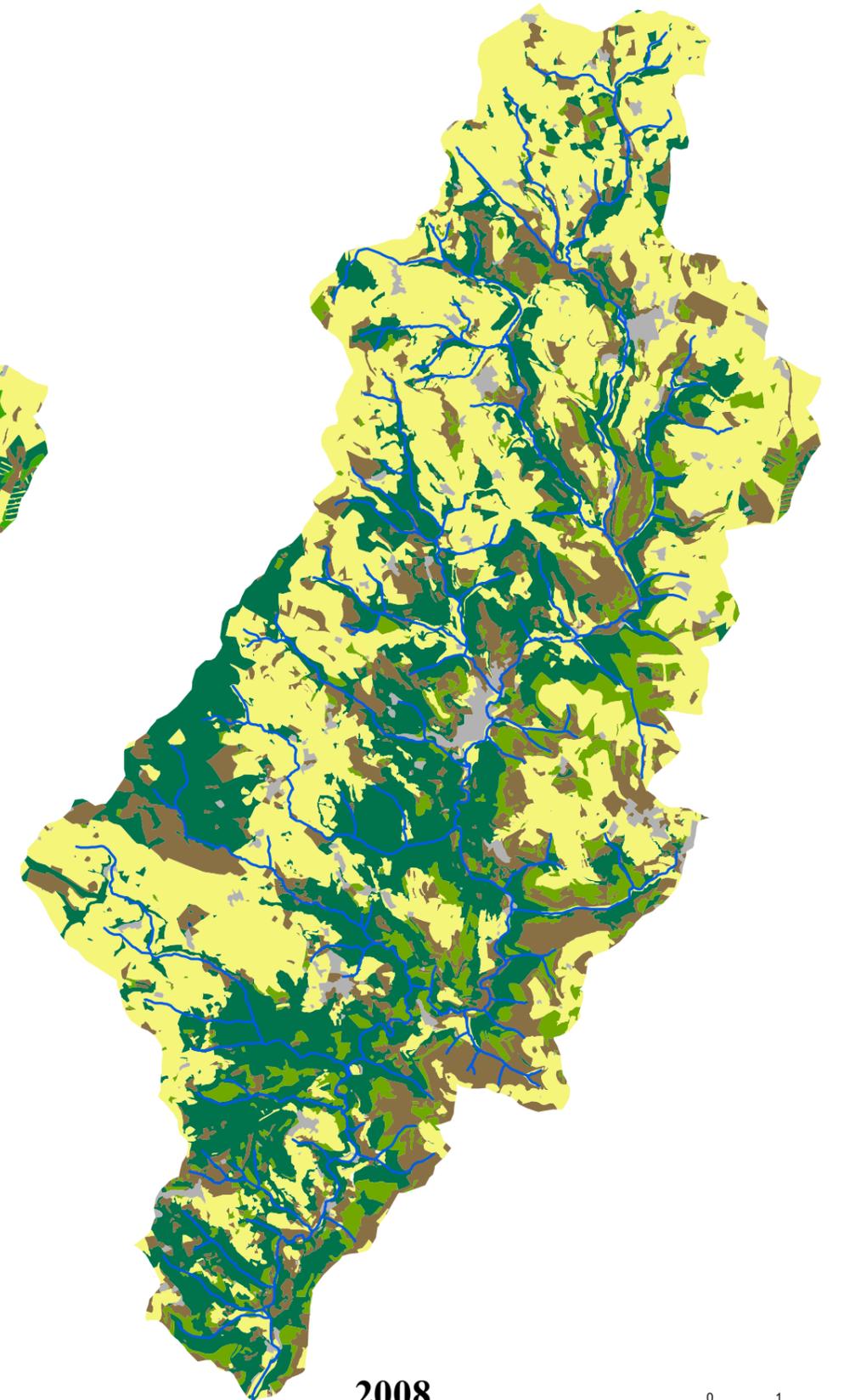
Occupation du sol en 1948, 1978 et 2008



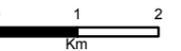
1948



1978



2008



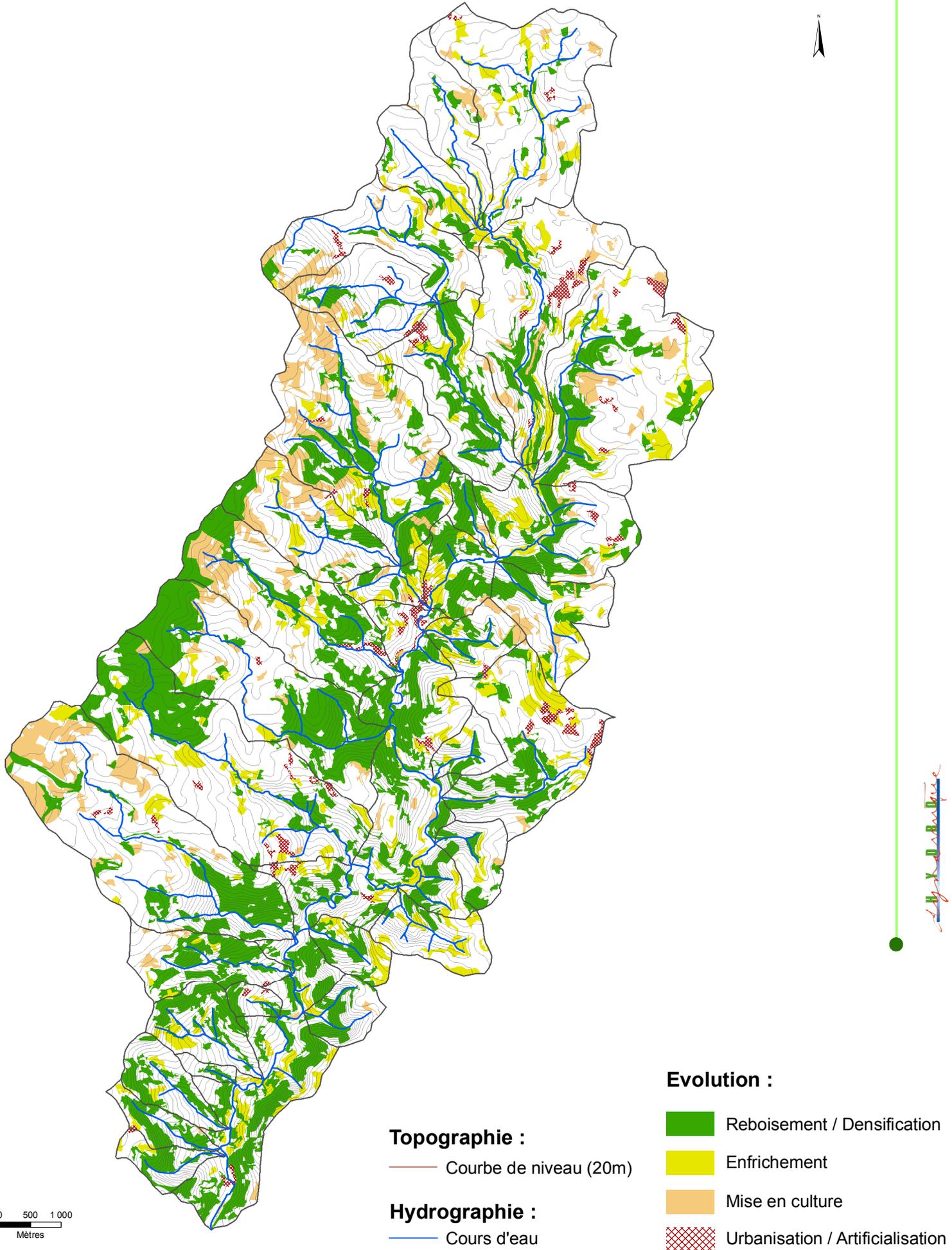
Type d'occupation :

- | | | | |
|---|--|--|---|
|  Boisements denses |  Landes, friches et prairies permanentes |  Roches nues |  Plans d'eau |
|  Boisements peu denses |  Cultures (dont prairies temporaires) |  Surfaces artificielles |  Cours d'eau |



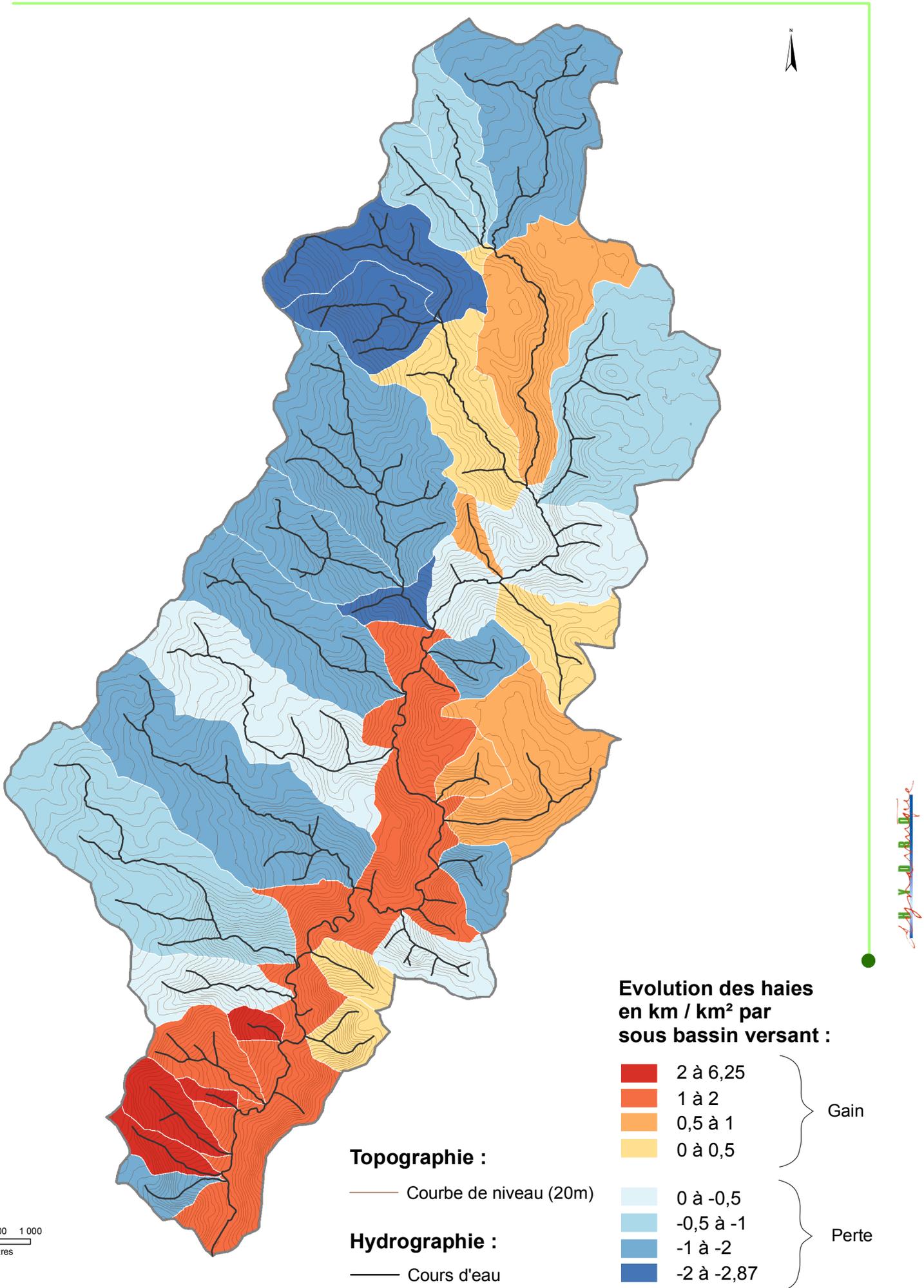
Evolution de l'occupation du sol entre 1948 et 2008

Carte n°3

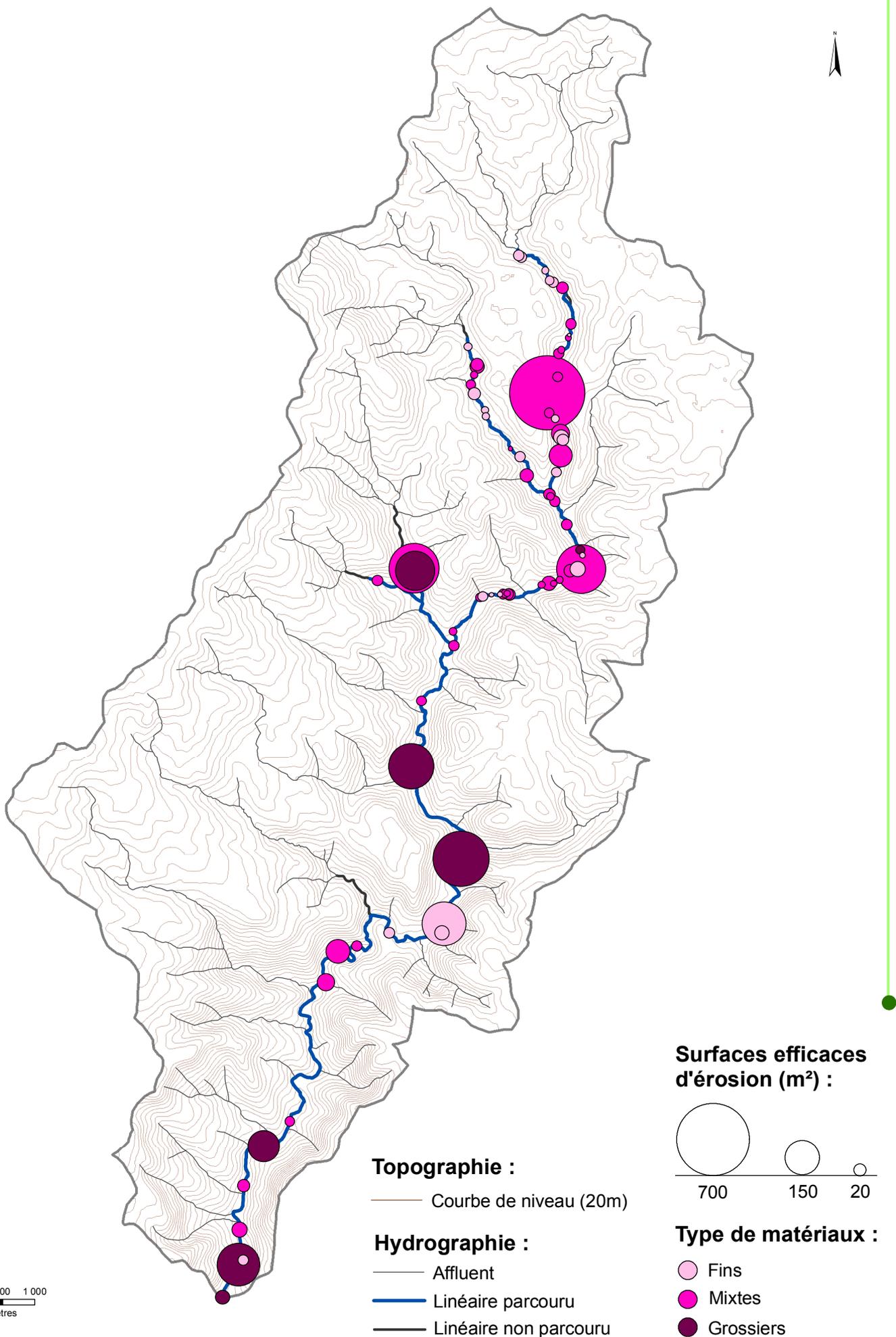


Evolution de la densité des haies entre 1978 et 2008

Carte n°4



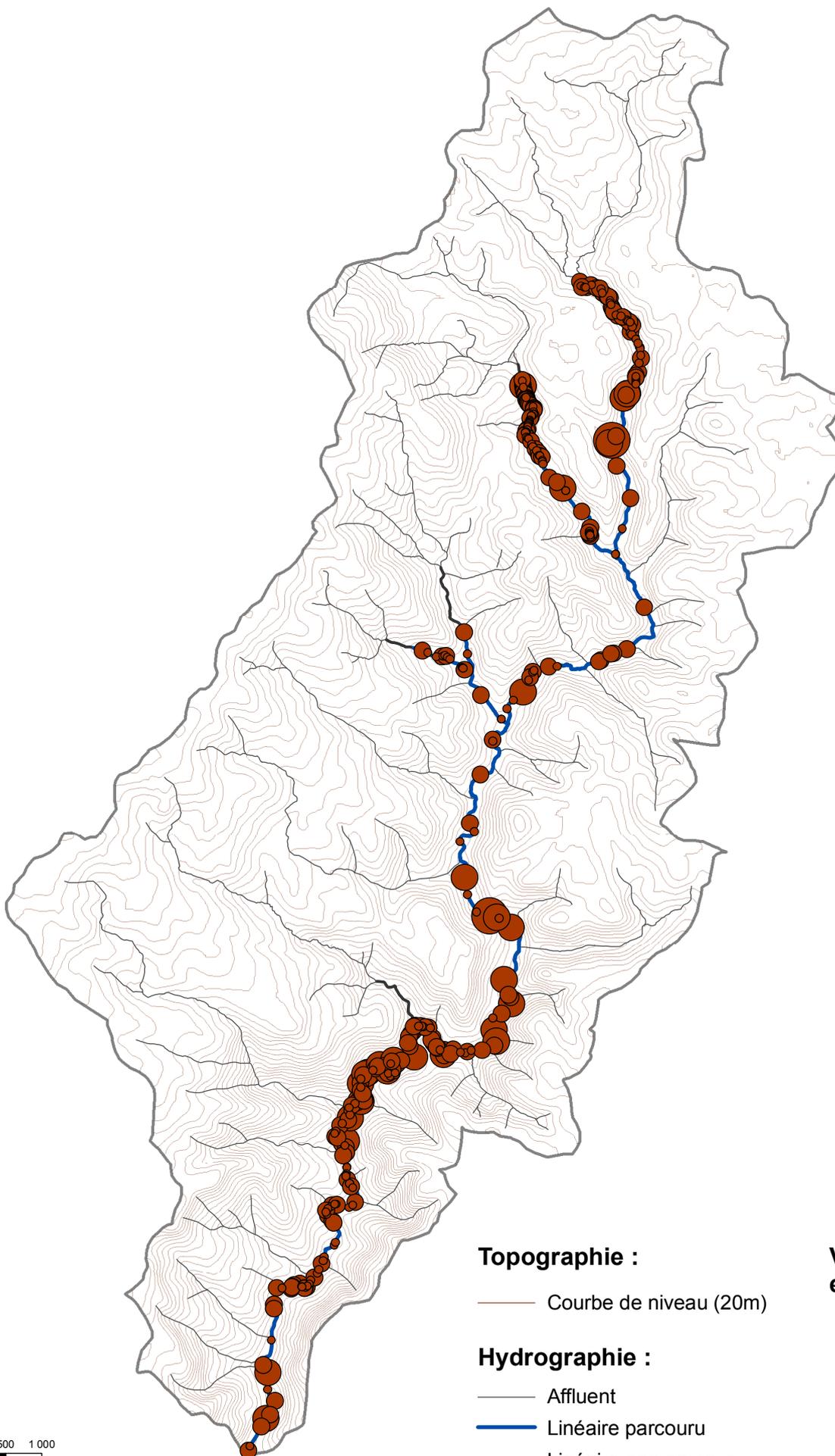
Inventaire des surfaces d'érosions



Hydrographie

0 500 1000
Mètres

Inventaire des embâcles



Topographie :

— Courbe de niveau (20m)

Hydrographie :

— Affluent

— Linéaire parcouru

— Linéaire non parcouru

Volume des embâcles (m³):

● < 1

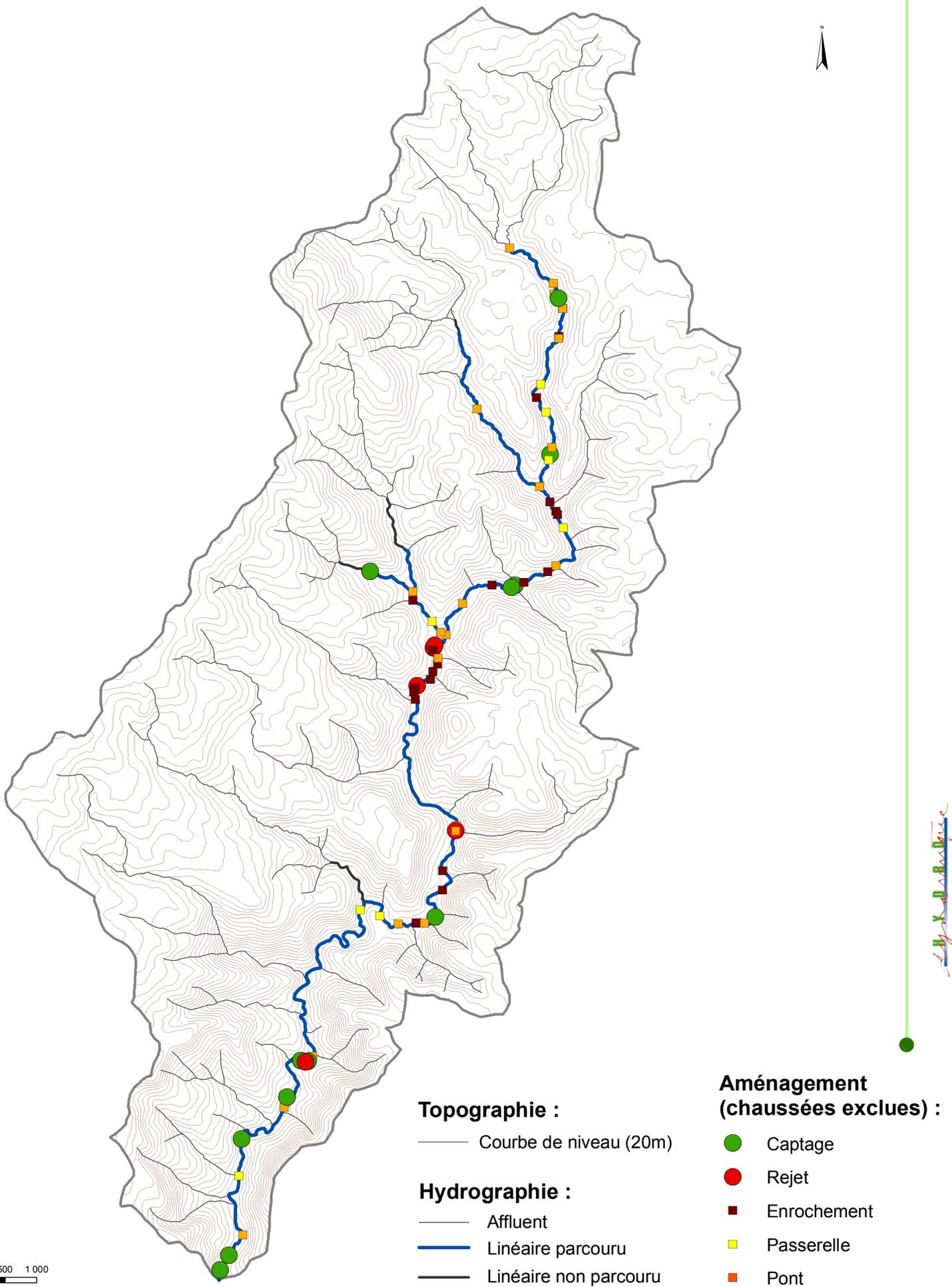
● 1 - 5

● 5 - 10

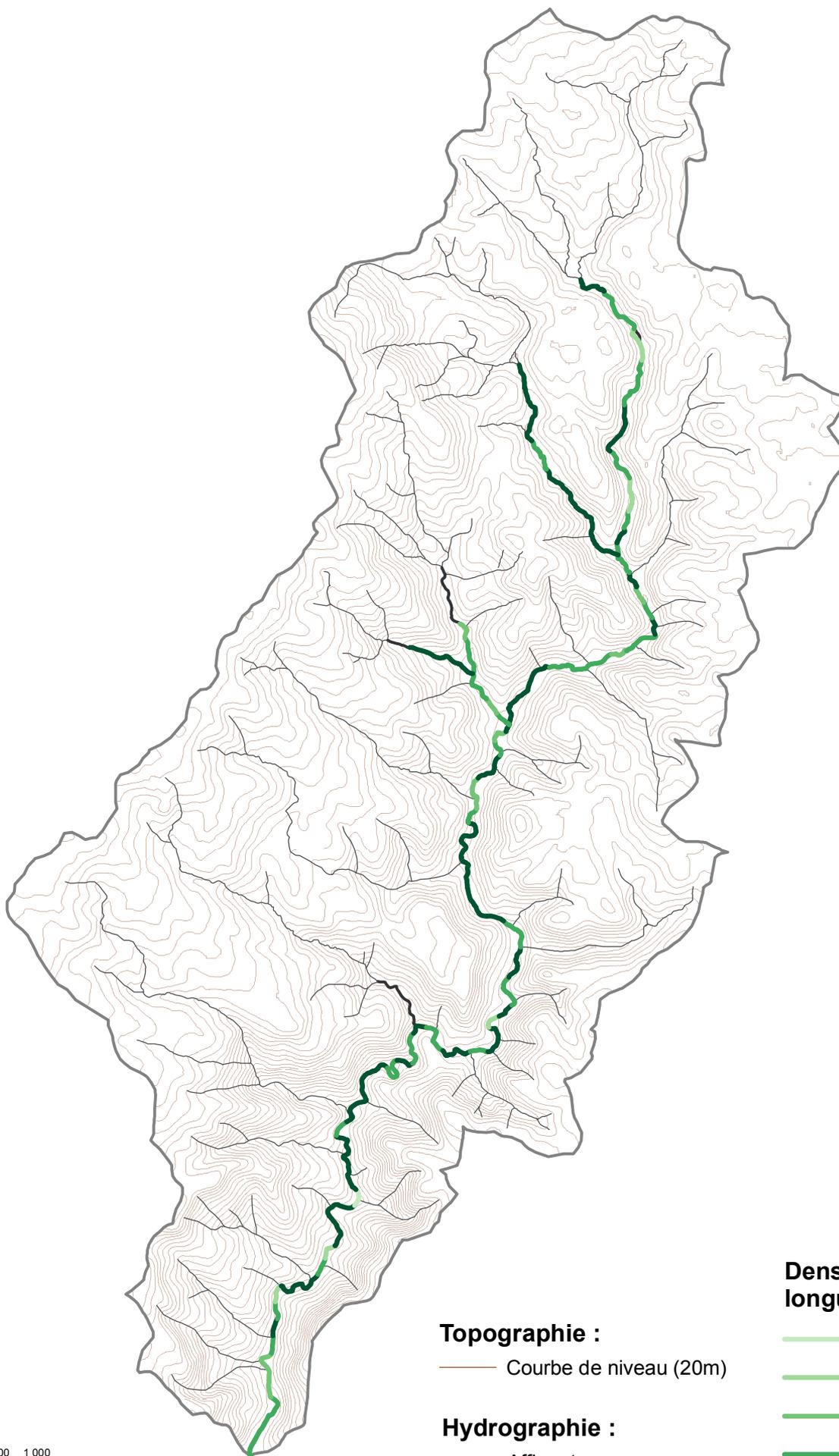
● ≥ 10

0 500 1000
Mètres

Inventaire des principaux aménagements



Densité de la ripisylve



HydroRipisylve

0 500 1 000
Mètres

Topographie :

— Courbe de niveau (20m)

Hydrographie :

— Affluent

— Linéaire non parcouru

Densité (en % de la longueur de rive) :

0 - 20

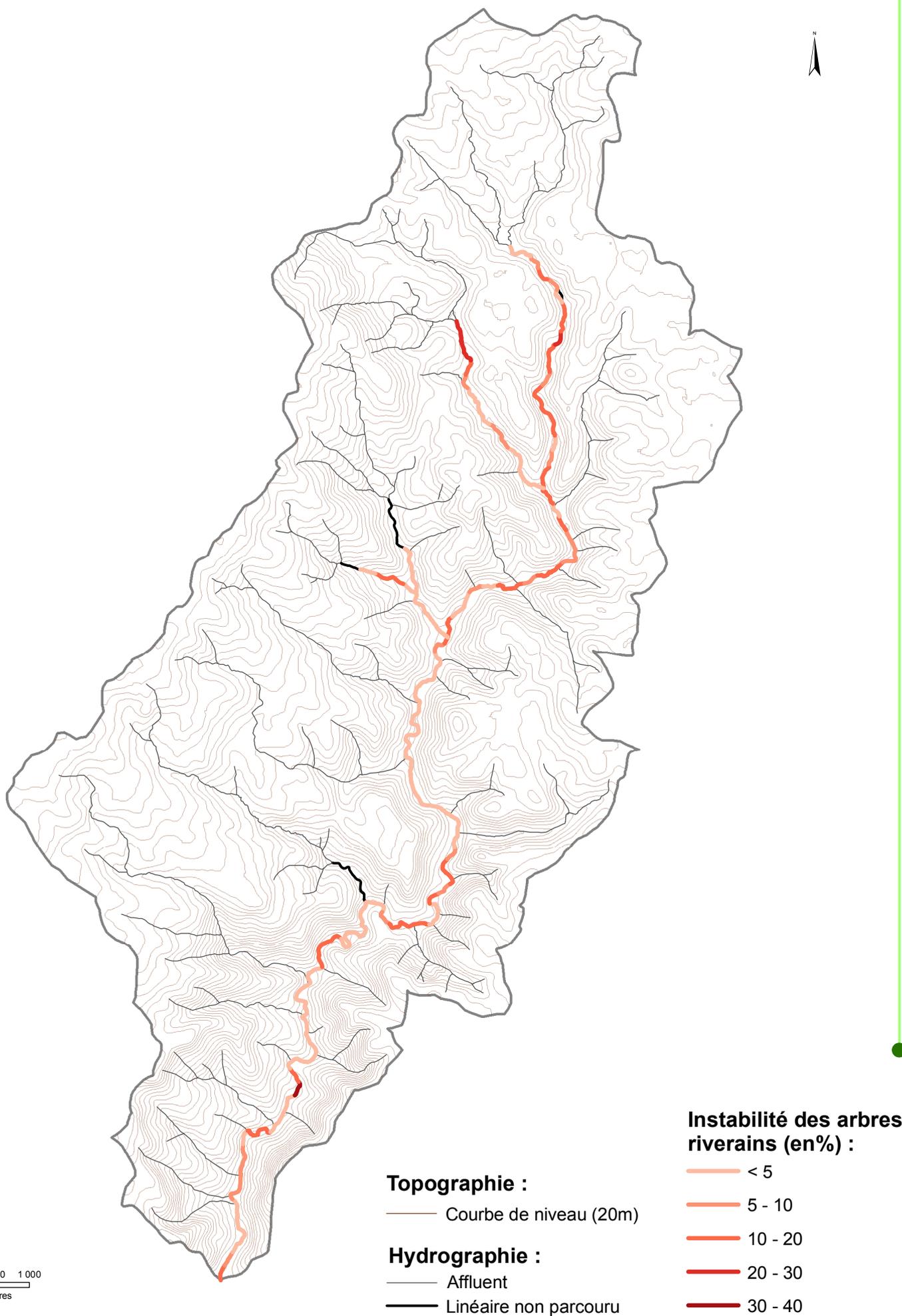
20 - 40

40 - 60

60 - 80

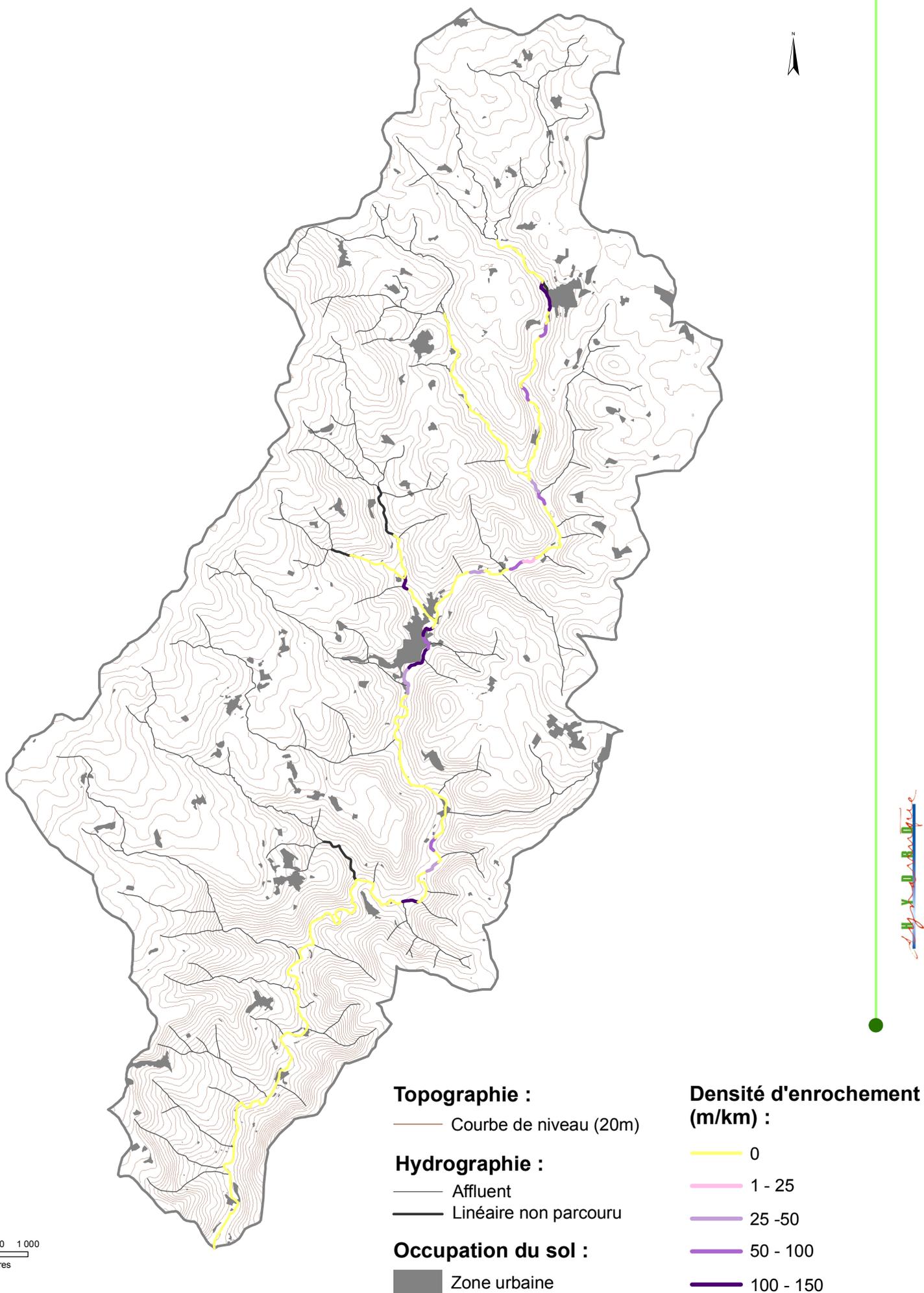
80 - 100

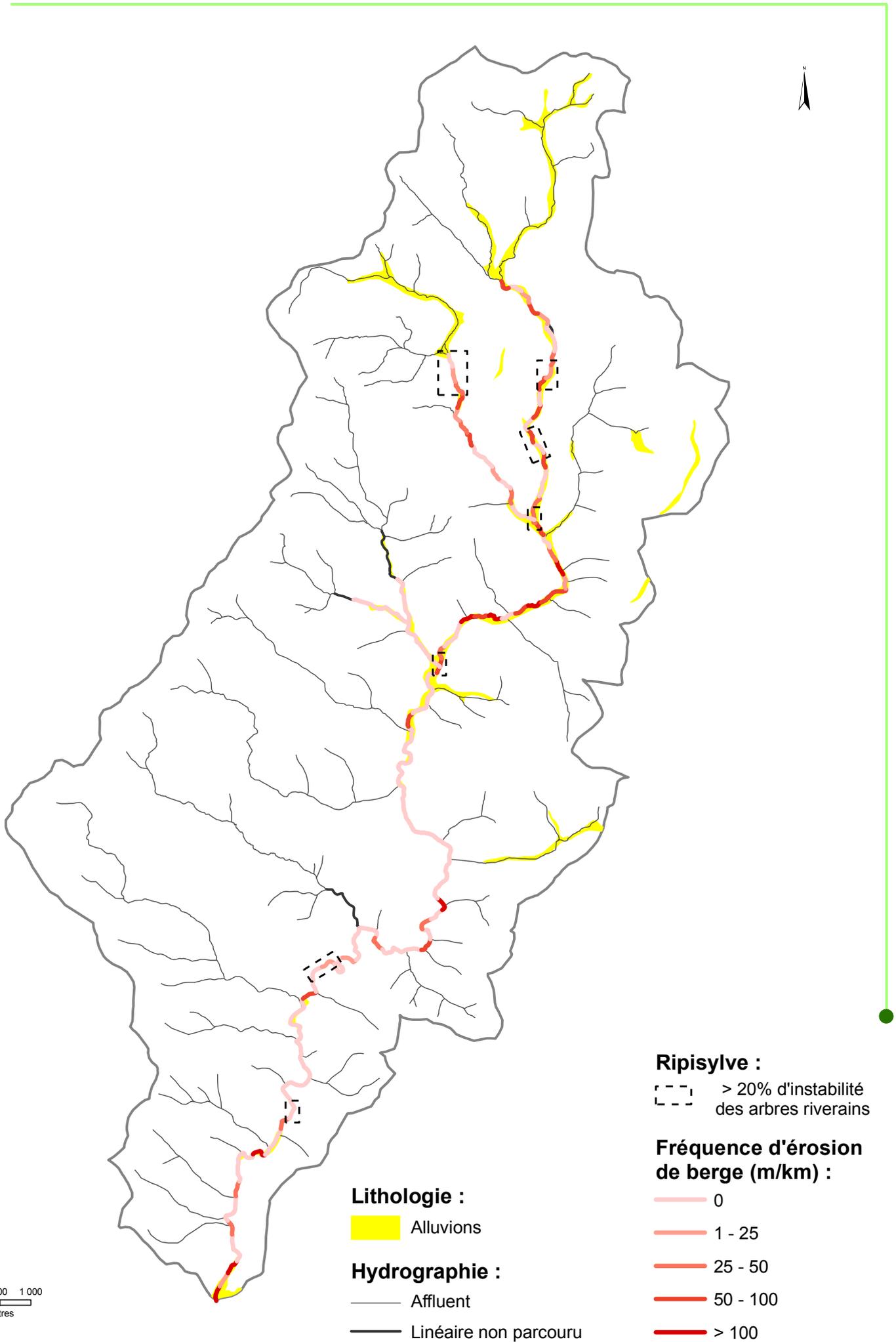
Stabilité de la ripisylve



0 500 1 000
Mètres

Inventaire des enrochements de berges





Hydrodynamique

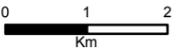
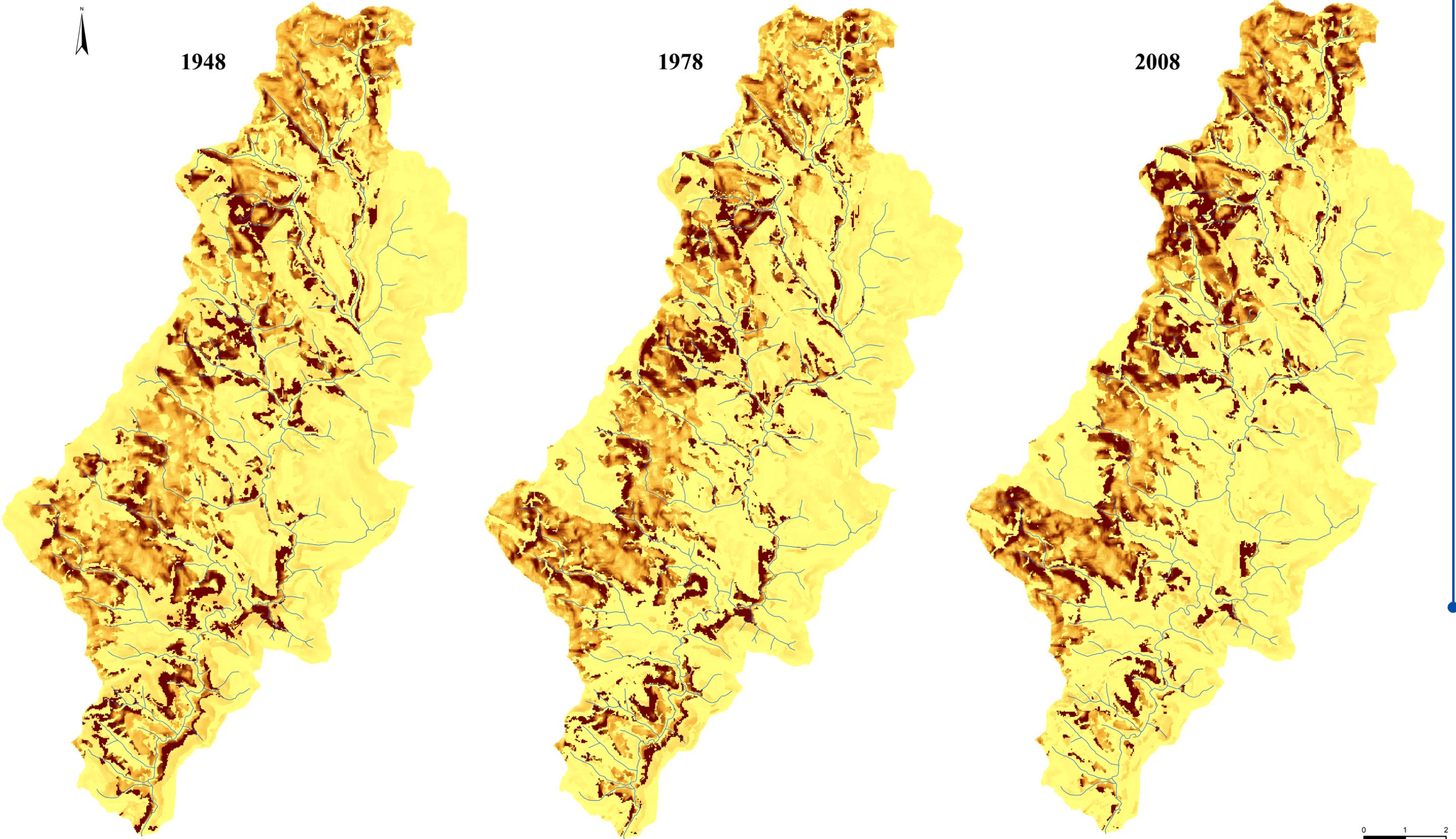
Production de sables par érosion des sols



1948

1978

2008



Score de production de sable :
(P x T x O)



— Cours d'eau

Score = $P \times T \times O$

Avec :

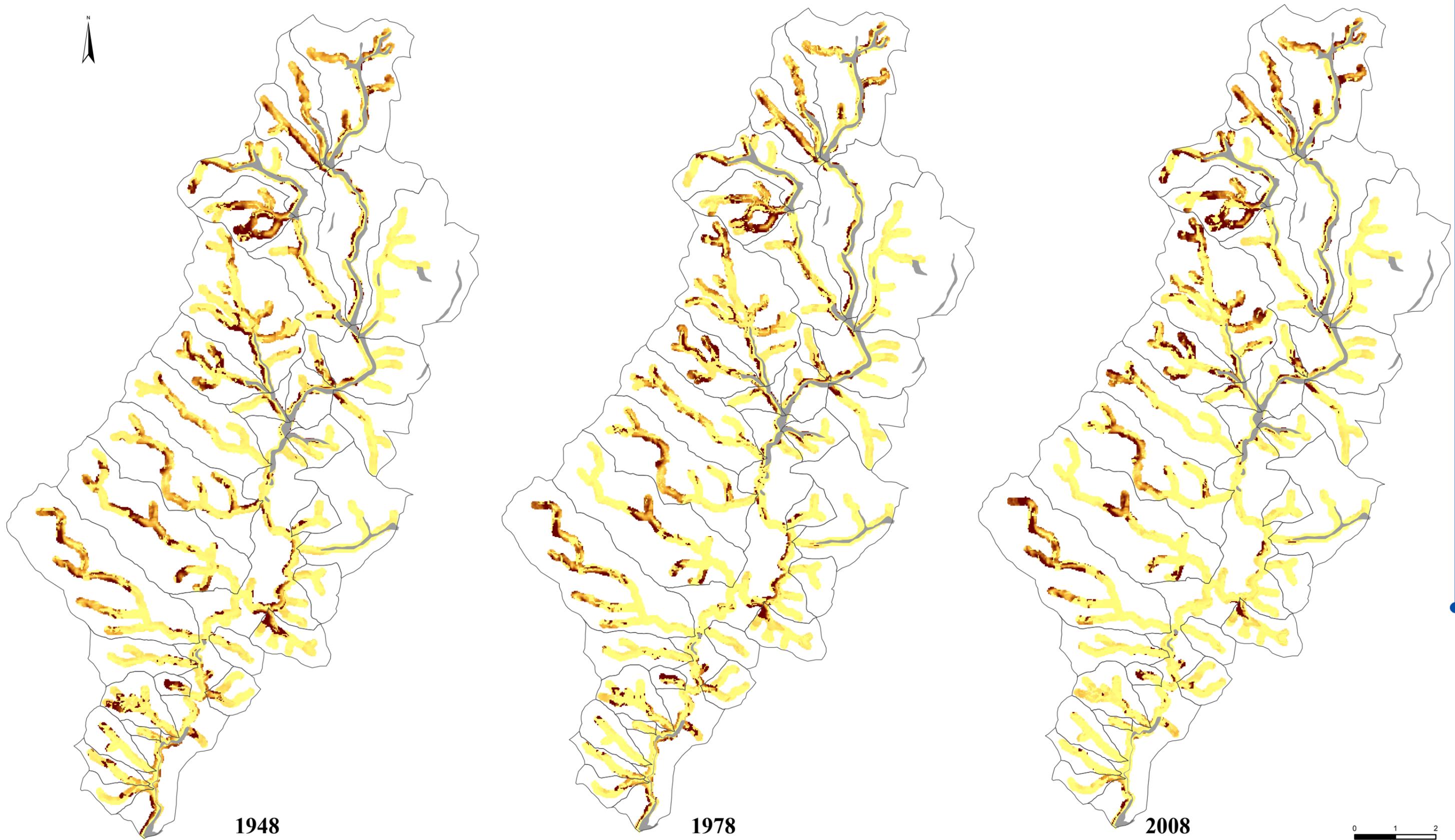
P : pente en m/m

T : coefficient de la teneur des sables des sols

O : coefficient de l'occupation des sols



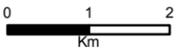
Production de sables sur les versants connectés au réseau hydrographique



1948

1978

2008



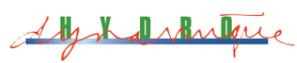
Score de production de sable :
(P x T x O)



- Alluvions
- Sous bassin versant

$$\text{Score} = P \times T \times O$$

Avec :
P : pente en m/m
T : coefficient de la teneur des sables des sols
O : coefficient de l'occupation des sols

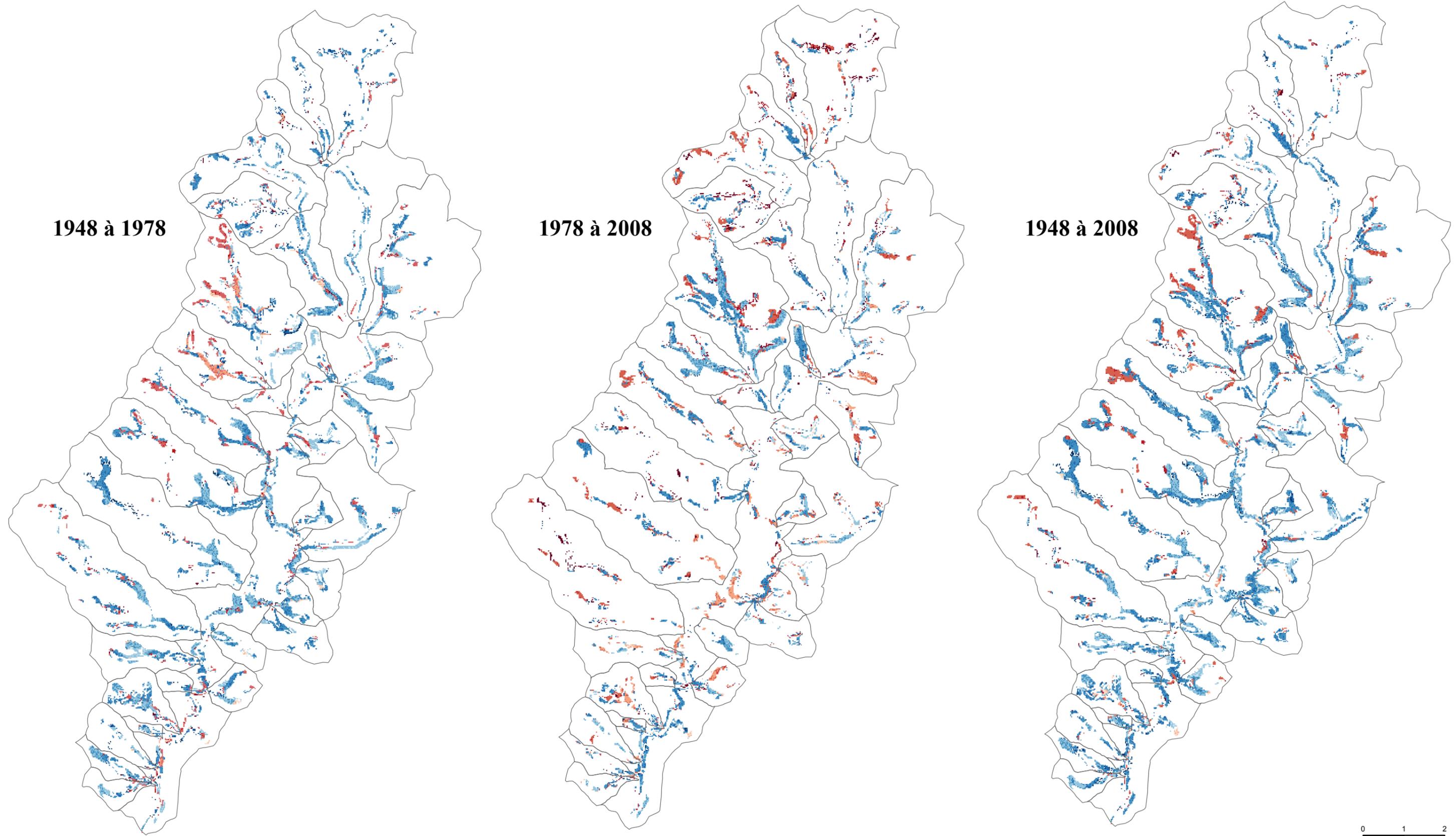


Evolution de la fourniture en sables

1948 à 1978

1978 à 2008

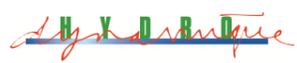
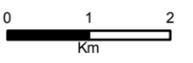
1948 à 2008



Rapport $\frac{\text{score final}}{\text{score initial}}$



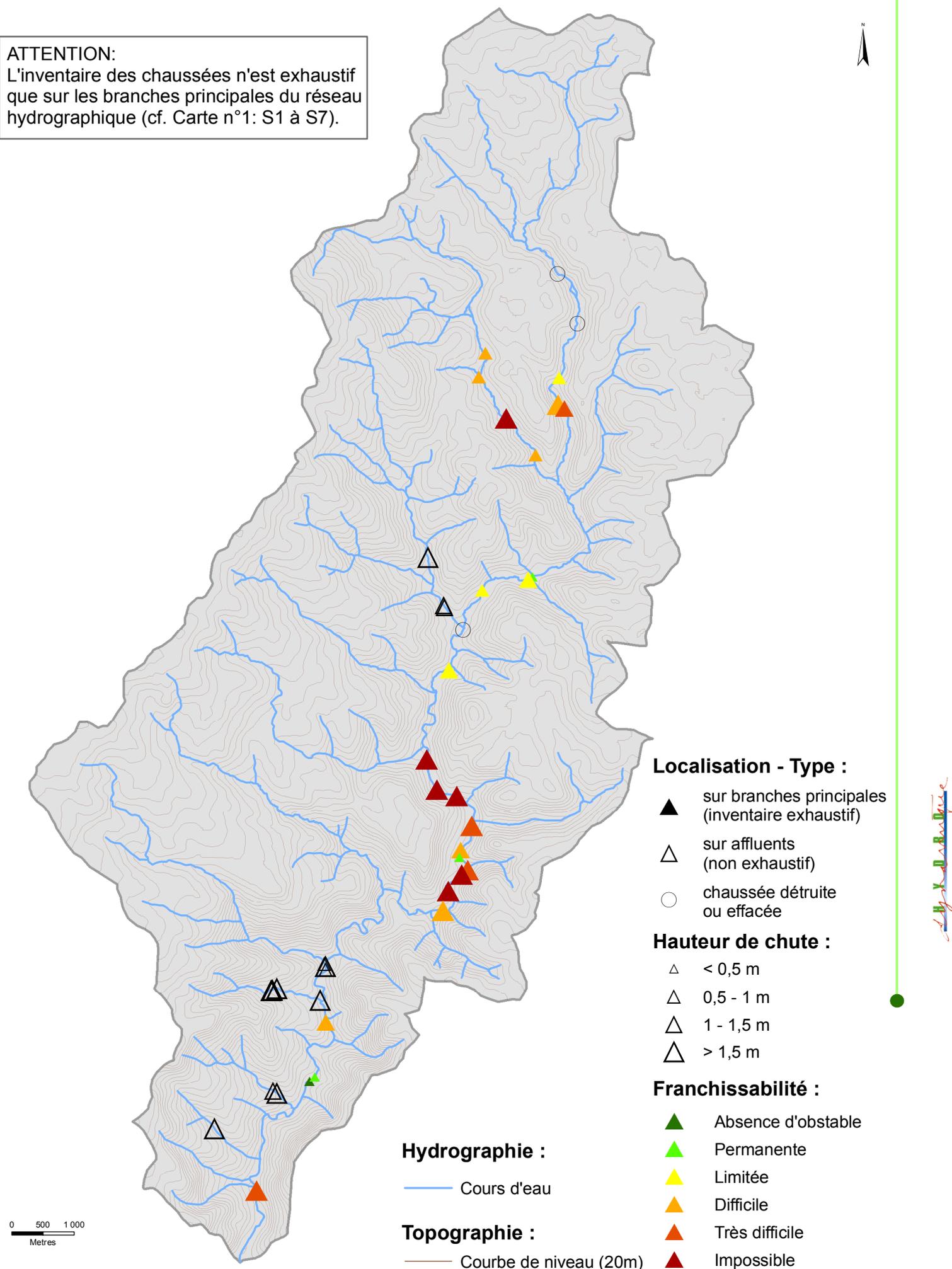
Sous bassin versant



Inventaire des chaussées

ATTENTION:

L'inventaire des chaussées n'est exhaustif que sur les branches principales du réseau hydrographique (cf. Carte n°1: S1 à S7).



0 500 1 000
Metres

Synthèse des dysfonctionnements

Ensemblement :

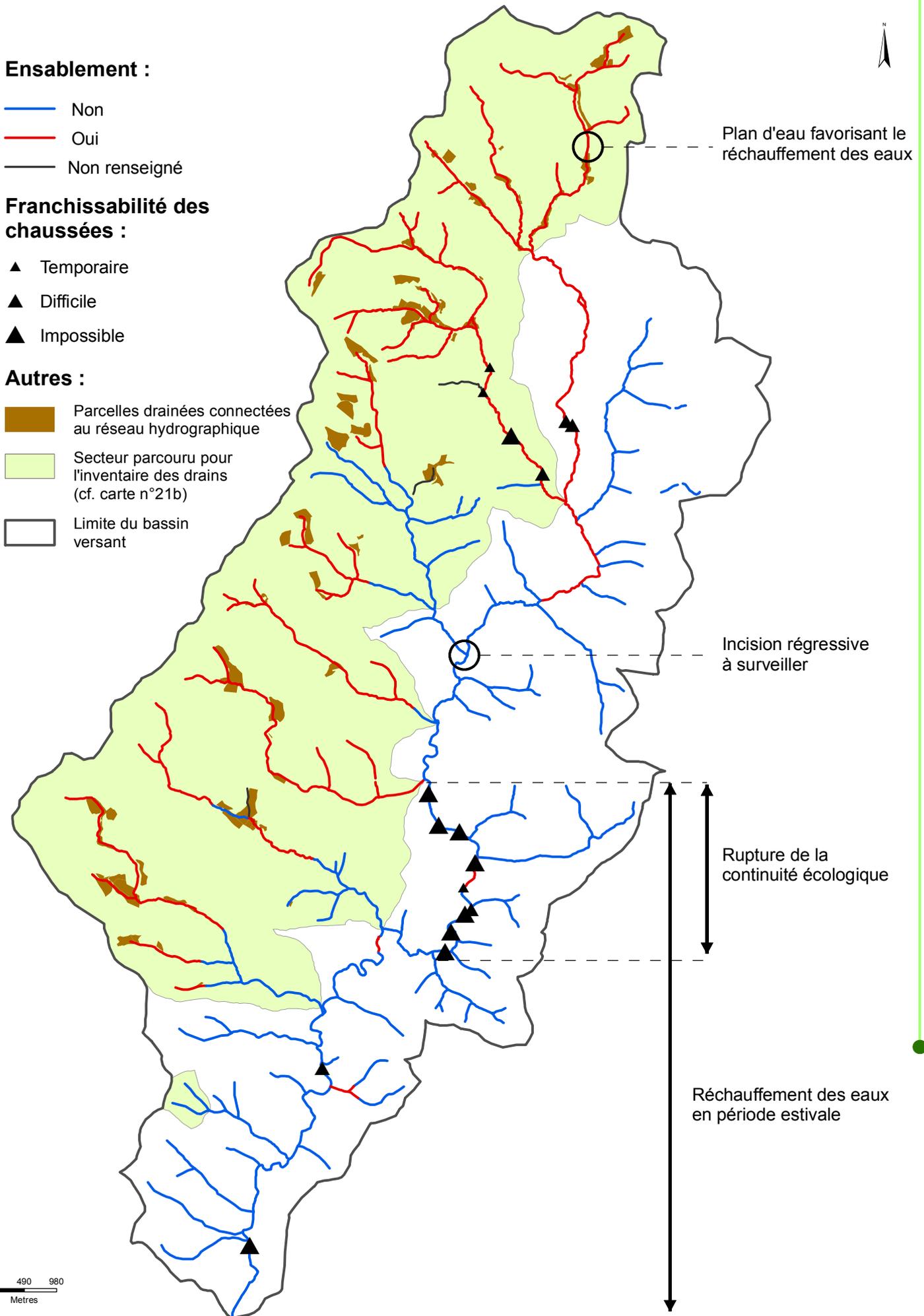
- Non
- Oui
- Non renseigné

Franchissabilité des chaussées :

- ▲ Temporaire
- ▲ Difficile
- ▲ Impossible

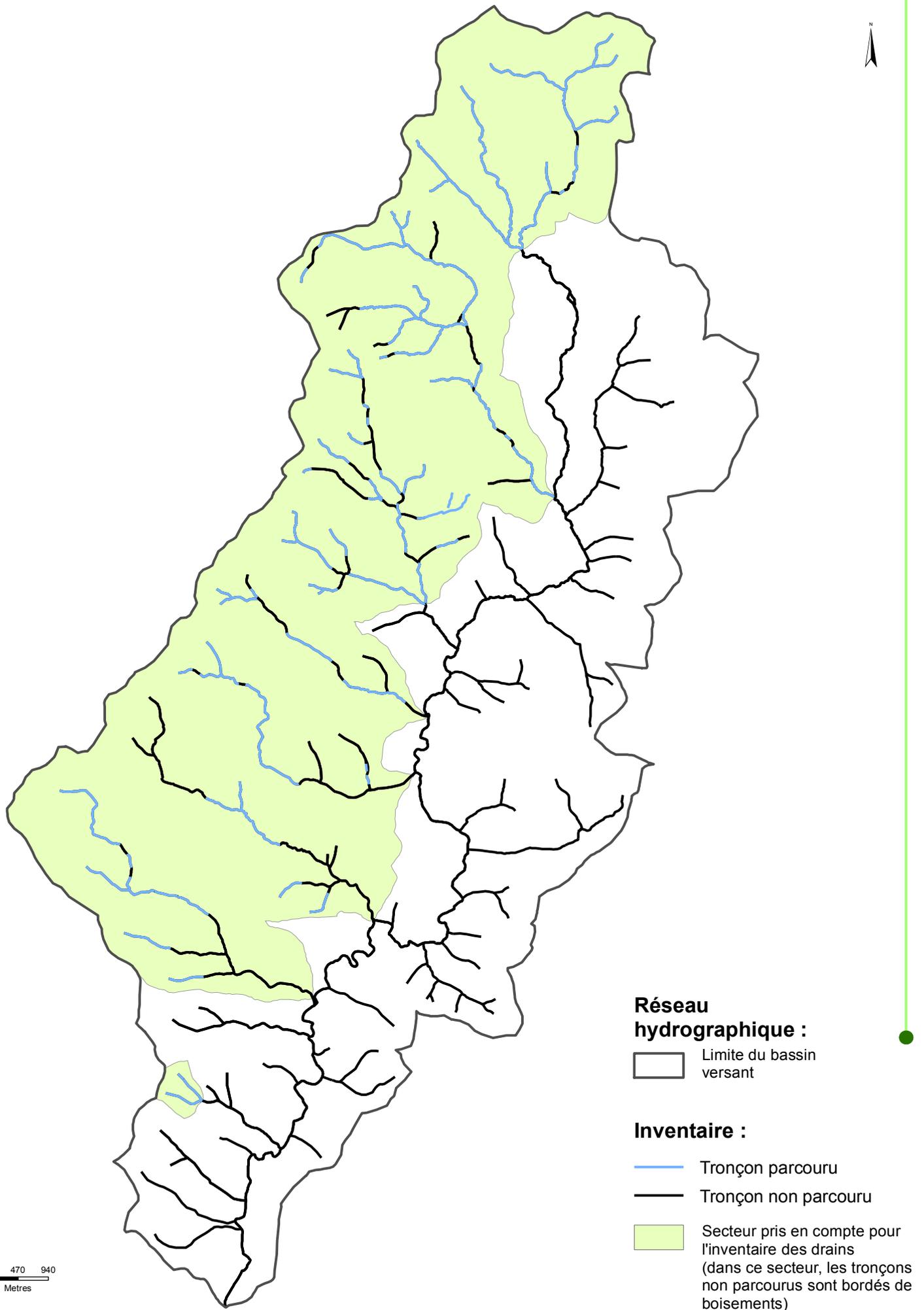
Autres :

- Parcelles drainées connectées au réseau hydrographique
- Secteur parcouru pour l'inventaire des drains (cf. carte n°21b)
- Limite du bassin versant



Dynamique Hydro

Inventaire des drains agricoles



Synthèse des enjeux écologiques

Révision du classement des cours d'eau (L214-17) :

 Tronçon proposé pour la liste 1 (Très bon état écologique)

 Tronçon proposé en liste 2

Qualité globale des habitats piscicoles :

 Très bon

 Bon

 Moyen

 Faible

 Non renseigné

Zones à enjeux :

 Zones humides observées

 Zones humides potentielles

 ZNIEFF

