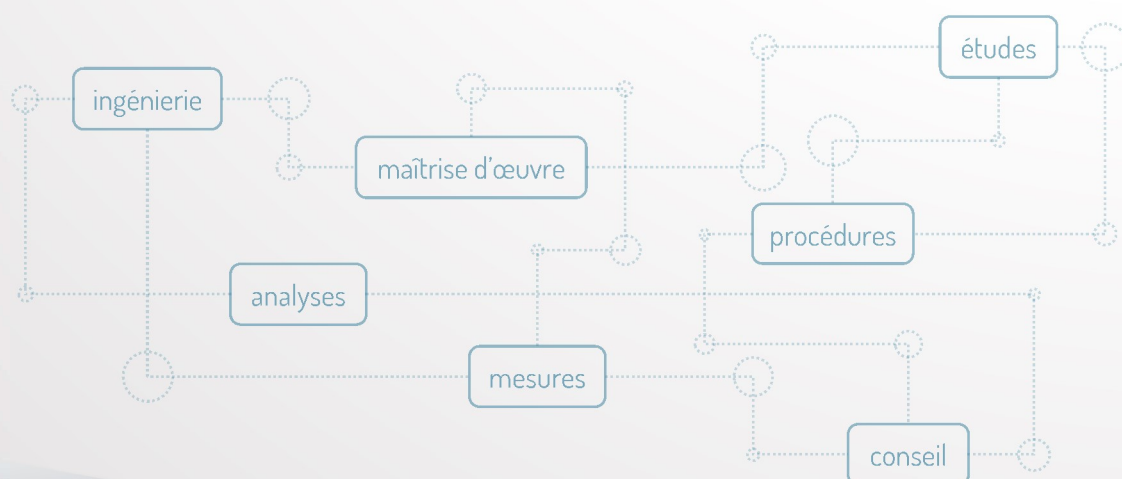


Analyse des effets des pulses hydrauliques de décolmatage sur le substrat minéral en Moyenne et Basse Durance

Synthèse pluriannuelle (2014-2019)



Etude réalisée avec le concours financier de l'Agence de l'Eau RM&C



décembre 2020



12 Avenue du Pré de Challes – Parc des Glaisins
 ANNECY LE VIEUX – 74 940 ANNECY
 ☎ 04 50 64 06 14 ☎ 04 50 64 08 73
 @ : sage.annecy@sage-environnement.fr
 ① : www.sage-environnement.com

Fiche document :

Informations :

Client / Maître d'ouvrage :	EDF CIH
Contact – Coordonnées :	Remi L
Numéro dossier SAGE :	19090
Responsable :	Quentin Dumoutier
Assistant(e)s :	
Relecteur :	
Titre :	Analyse des effets des pulses hydrauliques de décolmatage sur le substrat minéral en Moyenne et Basse Durance
Sous titre – objet :	Synthèse pluriannuelle (2014-2019)
Catégorie document :	Synthèse finale
Mots clés :	Durance Synthèse Débits réservé Pulse
Statut document :	Final
Indice de révision :	V2
Référence document :	QD/19090/RapPulseSynthèsee
Confidentialité :	
Fichier :	rappulse_synthese_2014-19 V2.docx
Date :	11/12/2020
Nombre de pages :	60

Historique des versions et révisions :

Indice révision	Date	Détails – modifications	Resp.
1	26/10/2020	Version initiale	Quentin Dumoutier
2	08/12/2020	Version finale	Quentin Dumoutier

Avertissement :

Ce document, les données, informations, analyses et conclusions qu'il contient sont la propriété du maître d'ouvrage. Toute reproduction, diffusion, publication, mise en ligne, même partielle, ne peut être effectuée sans son accord préalable mentionné par écrit. Le cas échéant, citation doit être faite de la source des éléments reproduits.

SAGE Environnement ne communiquera aucune information, document ou fichier en dehors de ce cadre.



12 Avenue du Pré de Challes – Parc des Glaisins
ANNECY LE VIEUX – 74 940 ANNECY
☎ 04 50 64 06 14 📠 04 50 64 08 73
@ : sage.annecy@sage-environnement.fr
🌐 : www.sage-environnement.com

PRÉAMBULE

Le colmatage minéral peut être défini comme le dépôt et l'infiltration de sédiments fins au sein du lit des cours d'eau conduisant au comblement des interstices du substrat minéral et à l'altération de ses fonctions (Gayraud et al., 2002). Phénomène pourtant naturel, le colmatage peut être amplifié par diverses activités anthropiques sources de déséquilibres entre les processus naturels d'apport et de transport des sédiments fins (Gayraud et al., 2002, Wood & Armitage, 1997). Ce processus est notamment observé à l'aval de grands ouvrages hydroélectriques. Parmi les conséquences les plus connues du colmatage minéral, on retrouve par exemple la diminution des effectifs mais aussi de la survie des œufs et alevins émergents chez les espèces de poissons lithophiles (Bruslé & Quignard, 2001, Chapman, 1988, Souchon & Nicolas, 2011).

La Durance, deuxième affluent du Rhône en termes de longueur après la Saône, a servi de support au développement d'un important réseau d'aménagements hydroélectriques avec notamment la construction du barrage de Serre-Ponçon en 1950 (Chapuis, 2012). La perturbation hydrologique engendrée par l'ouvrage de Serre-Ponçon a conduit à l'apparition de phénomènes de colmatage dans le lit mineur de la Durance, notamment sur la portion amont. Dans le cadre du relèvement des débits réservés en 2014 et suite à l'expérimentation Ste-Tulle et à la démarche initiée dans le cadre du contrat de rivière animé par le SMAVD, le groupe Electricité de France (EDF) a donc-proposé la mise en place d'un programme de lâchers d'eau claire sur la période de 2014-2019, appelés pulses hydrauliques, depuis 4 barrages en Moyenne et Basse Durance. Ces pulses ont pour vocation principale l'amélioration de la qualité du substrat minéral servant de support de ponte aux espèces lithophiles cibles. Il est également attendu des pulses qu'ils favorisent les invertébrés benthiques. Un protocole d'étude de l'effet des pulses, basé sur le suivi du substrat minéral, de l'ichtyofaune et des macro-invertébrés benthiques a été mis en place par EDF et réalisé par le bureau d'études SAGE Environnement. Le présent rapport constitue une synthèse des résultats obtenus dans le cadre des suivis réalisés sur le substrat minéral du lit de la Durance durant la période 2014-2019. Il actualise avec des données récentes la précédente synthèse, réalisée en 2016, sur la période 2014-2016.

Il s'agit ici d'analyser les effets des pulses sur le substrat à travers divers indicateurs (physico-chimiques, granulométrie, enchâssement, dépôts de limons et colmatage interstitiel) afin de déterminer si les pulses hydrauliques entraînent des changements significatifs.

TABLE DES MATIERES

PRÉAMBULE.....	3
I. Contexte de l'étude	7
I.1 Aire d'étude : La Durance.....	7
I.2 La Chaîne d'aménagements hydroélectriques.....	7
I.3 Contexte réglementaire	9
I.3.1 Relèvement des débits réservés	9
I.3.2 Les pulses d'eau claire	9
II. Le colmatage : définitions, processus de formation et principaux effets	11
II.1 Définitions	11
II.2 Processus favorisant le colmatage	11
II.3 Effets du colmatage sur les invertébrés benthiques et l'ichtyofaune	11
II.4 Le cas de la Durance.....	12
III. Présentation des données exploitées.....	13
III.1 Programme d'étude	13
III.2 Stations de mesures.....	14
III.3 Dates des pulses et contexte hydro-climatique.....	17
III.4 Protocoles de mesure	19
III.4.1 Monitoring du pulse en temps réel	21
III.4.1.1 Collecte des données.....	21
III.4.1.2 Evaluation du transport solide en suspension.....	21
III.4.2 Suivi du colmatage superficiel	23
IV. Traitements des données et résultats	26
IV.1 Monitoring en temps réel	26
IV.1.1 Pulses appliqués sur la période 2014-2019	26
IV.1.2 Effets sur les paramètres de physico-chimie in situ	27
IV.1.3 Effet sur le transport de matières en suspensions	28
IV.1.3.1 Présentation des résultats	28
IV.1.3.1.a Variations de la hauteur d'eau :	32
IV.1.3.1.b Variations de la concentration en MES :	32
IV.1.3.2 Analyses quantitatives.....	36
IV.1.4 Synthèse sur l'efficacité hydraulique du pulse	38
IV.2 Suivi du colmatage superficiel.....	40
IV.2.1 Traitement des données	40
IV.2.2 Analyse du colmatage et de l'enchâssement	41
IV.2.2.1 Caractérisation du site d'étude.....	41
IV.2.2.2 Variabilité temporelle.....	43
IV.2.2.3 Effet du pulse.....	45
IV.2.2.3.a Evolution de l'enchâssement liée au pulse.....	45
IV.2.2.3.b Effet du pulse sur les placettes favorables	47
IV.2.1 Analyse de la couverture de limons.....	50
IV.2.1.1 Caractérisation du site d'étude.....	50
IV.2.1.2 Variabilité temporelle.....	51
IV.2.1.3 Effet du pulse.....	53

V. Bilan du dimensionnement et de l'effet des pulses.....	54
Bibliographie.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chaîne d'aménagements hydroélectriques de la Durance (Barillier, 2012)	8
Figure 2 : récapitulatif des débits réservés appliqués après janvier 2014 sur la Moyenne et Basse Durance	9
Figure 3: Chronologie des pulses hydrauliques de décolmatage réalisés sur la Durance de septembre 2007 à nos jours – en bleu ceux dont le suivi a été réalisé par SAGE Environnement, objets de cette étude- <i>Pour Cadarache le débit de lâché pris en compte comprend le débit réservé.</i>	13
Figure 4 : Localisation des stations de suivi hydrobiologique de la Durance (fond modifié d'après Barillier, 2012)	14
Figure 5: Profil en long de la Durance, de la queue de barrage d'Espinasses au pied du barrage de Mallemort (altitudes d'après l'IGN, édition 2016)	15
Figure 6 : Hydrogrammes des débits déversés aux barrages concernés par l'étude et précipitations journalières moyennes de janvier 2014 à septembre 2019. Les triangles rouges marquent les pulses réalisés ; les jaunes ceux qui ont été annulés (sources : EDF & Météociel)	18
Figure 7 : exemple de déploiement de préleveurs automatiques et d'équation de corrélation obtenue sur la Saulce en 2016. (Station SAU4).....	22
Figure 8: stratégie de relevé de la granulométrie, de l'enchâssement et du dépôt de limon sur une station standard .	23
Figure 9 : Hydrogrammes des pulses appliqués sur la Durance en fonction des tronçons et des années	26
Figure 10 : évolution de la température, de la conductivité et de la saturation en oxygène au passage du pulse sur la station Sau4 en 2016.	28
Figure 11 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 – Tronçon d'Espinasses.....	29
Figure 12 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 – Tronçon de la Saulce	30
Figure 13 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 : – Tronçons de l'Escaie et de Cadarache.....	31
Figure 14 : relation « type » de l'évolution en hystérèse de la relation hauteur d'eau / MES observée sur les pulses – Ex du tronçon de la Saulce en 2016	33
Figure 15: mise en relation de la valeur du pic de MES au niveau de la station aval (SAU4) avec le nombre de jours distant du précédant déversement dans le tronçon court-circuité.....	34
Figure 16 : Transport solide total (TST, tonnes) et transports solides spécifiques (TSS, tonnes/km) estimés à l'occasion des pulses hydrauliques.....	36
Figure 17: mise en relation du transport solide en suspension exporté par les pulses de la Saulce avec le nombre de jours distant du précédant déversement dans le tronçon court-circuité.....	37
Figure 18 : bilan des principaux indicateurs d'efficacité hydraulique du pulse (nc : non calculable).....	38
Figure 19 : Indice d'enchâssement pour les tronçons (A) et les stations (B) suivis, sur la période 2014-2019	42
Figure 20 : Variation de l'indice d'enchâssement au cours des saisons	43
Figure 21: mise en relation de la valeur moyenne de colmatage de l'état initial Saulce avec le nombre de jours distant du précédant déversement dans le tronçon court-circuité de la Saulce	44
Figure 22 : variations de l'enchâssement lors de chaque pulse. Les flèches indiquent les variations statistiquement significatives	45
Figure 23 : classes de dépôts de limons observées lors des états initiaux à partir de fin 2015 ; (A) à l'échelle du tronçon ; (B) à l'échelle des stations.....	50
Figure 24 : Variation classes de limons au cours du suivi	51
Figure 25 : Variations des classes de limons entre les campagnes. Les flèches indiquent les variations statistiquement significatives entre campagnes consécutives à l'échelle des tronçons	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des pulses d'eau claire tels que proposé en 2014 par EDF en Moyenne et Basse Durance. Ces couples durée/débit ont parfois évolué au cours du suivi suite au retour d'expérience.....	10
Tableau 2 : principales caractéristiques des stations de suivi.	15
Tableau 3: Espèces cibles pour chaque tronçon étudié	17
Tableau 4 : Synthèse des données disponibles sur la période 2014-2019; en grisé, les pulses annulés ; en bleu les interventions prévues qui n'ont pu être réalisées ; en orange, les données incomplètes.....	20
Tableau 5: Echelle granulométrique de Wentworth (1992) modifiée par Malavoi et Souchon (1989)	24
Tableau 6 : Classes d'enchâssement et critères associés d'après Archambaud et al., 2005	24
Tableau 7: Grille d'évaluation du dépôt de limons et du colmatage associé (source : AFNOR, 2012)	25
Tableau 8: évolution des placettes peu et moyennement enchâssées au passage du pulse. Un seuil de 5% est retenu pour évaluer la tendance d'évolution.	47
Tableau 9 : synthèse des paramètres d'états initiaux, de suivi de pulse, et d'analyse des effets ; en gras les écarts statistiquement significatifs.....	54

LISTE DES ANNEXES

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

I. Contexte de l'étude

I.1 AIRE D'ETUDE : LA DURANCE

La Durance est une rivière à charge grossière du Sud-Est de la France qui prend sa source dans les Alpes du Sud à 2 390 m d'altitude. Deuxième affluent du Rhône après la Saône en termes de longueur, son bassin versant draine une superficie de 14 280 km² (Chapuis, 2012).

Parmi ces principaux affluents, on retrouve notamment le Guil, l'Ubaye, la Bléone, l'Asse et le Verdon en rive gauche ainsi que la Clarée, la Guisane, la Gyrone, le Buëch, le Jabron et le Coulon en rive droite.

Les quelques 300 km de linéaire de la Durance sont classiquement divisés en trois sections du fait de changements vers l'aval des régimes hydrologiques, des caractéristiques géomorphologiques et orographiques, accentués par la position des divers ouvrages hydroélectriques (Chapuis & Collomb, 2012). On retrouve alors, de l'amont vers l'aval :

- La Haute Durance : de sa source jusqu'au barrage de Serre-Ponçon (Magand, 2014);
- La Moyenne Durance : du barrage de Serre-Ponçon jusqu'à la confluence avec le Verdon ;
- La Basse Durance : de la confluence avec le Verdon jusqu'à celle avec le Rhône.

La Haute Durance se caractérise par une forte pente (supérieure à 5 ‰), un régime nival et un climat subméditerranéen à tendance montagnaise. Au contraire, la Moyenne Durance marque le début de l'influence du climat méditerranéen. Le régime hydrologique de cette zone est de type pluvio-nival, et le lit de la Durance y est décrit comme méandrique ou à tressage marqué. Enfin, la Basse Durance présente, quant à elle, un régime hydrologique de type pluvial. La vallée y est beaucoup plus large (plus de 3 km) et la morphologie du lit est historiquement décrite comme très divagante et localement tressée (Chapuis, 2012).

Basse et Moyenne Durance ont une pente plus faible, de l'ordre de 3 ‰.

La présente étude s'inscrit en Basse et Moyenne Durance, soit en aval du barrage de Serre-Ponçon.

I.2 LA CHAÎNE D'AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES

En raison de fortes pentes et de débits élevés, la Durance a servi de support au développement d'un important réseau d'aménagements hydroélectriques depuis 1955 (Figure 1).

Ces ouvrages ont différents rôles, dont l'écrouissage des crues, l'approvisionnement en eau des villes et des cultures ainsi que la production d'électricité (Jean, Lefebvre, & Pelissier, 1981). L'élément clé de cette chaîne d'aménagement est le barrage de Serre-Ponçon, caractérisé par une surface de 28,2 km² et une capacité maximale de 1,2 milliards de m³. En aval de cet ouvrage, une succession d'autres barrages intermédiaires (Espinasses, La Saulce, Saint-Lazare, Escal, Cadarache, Mallemort, Bonpas) sont positionnés sur le cours de la Durance. Ils définissent les limites historiques des tronçons d'étude, repris dans le présent document.

L'essentiel des débits de la Durance sont dérivés par les canaux usiniers d'une longueur totale cumulée de 250 km, alimentant les diverses centrales hydroélectriques. Ainsi, le régime hydrologique naturel de la Durance a été fortement modifié.

Le linéaire de la Durance compris entre Serre-Ponçon et sa confluence avec le Rhône correspond aujourd'hui à une succession de tronçons court-circuités (TCC) soumis à un régime réservé et pour la partie en aval du point triple (tronçon de Mallemort), à des restitutions

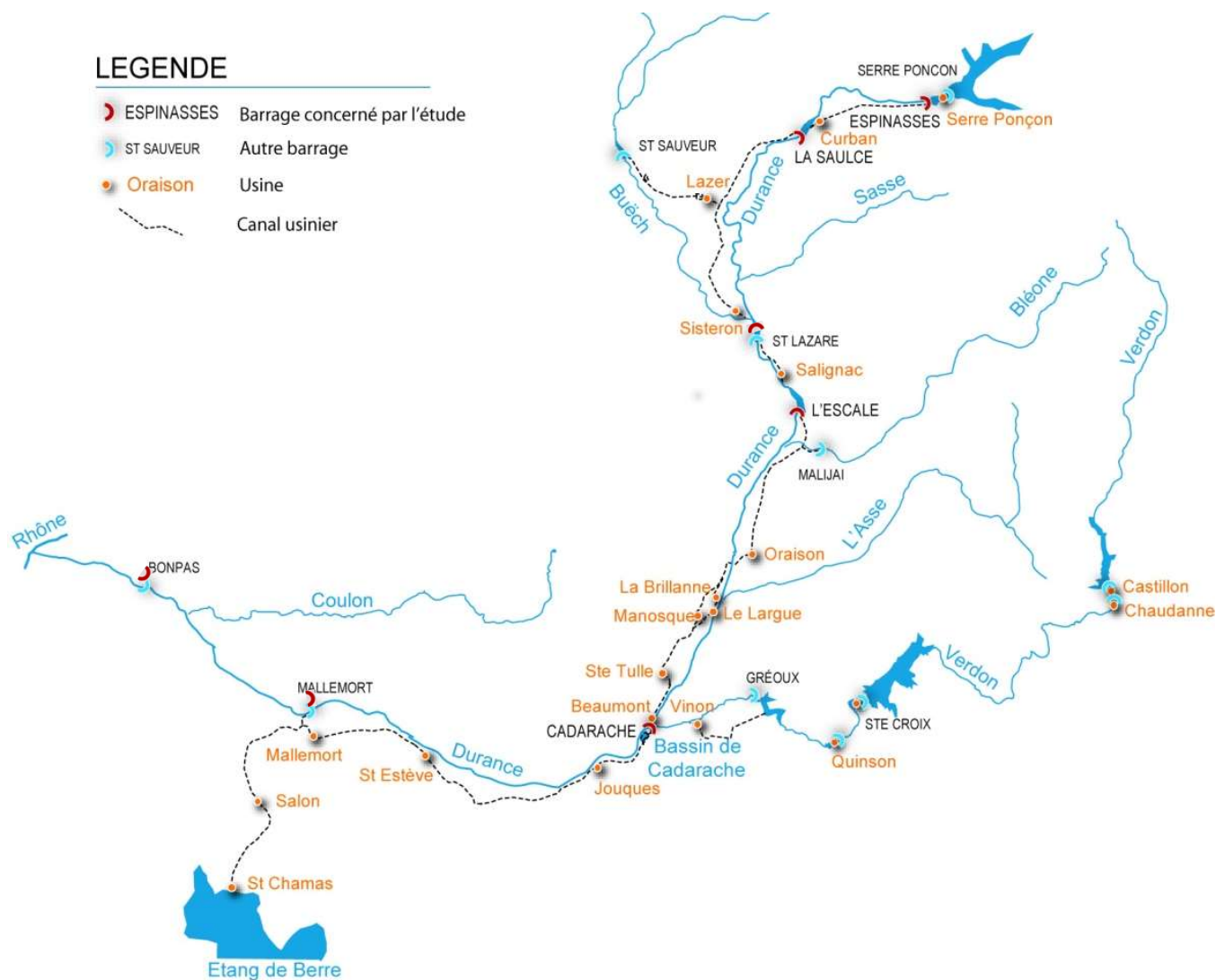


Figure 1 : Chaîne d'aménagements hydroélectriques de la Durance (Barillier, 2012)

I.3 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

I.3.1 Relèvement des débits réservés

L'article L214-18 du Code de l'environnement, modifié par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30/12/2006 définit les obligations en matière de débits réservés applicables aux aménagements hydroélectriques existants, au plus tard au 1^{er} janvier 2014.

L'objectif est de maintenir dans le cours d'eau à l'aval du barrage un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux.

Ce débit minimal (débit réservé) ne doit pas être inférieur à une valeur plancher, fixée au 10^{ème} du débit moyen interannuel (module) du cours d'eau pour la plupart des installations, et au 20^{ème} de ce module pour les ouvrages situés sur un cours d'eau dont le module est supérieur à 80 m³/s ou pour ceux, listés par décret, qui contribuent à la production d'électricité en période de pointe.

Les aménagements hydroélectriques de la Durance rentrent dans cette deuxième catégorie d'installations.

EDF a ainsi défini et proposé un relèvement du débit réservé des tronçons de la chaîne hydroélectrique de la Durance dans le cadre de cette législation. Ces modifications sont intervenues à partir de janvier 2014.

Le récapitulatif des régimes appliqués est présenté ci-dessous :

Tronçon	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	cible	Lâcher	Qr
Espinasse	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	TRF	☒ Oui	Stable M/20
Saulce	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	APR	☒ Oui	Stable M/20
St Lazare	5.8	5.8	5.8	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	5.8	5.8	5.8	mxt (APR)		Régime M/20 M/14
L'Escale	6.1	6.1	6.1	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	6.1	6.1	6.1	mxt (CYP/APR)	☒ Oui	Régime M/20 M/14
Cadarache	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	mxt (CYP)	☒ Oui	Stable M/20
Mallemort*	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	mxt (CYP)		Stable M/20 *+ restitutions et Q agricole
Bonpas	9.4	9.4	9.4	9	15	15	4.7	4.7	4.7	9.4	9.4	9.4	mxt (CYP)		Régime M/20 M/12.5 M/40

Figure 2 : récapitulatif des débits réservés appliqués après janvier 2014 sur la Moyenne et Basse Durance

I.3.2 Les pulses d'eau claire

Dans le cadre du relèvement des débits réservés en 2014, EDF a proposé la mise en place d'un programme de lâchers d'eau claire sur la période 2014-2019, appelés pulses hydrauliques, depuis 4 barrages en Moyenne et Basse Durance. Ils concernent, de l'amont vers l'aval, le barrage d'Espinasses, de La Saulce, de L'Escale et de Cadarache.

Ces pulses ont pour vocation principale l'amélioration de la qualité du substrat minéral servant de support de ponte aux espèces lithophiles cibles. Il est également attendu des pulses qu'ils favorisent les invertébrés benthiques.

Un protocole d'étude de l'effet des pulses, basé sur le suivi du substrat minéral, de l'ichtyofaune et des macroinvertébrés benthiques a été mis en place par EDF.

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques principales des lâchers par tronçon tels que définis au départ. Le volume de lâché appliqué est celui proposé pour les premiers essais (Figure 1).

Barrage	Espèce cible	Période du Lâcher	Volume maximal annuel du lâcher (hm³)	Volume testé lors du 1 ^{er} lâcher (hm³)	Q du lâcher (m³/s)	Q en rivière (m³/s)	Durée du palier Q max	Paliers de montée et baisse de Q
Espinasses	Truite fario	Mi-Novembre - Janvier	2,6	1,7 ¹⁷	40	44,1	10h (soit ~6h à l'exutoire du tronçon)	Prise de charge en 2h et baisse en 2h
La Saulce	Apron	1 ^{er} janvier à mi-février	5,2 ¹⁸	2,6	60	64,4	10h (soit ~6h à l'exutoire du tronçon)	Prise de charge en 2h30, baisse sur 2h30
L'Escale	Cyprinidés eaux vives	Entre 01/02 et 15/03	3,8	3	70	76,1	10 h (soit ~6h à l'exutoire du tronçon)	Prise de charge sur 1h30 et baisse sur 3h.
Cadarache	Cyprinidés (BLN, TOX)	Entre 01/04 et 15/05	5,6	4,5	70	79	12-13h (soit 4 à 6h à l'exutoire du tronçon)	Prise de charge sur 6 ou 8 heures, descente en 3 heures

Tableau 1 : Synthèse des pulses d'eau claire tels que proposé en 2014 par EDF en Moyenne et Basse Durance. Ces couples durée/débit ont parfois évolué au cours du suivi suite au retour d'expérience

C'est l'effet de ces pulses, qui est étudié dans le présent rapport sur la période 2014-2019. Il complète la synthèse réalisée à mi-parcours.

II. Le colmatage : définitions, processus de formation et principaux effets

II.1 DEFINITIONS

Le colmatage minéral en rivière correspond aux phénomènes de dépôt et d'infiltration de particules minérales (argiles, limons et sables) au sein du lit des cours d'eau conduisant au comblement des interstices du substrat minéral et à l'altération de ses fonctions. Le diamètre des particules incriminées dépend des communautés biologiques sur lesquelles sont étudiées les effets de ce processus (études sur les macro-invertébrés benthiques : < 2mm, sur les frayères de Salmonidés : < 0,8mm, sur l'hyporheos : < 0,063mm) (Braud & Alber, 2013, Gayraud et al., 2002).

Deux niveaux de colmatage sont définis, résultats d'un degré plus ou moins avancé du processus de colmatage lui-même (Gayraud et al., 2002).

- ✓ Le colmatage superficiel : correspond au dépôt de fines en surface pouvant enchâsser plus ou moins les particules grossières.
- ✓ Le colmatage interstitiel : correspond à l'infiltration en profondeur de fines notamment dans la zone hyporhéique d'un cours d'eau.

II.2 PROCESSUS FAVORISANT LE COLMATAGE

Le colmatage minéral d'un substrat est un processus naturel qui se produit classiquement dans des zones où la capacité de transport des sédiments fins est réduite du fait de conditions hydrauliques quasi-stagnantes (zones lenticques) ou dans certaines annexes fluviales de cours d'eau de plaine (Braud & Alber, 2013, Gayraud et al., 2002).

Cependant, des déséquilibres entre les processus naturels d'apports et de transport de matériaux fins peuvent recréer artificiellement les conditions de dépôts (Descloux, 2011, Malavoi et al., 2011). C'est ainsi que la déforestation, certaines pratiques agricoles ou bien la présence de barrages et les pratiques de gestion qui leur sont associées (chasses de dégravage par exemple) sont autant d'activités anthropiques qui génèrent une augmentation des processus d'érosion et donc la quantité de matériaux fins à transporter dans un cours d'eau (Descloux, 2011, Hancock, 2002, Wood & Armitage, 1997). De même, les linéaires soumis aux débits réservés (QR) en aval de barrages peuvent ne plus disposer d'énergie suffisante afin de transporter les sédiments fins provenant du cours d'eau lui-même ou des affluents (Poff et al., 1997). Dans ce cas, tout apport excédentaire de matériaux fins vis-à-vis de la capacité de transport amoindrie engendre des phénomènes de dépôts importants entraînant le colmatage du substrat (Fraisie et al., 1989).

II.3 EFFETS DU COLMATAGE SUR LES INVERTEBRES BENTHIQUES ET L'ICHTHYOFAUNE

De manière générale, le colmatage du substrat minéral entraîne une modification et une homogénéisation du substrat, et par conséquent une diminution de la quantité et de la qualité des habitats disponibles (Braud & Alber, 2013). Différents effets sont recensés, notamment sur les populations de macro-invertébrés et sur l'ichtyofaune.

Le colmatage peut affecter soit directement les macro-invertébrés benthiques en exerçant un stress sur les organismes (diminution de la luminosité, actions mécaniques) soit indirectement, en diminuant la quantité d'oxygène et d'habitats favorables disponibles. Les effets de tels processus sont décrits à l'échelle des individus (diminution du taux de survie, de croissance, de fécondité) mais également à l'échelle des

communautés (diminution de la richesse spécifique, changement de groupes trophiques) (Descoux, 2011, Gayraud et al., 2002).

Les excès de sédiments fins peuvent affecter directement l'ichtyofaune en entraînant le colmatage des branchies et donc en rendant les individus davantage sensibles aux pathogènes (Wood & Armitage, 1997). De plus, des effets indirects sur les populations de poissons ont été décrits. En effet, le colmatage des frayères des espèces lithophiles diminue les apports en oxygène et l'évacuation des déchets métaboliques. Ceci peut entraîner une asphyxie des œufs ainsi qu'une diminution de la survie des alevins émergents (Dumas et al., 2007, Bruslé & Quignard, 2001, Chapman, 1988). Bien que ces effets soient davantage décrits pour les Salmonidés, il est attendu que de telles conséquences puissent être observées notamment pour certaines espèces de Cyprinidés rhéophiles (Kemp et al., 2011).

II.4 LE CAS DE LA DURANCE

Historiquement, le bassin versant de la Durance était caractérisé par un transport solide (fins et grossier) important, résultant de conditions climatiques agressives, d'une végétation peu protectrice, d'un matériel géologique facilement érodable et d'une capacité de transport élevée (débits et pentes élevés) (Chapuis, 2012).

En effet, la Moyenne Durance ainsi que ses affluents (la Bléone notamment) se caractérisent par des moraines et des dépressions marneuses appelées « Terres Noires », matériaux friables et sensibles à l'érosion (Barbiero et al., 2003, Chapuis, 2012). Notons par exemple le cas de l'Asse, décrit comme étant un affluent à fort transport solide grossier dépourvu d'aménagement hydraulique et constituant une source ininterrompue de sédiments (Chapuis & Collomb, 2012). Ainsi, Bertier & Bouchard (2007) estiment que le transport solide en Moyenne et Basse Durance avoisinait naturellement les 500 000 tonnes de graviers par an, et 4 millions de tonnes de limons par an.

Bien que le barrage de Serre Ponçon stocke une quantité très importante de sédiments fins (environ 2 millions de tonnes par an), les Basse et Moyenne Durance sont intrinsèquement sensibles au colmatage et la diminution drastique des débits dans les tronçons court-circuités ainsi que la baisse de la fréquence des crues morphogènes (Chapuis, 2012) vient accentuer ces effets.

Ainsi, les matériaux fins produits par les torrents affluents de la Durance ne peuvent être transportés aussi régulièrement que dans un état naturel, entraînant le colmatage minéral du substrat (Fraisie, Malavoi, Souchon, & Trocherie, 1989).

III. Présentation des données exploitées

Ce document synthétise les résultats déjà présentés dans les rapports annuels de suivi de pulse sur la période 2014-2019. Chacun de ces rapports présente dans le détail la méthodologie mise en œuvre lors de chaque suivi. Une partie de la méthodologie est reprise ici, afin de dresser un panorama des données exploitées dans le chapitre suivant. Pour plus de détails sur les méthodologies appliquées sur le terrain, et les traitements des résultats, se reporter au rapport de suivi du pulse concerné. (Cf. bibliographie)

III.1 PROGRAMME D'ETUDE

Les lâchers dont il est question ici concernent, de l'amont vers l'aval, le barrage d'Espinasses, de la Saulce, de l'Escale et de Cadarache. L'ensemble des lâchers étudiés à ce jour est synthétisé dans la Figure 3.

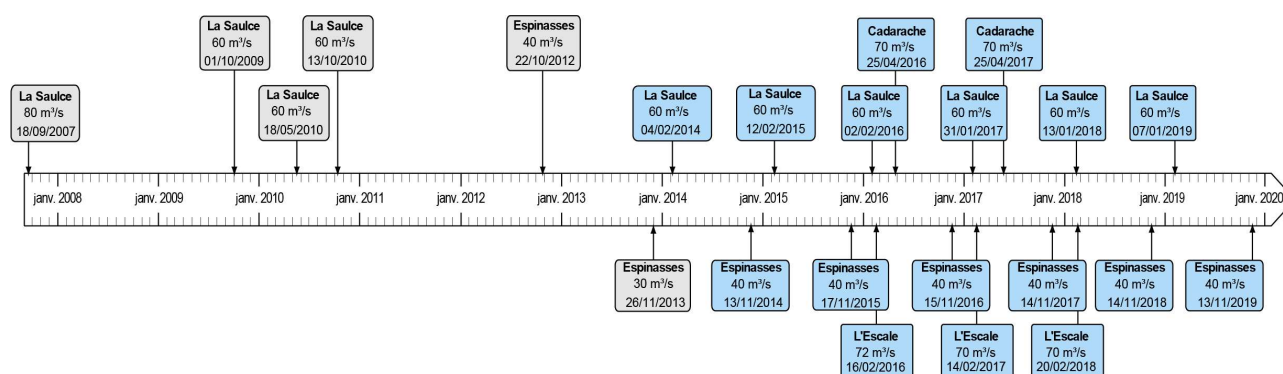


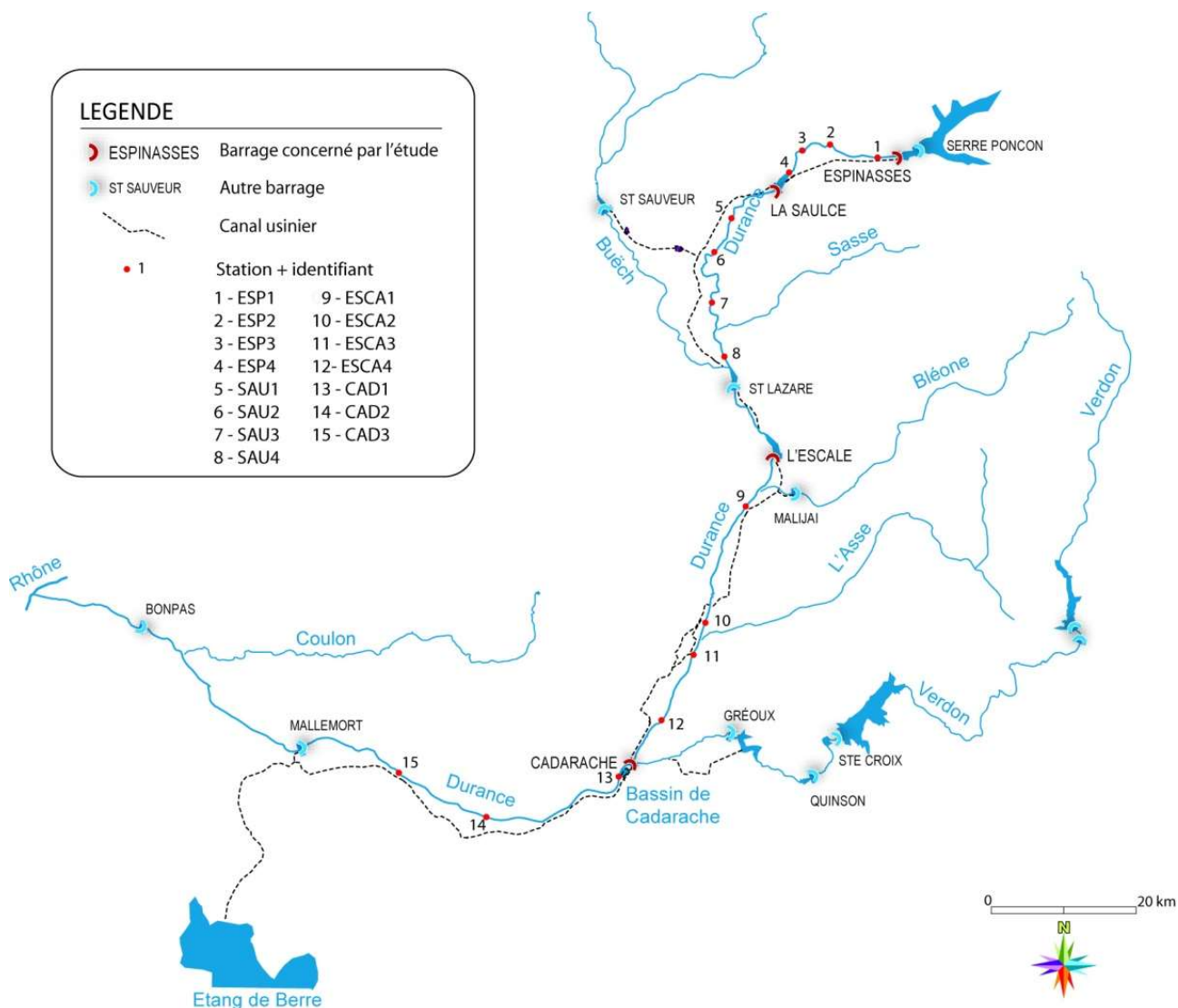
Figure 3: Chronologie des pulses hydrauliques de décolmatage réalisés sur la Durance de septembre 2007 à nos jours – en bleu ceux dont le suivi a été réalisé par SAGE Environnement, objets de cette étude- Pour Cadarache le débit de lâché pris en compte comprend le débit réservé.

Le programme des pulses a débuté en 2007 avec une série de sept lâchers constituant une phase de calibration au cours de laquelle différents débits de pulses ont été expérimentés, et ce sur les quatre biefs cités ci-dessus. Le suivi hydrobiologique de ces premiers pulses a été réalisé par la Maison Régionale de l'Eau (MRE) pour le compte du SMAVD dans le cadre du Contrat de Rivière Durance. Dès 2014, le relèvement des débits réservés imposé par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006 est rendu effectif sur ces quatre tronçons. Commence alors la deuxième phase du programme qui s'est terminée fin 2019. Le bureau d'étude SAGE Environnement est chargé du suivi des pulses réalisés dans cette deuxième phase.

L'objectif de cette étude est de synthétiser les résultats obtenus à l'issue des suivis réalisés par SAGE Environnement sur la période 2014-2019. Les données acquises antérieurement par la MRE sont difficilement utilisables au regard des différences méthodologiques (nombre de campagnes, positions des stations) et contextuelles (débits réservés). Ils ne sont donc pas pris en compte dans ce document.

III.2 STATIONS DE MESURES

Le suivi hydrobiologique de la Durance dans le cadre des pulses de décolmatage a été réalisé sur 15 stations dont la position est présentée dans la Figure 4 (les cartes de localisation précises des stations sont présentées dans les rapports annuels). La localisation globale de ces stations a été choisie par EDF afin que celle-ci corresponde au mieux à celle des stations historiquement suivies, que ce soit lors des études précédentes d'EDF ou de l'OFB. L'implantation locale s'est faite sur une succession de faciès courants, représentant des habitats potentiellement utilisables par les espèces cibles au cours de leur reproduction.



Quatre stations ont été positionnées sur les biefs d'Espinasses, de la Saulce et de l'Escale et trois stations sur le bief de Cadarache. Ces stations offrent une image représentative des zones de reproduction de ces tronçons court-circuités et permettent d'appréhender l'évolution amont/aval des conditions au sein de chacun d'eux.

La Figure 5 et le Tableau 2 présentent le positionnement de ces stations sur le profil en long de la Moyenne et Basse Durance ainsi que leurs principales caractéristiques.

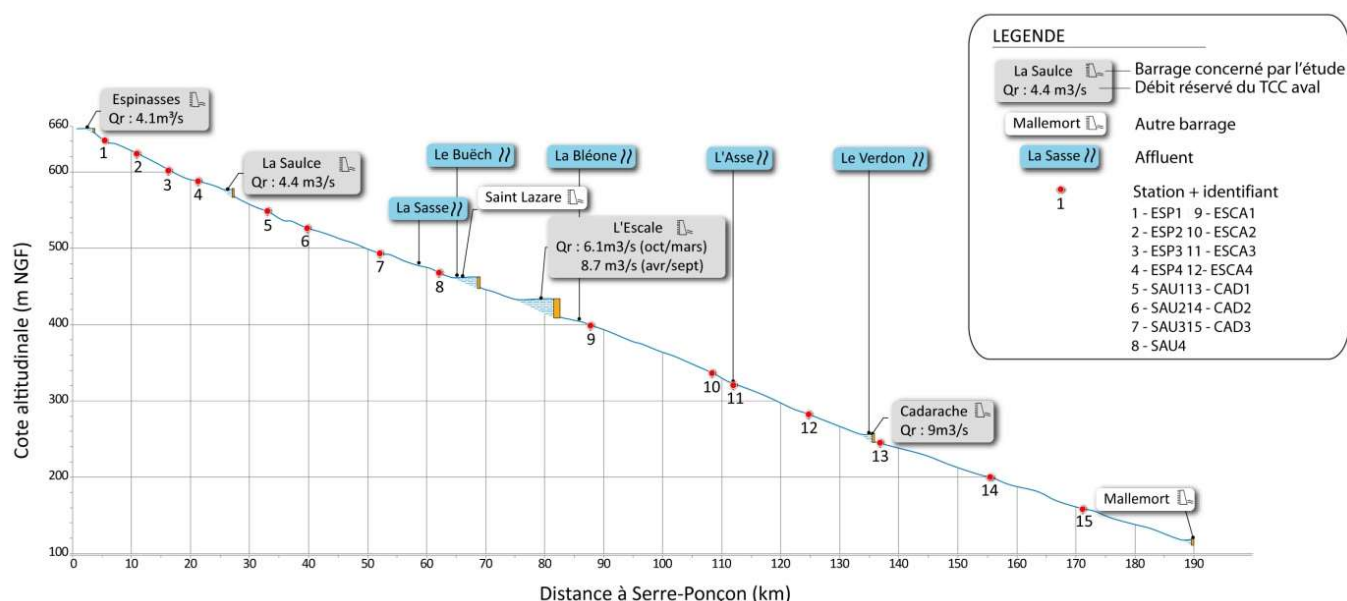


Figure 5: Profil en long de la Durance, de la queue de barrage d'Espinasses au pied du barrage de Mallemort (altitudes d'après l'IGN, édition 2016)

Tronçon	Station	Distance au barrage amont (km)	Largeur moyenne (m)	
			Lit mouillé	Plein bord
Espinasses	ESP1	3.7	29	57
	ESP2	10.5	20.4	56
	ESP3	15.5	19.8	59.4
	ESP4	20.4	24	95.7
La Saulce	SAU1	8.3	27	50.3
	SAU2	14.6	25	100
	SAU3	26.5	35	102
	SAU4	36.2	30	51.8
L'Escale	ESCA1	8.5	48.8	208
	ESCA2	28.6	37	370
	ESCA3	33.8	58	350
	ESCA4	44.9	105	220
Cadarache	CAD1	2.6	45	260
	CAD2	23	70	210
	CAD3	37.5	43	200

Tableau 2 : principales caractéristiques des stations de suivi.

La pente de la moyenne et basse Durance est relativement homogène, de l'ordre de 2.8 ‰. Si ce n'est le tronçon d'Espinasses, et l'amont du tronçon de la Saulce, légèrement plus pentus (3.5 ‰), il y a peu de variations sur le secteur d'étude. La largeur du lit mouillé et la largeur plein bord mesurées sur les stations sont nettement croissantes vers l'aval en lien avec l'accroissement des débits le long de la vallée.

Quelques particularités de positionnement peuvent influencer les résultats :

- Les stations ESP1 et CAD1 sont très proches des barrages, respectivement à 3.7 et 2.6 km du site de lâcher d'eau, ce positionnement a des effets qui se perçoivent sur le monitoring, notamment sur la dynamique naissante d'érosion de limons.
- Les stations SAU4 et ESCA4 sont à l'aval proche d'affluents importants (respectivement à 4.5 km de la Sasse et à 3 km de l'Asse).

Les autres stations sont globalement dénuées d'influences externes. La Planche photographique 1, page suivante, illustre l'aspect de quelques stations.

ESP1 - 2015



ESP3 - 2014



SAU1 - 2014



SAU3 - 2015



ESCA4 - 2016



ESCA3 - 2015



CAD3- 2016



CAD1 - 2016



Planche photographique 1 : stations de mesures

III.3 DATES DES PULSES ET CONTEXTE HYDRO-CLIMATIQUE

Comme décrit précédemment, les pulses hydrauliques sont réalisés afin d'améliorer la qualité du substrat potentiellement utilisé par les espèces lithophiles cibles de chaque tronçon. L'efficacité de ces lâchers d'eau en termes de colmatage superficiel étant supposée temporaire du fait d'apports minéraux du bassin versant intermédiaire (BVI) et du développement organique (algues et périphyton), les pulses sont réalisés quelques semaines en amont de la période de reproduction desdites espèces (Cf. Tableau 3).

Tronçon	Espèce(s) cible(s)
Espinasses	Truite fario (<i>Salmo trutta fario</i> , Linnaeus, 1758)
La Saulce	Apron du Rhône (<i>Zingel asper</i> , Linnaeus, 1758)
L'Escale	Cyprinidés d'eau vive
Cadarache	Blageon (<i>Leuciscus souffia</i> , Risso, 1826) Toxostome (<i>Chondrostoma toxostoma</i> , Vallot, 1837)

Tableau 3: Espèces cibles pour chaque tronçon étudié

Le programme initial des pulses prévoit la réalisation d'un lâcher par tronçon et par an depuis la saison de reproduction de 2013-2014 jusqu'à celle de 2019-2020. Les lâchers n'ont été mis en œuvre « qu'en l'absence d'épisode hydrologique de même niveau que le lâcher pendant la période dans laquelle le lâcher est prévu et en l'absence de prévision de crue dans les quinze jours suivant la date prévue du lâcher » (CCTP).

La Figure 6 présente l'ensemble des déversés ayant eu lieu depuis les barrages des tronçons concernés par l'étude, dont les pulses, tout en les replaçant dans leur contexte hydroclimatique.

A noter que le débit transitant dans les différents tronçons court-circuités étudiés est la résultante de trois composantes :

- Le débit réservé,
- Le débit complémentaire éventuellement déversé au barrage,
- Les apports intermédiaires, liés au bassin versant direct du tronçon court-circuité.

Les deux premières composantes sont connues et nous ont été fournies par EDF. La troisième n'est pas suivie, c'est pourquoi les données climatologiques recueillies à Saint-Auban (04) (source : Meteociel), commune occupant une position centrale vis-à-vis de l'aire d'étude, ont été ajoutées à la Figure 6. L'occurrence d'épisodes de précipitations importantes, mais n'ayant pas générés de déversés, permet toutefois de prédire l'existence d'épisodes hydrologiques dans les TCC, via les apports liquides des bassins versants intermédiaires.

Finalement, 6 des 24 pulses programmés ont été annulés.

Sur le tronçon de l'Escale, le lâcher de 2014 n'a pas pu avoir lieu à cause de conditions hydrologiques trop fortes. Celui de la saison 2015 sur ce même bief n'a pas été autorisé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) car les températures du moment laissaient présager d'une reproduction avancée de l'apron. Le pulse risquait alors d'avoir lieu pendant la reproduction de cette espèce. Enfin, celui de 2019 a été annulé en raison d'un évènement hydrologique significatif intervenu du 1 au 3 février, et d'un état initial peu colmaté (enchâssement moyen de 2.7).

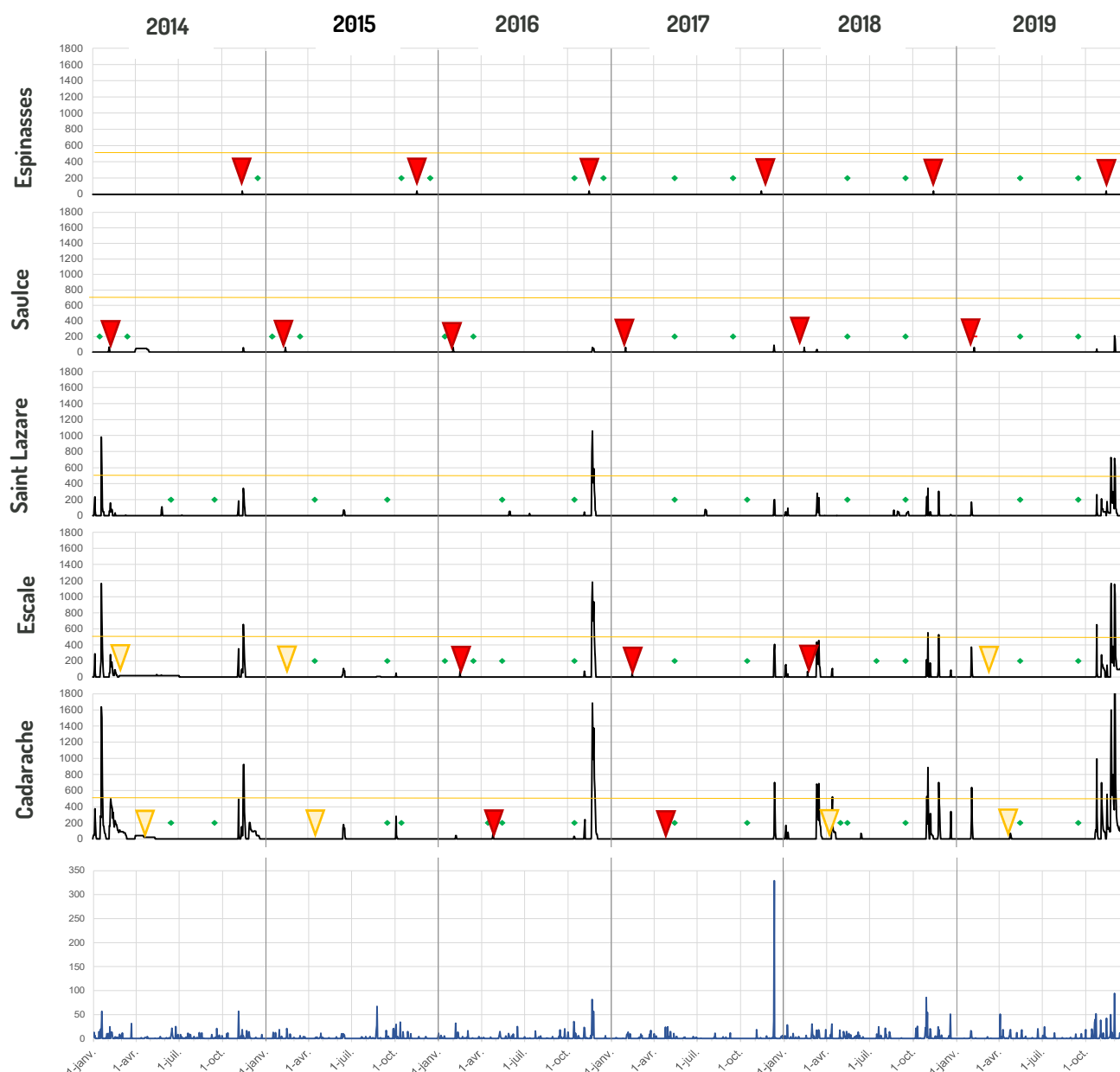


Figure 6 : Hydrogrammes des débits déversés aux barrages concernés par l'étude et précipitations journalières moyennes de janvier 2014 à septembre 2019. Les triangles rouges marquent les pulses réalisés ; les jaunes ceux qui ont été annulés (sources : EDF & Météociel)

Sur le tronçon de Cadarache, les lâchés de 2014 n'a pas été réalisé à cause de la forte hydrologie observée au préalable sur le tronçon et 2015 n'a pas été autorisé par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) en raison d'un risque de dispersion d'une pollution aux polychlorobiphényles (PCB) dans le lit majeur de la Durance. Ceux de 2018 et 2019 ont été annulés en raison d'un état initial jugé peu colmaté (colmatage moyen respectif de 1.9 et 2.2) et pour 2018 d'un événement hydrologique significatif dans les semaines précédant la date de programmation.

Au regard de la chronique des déversés, les pulses hydrauliques semblent être **des événements hydrologiques significatifs sur les tronçons d'Espinasses et de la Saulce** puisqu'ils représentent soit les seuls déversés annuels (Espinasses) soit des déversés dont le débit maximum est équivalent aux rares autres déversés observés (Saulce).

Sur les tronçons de l'Escal et de Cadarache, les débits lâchés (70 m³/s) sont très inférieurs au regard de certains épisodes de la chronique ($>>1000\text{m}^3/\text{s}$ sur les deux sites en 2014, fin 2016 et fin 2019) car leur

objectif est un décolmatage et pas la mobilité des substrats. En revanche, lors des années sèches, les pulses de début 2016 sur Escale et Cadarache, ils représentent les seuls épisodes hydrologiques sur une période de plusieurs mois. En 2017 et 2018 en revanche, ils interviennent après un coup d'eau beaucoup plus important intervenu peu de temps avant. Sur ces tronçons, l'enjeu principal est plus encore que sur les précédents, lié au contexte hydraulique.

A noter enfin que plusieurs pulses sur le tronçon d'Espinasses (2014, 2016, 2018 et 2019), sont intervenus lors d'épisodes pluvieux importants qui, s'ils n'ont pas provoqué de déversés, ont néanmoins gonflé les débits du tronçon court-circuité par le biais des apports intermédiaires (observations de terrain). La même situation s'observe sur la Saulce en 2014.

III.4 PROTOCOLES DE MESURE

L'étude des réactions du milieu vis-à-vis des pulses hydrauliques a été effectuée par le biais d'un suivi concernant le milieu physique et les communautés biologiques. Ce suivi a été mis en place de façon systématique sur les tronçons étudiés. Il s'articule autour d'un monitoring en temps réel du pulse au moment de son déroulement (suivi physico-chimique), et d'un programme de suivi « multi-compartiments » structuré en plusieurs campagnes de terrain échelonnées dans le temps. Le Tableau 4 récapitule l'ensemble des données collectées dans le cadre de ce suivi sur la période 2014-2019.

Le monitoring en temps réel (physico-chimie) a été maintenu durant toute la période d'étude, à chaque fois qu'un pulse a été réalisé. Il permet de vérifier le transfert de la lame d'eau, son efficience sur le départ de MES et de vérifier son innocuité sur les milieux.

Le suivi multi compartiment quant à lui a subi des évolutions au cours du temps, en fonction des résultats obtenus et de leur exploitation dans les rapports annuels et de la synthèse de 2014-2017 dans le cadre d'une démarche adaptative. Ces évolutions peuvent être déclinées comme suit :

- ◆ **Campagnes** : trois campagnes étaient initialement prévues pour les mesures de colmatage : une avant pulse, une seconde immédiatement après pulse et une troisième espacée de trois à quatre semaines. En pratique la seconde campagne, immédiatement après pulse n'a pas toujours pu être réalisée, notamment lorsque des précipitations venaient perturber l'hydrologie pendant le pulse. C'est le cas sur le tronçon de la Saulce en 2014 et 2017, ainsi que sur celui de l'Escale en 2016. La synthèse de 2014-2017 a mis en évidence que l'effet immédiat du pulse se maintient durant la période d'observation de trois à quatre semaines, même s'il s'amoindrit légèrement confirmant les résultats des pulses historiques (avant 2014). A partir de 2018, seules deux campagnes ont été maintenues : avant pulse et au plus tôt après pulse dès que les conditions hydrologiques le permettaient. Dans le cadre de la présente synthèse, les résultats ont été homogénéisés et seuls les résultats des deux premières campagnes sont interprétés pour qualifier l'effet strict des lâchers. L'analyse des résultats sur trois campagnes figure dans la synthèse de 2014-2017.
- ◆ **Mesures du colmatage** : Les mesures de colmatages constituent la base du suivi. Leur pertinence a pu être vérifiée sur chaque opération. Au début du programme le colmatage était uniquement évalué par la méthode proposée Archambaud et al. en 2005 (dans Braud & Alber, 2013). Cette méthode, calibrée sur la Durance, propose une grille prenant en compte l'enclassement et le colmatage du substrat. A partir de fin 2015, cette évaluation a été étoffée par des évaluations de dépôts de limons, selon une méthode issue du guide d'application de la norme expérimentale XP T 90-333:2009 relative aux prélèvements de macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes (AFNOR, 2012). Ces méthodes sont complémentaires et détaillées ci-après.
- ◆ **Colmatage interstitiel** : l'évolution du colmatage interstitiel a été mesurée de 2014 à début 2017, afin d'évaluer si le pulse influait ce paramètre. La première synthèse effectuée sur la période 2014-2016 a mis en évidence des variations spatiales pertinentes du colmatage interstitiel mais aucun effet significatif des pulses sur celui-ci. Les conclusions étaient que ce paramètre évoluait vraisemblablement à l'échelle de phénomènes hydrologiques de haute énergie à même de mobiliser les particules grossières ce qui n'est pas le cas des pulses hydrauliques. Son suivi a été abandonné début 2017 à la suite d'un comité de

pilotage. Les conclusions de ce suivi peuvent être consultées dans la synthèse de l'évaluation des pulses sur la période 2014-2017.

- Invertébrés :** Le bilan pulse par pulse a montré qu'une comparaison de type avant/après est peu pertinente à l'échelle d'un pulse, si ce n'est pour démontrer l'absence d'effet trop important sur les invertébrés. A partir de 2017, l'effort de suivi sur ce compartiment a été reporté sur le suivi saisonnier. Une analyse globale est disponible dans la synthèse 2014-2019 des données invertébrées récoltées dans ce cadre et dans le cadre du suivi biologique de la Durance.

Saison	Pulse	Enchâssement & Granulométrie			Dépôts de limons			Colmatage interstitiel		Physico-chimie	Invertébrés	
		camp-1	camp-2	camp-3	camp-1	camp-2	camp-3	camp-1	camp-3		camp-1	camp-3
2014	Saulce (04-02-14)	✓		✓				✓	✓	✓	✓	✓
	Escale (annulé)	✓										
	Cadarache (annulé)							✓				
	Espinasses (13-11-14)	✓	✓	✓					✓	✓		✓
2015	Saulce (12-02-15)	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
	Escale (annulé)	✓										
	Cadarache (annulé)	✓						✓				
	Espinasses (17-11-15)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2016	Saulce (02-02-16)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Escale (16-02-16)	✓		✓	✓		✓			✓	✓	✓
	Cadarache (25-04-16)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Espinasses (15-11-16)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2017	Saulce (31-01-17)	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓		
	Escale (14-02-17)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
	Cadarache (24-04-17)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
	Espinasses (14/11/2017)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
2018	Saulce (13/02/2018)	✓	✓		✓	✓				✓		
	Escale (20/02/2018)	✓	✓		✓	✓				✓		
	Cadarache (annulé)	✓										
	Espinasses (14-11-18)	✓	✓		✓	✓				✓		
2019	Saulce (07/02/2019)	✓	✓		✓	✓				✓		
	Escale (annulé)	✓										
	Cadarache (annulé)	✓										
	Espinasses (13-11-19)	✓	✓		✓	✓				✓		

Tableau 4 : Synthèse des données disponibles sur la période 2014-2019; en grisé, les pulses annulés ; en bleu les interventions prévues qui n'ont pu être réalisées ; en orange, les données incomplètes.

La grande majorité des campagnes de terrain ont pu être réalisées. Quelques mesures n'ont toutefois pas pu être faites en raison d'événements hydrologiques interférant avec les pulses. Les dates d'intervention étant dépendantes des dates des pulses qui sont fixes, il n'a pas toujours été possible de trouver une date de report. Ainsi, comme évoqué précédemment, il n'a pas toujours été possible de réaliser les mesures de colmatage immédiatement après pulse.

Pour la même raison, ce sont les relevés de colmatage interstitiel et invertébrés qui n'ont pas pu être réalisés à l'occasion de la campagne initiale du pulse d'Espinasses de la saison 2014-2015. Notons également que les données avant pulse de 2019 sur le tronçon d'Espinasses sont incomplètes et seules 2 stations ont été suivies.

Pour les sept pulses annulés, tout ou partie des campagnes préalables a été réalisée. Les mesures disponibles ont été utilisées pour évaluer la variabilité des états initiaux.

Les éléments techniques principaux permettant la compréhension des données présentées ici sont exposés ci-après. Pour plus de détails sur les modalités d'exécution, de validation des données, de calcul des indices et les difficultés rencontrées lors des campagnes il convient de se reporter aux rapports annuels.

III.4.1 Monitoring du pulse en temps réel

III.4.1.1 Collecte des données

Le suivi en temps réel du pulse a été assuré par la pose d'une sonde enregistreuse par station. Les sondes ont été placées au niveau de têtes de radiers afin de bénéficier de conditions d'écoulement relativement stables. Ainsi, il a donc été possible de suivre la turbidité (Unité de Turbidité Néphélométrique, UTN), la température (°C), l'oxygène dissous (mg/L) et les hauteurs d'eau (m) sur une période d'une quarantaine d'heures encadrant le pulse, à un pas de temps de quinze minutes. Ce suivi permet d'avoir des chroniques fiables et précises.



Planche photographique 2 : dispositif de mesures in situ. La sonde est protégée par un tube en acier inoxydable largement ajouré au niveau de la crépine. Les capteurs sont surélevés d'environ 25 cm par rapport au fond pour limiter la problématique de colmatage.

III.4.1.2 Evaluation du transport solide en suspension

Parallèlement à ces mesures en continu, au moins deux préleveurs automatiques ont été placés par tronçon, permettant l'acquisition d'un minimum de 40 échantillons d'eau sur la durée du pulse à partir desquels ont été mesurées la turbidité ainsi que la concentration en matières en suspensions (MES) par gravimétrie¹.

L'évolution du taux de matières en suspension dans l'eau pendant le pulse est recalculé à chaque opération en établissant une corrélation entre la turbidité lue par les sondes et les analyses de MES faites sur ces échantillons prélevés par les échantillonneurs automatiques.

¹ Mesures réalisées par le laboratoire CARSO de Lyon

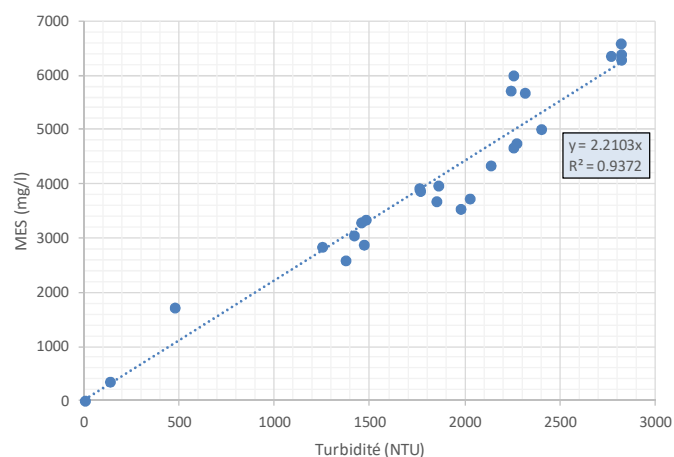


Figure 7 : exemple de déploiement de préleveurs automatiques et d'équation de corrélation obtenue sur la Saulce en 2016. (Station SAU4)

La masse totale de matériau transporté a été estimée pour chaque pulse hydraulique. Les valeurs de concentration de MES étant disponibles par intervalles de temps de 15 minutes pour l'ensemble des pulses, la masse totale de matériaux transportés peut être estimée par l'application de la formule suivante (SAGE Environnement, 2016).

$$MT = \sum_{i=1}^n [MES]_i * A_i * V * 10^{-6}$$

Avec :

MT : Masse totale de matériaux transportés (T)

[MES]_i : Concentrations en MES sur l'intervalle de 15 minutes *i* (mg/L)

A_i : Avancement du pulse estimé comme étant le rapport $\frac{Heau\ i}{\sum_{i=1}^n Heau}$ au moment de l'intervalle de 15 minutes *i*

V : Volume d'eau total du pulse (m³)

Cette formule a été appliquée sur les valeurs de MES enregistrées aux stations les plus en aval de chaque tronçon, permettant ainsi d'évaluer les matériaux transportés sur le linéaire encadré par le barrage et ces stations. Notons que le volume d'eau total du pulse est calculé d'après les débits déversés à l'occasion des pulses, auxquels sont ajoutées les valeurs de débits réservés propres à chaque TCC. Les éventuelles hausses de débits liées à des précipitations ou aux apports d'affluents ne sont pas comptabilisées ici. Il y a donc une légère sous-estimation de cette valeur.

III.4.2 Suivi du colmatage superficiel

Ce suivi comprend des mesures de granulométrie, d'enchâssement et des dépôts de limons sur une trentaine de placettes par station et par campagne. Une même placette est donc le support d'évaluation de ces trois paramètres. Les placettes sont réparties au sein d'une unité d'échantillonnage définie ici comme étant une succession de faciès comprenant généralement, de l'amont vers l'aval : plat courant, tête de radier, radier, rapide et chenal lotique. Ces secteurs se succèdent de façon plus ou moins contiguë sur la Durance et présentent un intérêt écologique marqué, que ce soit du point de vue des poissons, comme des invertébrés. Dans le cadre de la mise en œuvre des pulses de décolmatage, les espèces cibles piscicoles identifiées sont rhéophiles et fréquentent prioritairement ces zones.

Les localisations des placettes ont été relevées avec une précision centimétrique et ont donc pu être conservées entre chaque campagne, ce qui permet aux échantillons d'être représentatifs.

La Figure 8 présente la stratégie de positionnement des 30 points de mesure sur une station standard, centrée sur une succession de faciès logique.

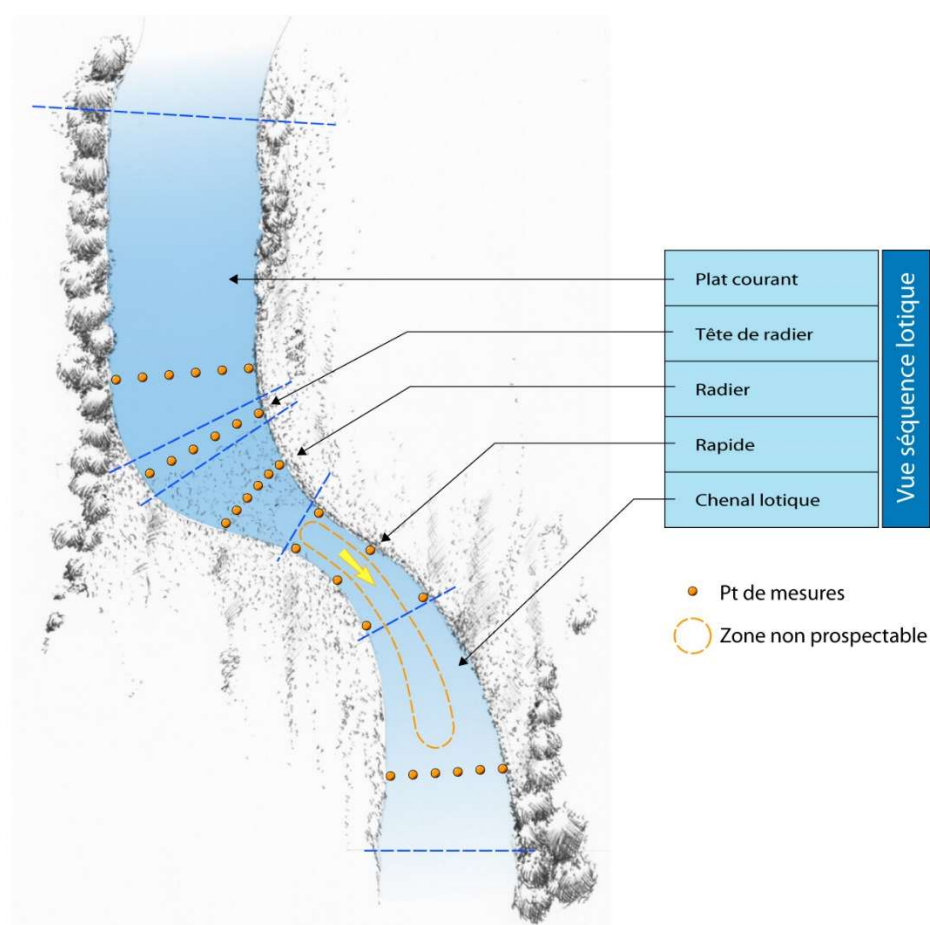


Figure 8: stratégie de relevé de la granulométrie, de l'enchâssement et du dépôt de limon sur une station standard

La granulométrie et l'enchâssement ont été déterminés pour chacune des fractions composant le substrat minéral des placettes. Ces fractions sont les suivantes :

- Le substrat le plus grossier (représentant à minima 10% de la surface échantillonnée)
- Le substrat dominant
- Le substrat secondaire (représentant à minima 30% de la surface échantillonnée)

Une évaluation unique a été réalisée pour le dépôt de limons.

La granulométrie de surface est caractérisée selon l'échelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989), présentée dans le Tableau 5. Rappelons que le diamètre étudié correspond au second axe de la particule minérale, soit celui perpendiculaire à l'axe le plus grand. Pour être plus facilement exploitables, notamment au niveau statistique, un code numérique (de 0 à 12) a été attribué à chaque classe granulométrique.

Classe granulométrique	Diamètre du second axe (mm)	Code numérique
Dalle	>1024	12
Rocher	>1024	11
Bloc	256-1024	10
Pierre Grossière	128-256	9
Pierre Fine	64-128	8
Cailloux Grossier	32-64	7
Cailloux Fin	16-32	6
Gravier Grossier	8-16	5
Gravier Fin	2-8	4
Sable Grossier	0,5-2	3
Sable Fin	0,0625-0,5	2
Limons	0,0039-0,0625	1
Argile	<0,0039	0

Tableau 5: Echelle granulométrique de Wentworth (1992) modifiée par Malavoi et Souchon (1989)

Le degré d'enchâssement est quant à lui évalué selon les classes et critères proposés par Archambaud et al. en 2005 (dans Braud & Alber, 2013). Cinq classes (Tableau 6) sont définies sur la base de la facilité d'extraction des particules minérales et sur la densité du nuage de limons provoqué par l'extraction.

Classe	Qualificatif	Critères d'évaluation
1	Non enchâssé	Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant soit aucun dépôt.
2	Peu enchâssé	Les éléments sont collés par une sous-couche de limon (avec ou sans limon en dépôt). Le nuage de limon qui se soulève est peu dense.
3	Enchâssement moyen	Les éléments sont légèrement enchâssés et provoquent un nuage de limon assez épais lorsqu'ils se désolidarisent de la sous-couche.
4	Enchâssement important	Les éléments sont très enchâssés et provoquent un nuage épais de limons (accentué ou non par un dépôt de limons).
5	Enchâssement très important	Les éléments sont recouverts de limons et provoquent un nuage très épais ou bien sont entièrement cimentés dans la sous-couche et impossibles à soulever.

Tableau 6 : Classes d'enchâssement et critères associés d'après Archambaud et al., 2005 (dans Braud & Alber, 2013)

Le colmatage du substrat minéral par les dépôts de limons est évalué visuellement sur la base d'une grille issue du guide d'application de la norme expérimentale XP T 90-333:2009 relative aux prélèvements de macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes (AFNOR, 2012). Selon cette grille, six classes sont proposées (Tableau 7) afin de caractériser l'épaisseur de la couche de limons et le colmatage qui en découle. Ce protocole a été mis en place en complément des précédents à partir des suivis des pulses de la saison 2015-2016.

Classes	Qualificatifs	Critères d'évaluation
0	Pas de colmatage	Aucun colmatage visible.
1	Colmatage très léger	Colmatage peu présent et peu perturbant. Par exemple très fine pellicule de limons.
2	Colmatage léger	Présence faible (fine pellicule) mais régulière du colmatage
3	Colmatage moyen	Présence moyenne du colmatage (pellicule soutenue). La perturbation est estimée significative sans être limitante.
4	Colmatage important	Substrat principal recouvert (pellicule importante) et en partie non visible.
5	Colmatage complet	Substrat principal recouvert (non visible). Pellicule très importante mais sur 1 cm d'épaisseur maximum.

Tableau 7: Grille d'évaluation du dépôt de limons et du colmatage associé (source : AFNOR, 2012)

A noter que des guides d'aide à l'évaluation, basés sur des planches photos et/ou des schémas sont utilisés par les opérateurs, en compléments des définitions des classes présentées précédemment. Ceux-ci sont disponibles dans la méthodologie complète présentée dans les rapports annuels.

L'incertitude de ces mesures qui présentent une certaine subjectivité est réduite par plusieurs précautions présentées en détails dans les rapports annuels. Sans représenter ici la méthodologie complète, les principales mesures mise en œuvre pour atténuer l'incertitude sont les suivantes :

- Utilisation de grilles de lecture détaillées, illustrées de photos et d'annotations,
- Stabilité d'une petite équipe d'opérateurs expérimentés affectée à cette étude,
- Un opérateur référent par pulse qui intervient sur toutes les campagnes au cours d'une année,
- Validation des mesures sur le terrain, à partir des résultats de la campagne précédente (évaluation contradictoire systématique),
- Inter-calibration permanente des opérateurs.

IV. Traitements des données et résultats

IV.1 MONITORING EN TEMPS REEL

IV.1.1 Pulses appliqués sur la période 2014-2019

Les vitesses de montée et de descente des débits ont été programmées pour respecter les conditions de sécurité hydraulique relatives aux ouvrages hydroélectriques, éviter la dérive d'invertébrés lors de la hausse des débits ainsi que le piégeage de poissons à l'occasion de la diminution des débits.

Les lâchers réalisés entre 2007 et 2010 et les retours d'expérience qui en ont découlés ont servi de base pour la définition des hydrogrammes des pulses suivis ici. Les débits appliqués ont été notamment adaptés aux morphologies plus larges et plus en tresses caractérisant les tronçons les plus en aval de la Durance. Les durées des pulses sont issues des temps estimés d'évacuation de matériaux.

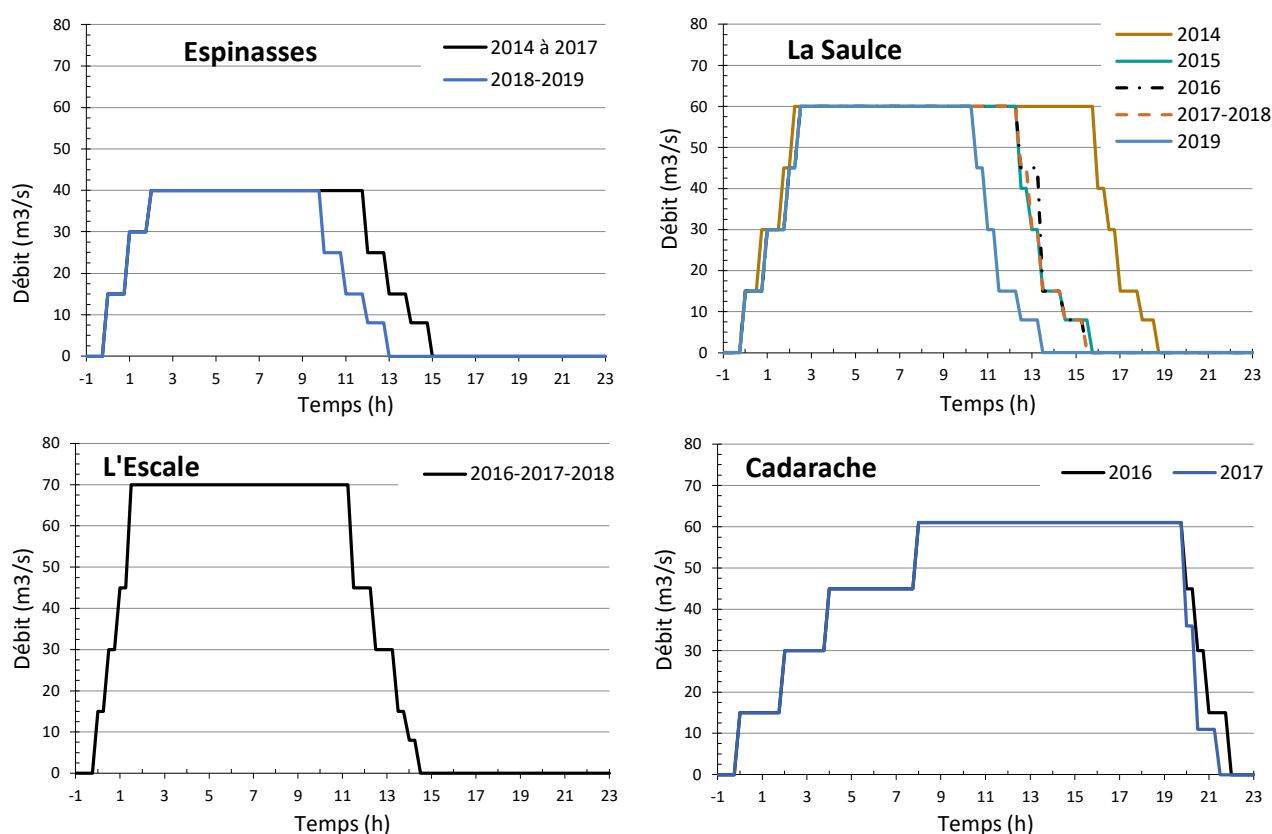


Figure 9 : Hydrogrammes des pulses appliqués sur la Durance en fonction des tronçons et des années

Les hydrogrammes finalement appliqués à l'occasion des pulses faisant l'objet de cette étude se caractérisent par trois phases successives (Figure 9) :

- ✓ **Une prise de charge** consistant en une augmentation progressive et par paliers des débits déversés pour ne pas perturber les milieux. Cette phase dure entre 1h30 et 2h30 pour la plupart des pulses, excepté celui de Cadarache où cette phase dure 8h pour des raisons de sécurité hydraulique (N. Schaltenbrand², communication personnelle, 21 juin 2016).

² Ingénieur Performance Production, EDF-UP Méditerranée, GEH Durance

- ✓ **Un palier au débit maximum** ($Q_{\max}$) maintenu pendant une dizaine d'heures environ. La valeur de $Q_{\max}$ est fonction du tronçon. Ce débit est maintenu pour évacuer la totalité des éléments mobilisés hors du tronçon.
- ✓ **Une phase de diminution progressive** à des fins environnementales et par paliers des débits sur une durée de 2 à 3 heures selon le tronçon.

De manière générale, un pulse hydraulique consiste en un évènement d'une durée variant de 13 à 22h. Sur le tronçon d'Espinasses, la durée initiale, appliquée de 2014 à 2017 a été raccourcie de 2h en 2018 et 2019. Cette décision a été motivée par le bilan des pulses précédant qui indiquaient une efficacité ayant lieu principalement durant les premières heures de la montée d'eau. La même adaptation a été testée sur le tronçon de la Saulce en 2015 et en 2019.

Sur les deux autres tronçons, les pulses ont subi peu de variations car le nombre d'essais avait été jugé insuffisant pour avoir un bon retour d'expérience.

IV.1.2 Effets sur les paramètres de physico-chimie in situ

La surveillance des paramètres physico-chimiques classiques, tel que la température, la conductivité ou la saturation en oxygène, vise principalement à contrôler l'absence de conditions défavorables pour la biocénose pendant le pulse. Les deux principaux effets potentiels étant :

- l'occurrence d'une variation brusque de température, pouvant induire un stress thermique,
- la baisse de la concentration en oxygène dissous sous l'effet de la mise en suspension de matériaux fin potentiellement oxydables.

Le bilan effectué après le suivi physico-chimique de chaque pulse, disponible dans les rapports annuels, met en évidence l'absence de tels effets.

Concernant la température de l'eau, les variations observées au passage du pulse sont du même ordre que les variations nycthémérales (durée comprenant un jour et une nuit). Le principal facteur, qui limite toute possibilité de variation thermique brutale, est la délivrance de l'eau par le barrage amont, au même titre que le débit réservé. Il n'y a donc pas de changement dans la source d'approvisionnement en eau pendant le pulse.

Concernant l'oxygène dissous, les matériaux mis en suspension par le pulse ne semblent pas suffisamment organiques, ou les mécanismes tropholytiques semblent insuffisamment rapides dans ces conditions, pour abaisser significativement le taux de saturation en oxygène.

La conductivité de base évolue quant à elle, d'amont vers l'aval, au gré des apports intermédiaires. Lors du pulse, la conductivité reprend temporairement sur tout son linéaire les caractéristiques de l'eau issue du barrage.

La Figure 10, illustre les variations de la température, de l'oxygène dissous et de la conductivité pour la station la plus aval de la Saulce, lors du pulse de 2016. Précisons que ce pulse, et en particulier sur cette station, est celui qui présente de loin le plus fort transport de sédiments avec des concentrations en matières en suspensions dépassant 10 g/l. Dans ce contexte, qui apparaît être le plus défavorable, la saturation en oxygène n'est abaissée que de 10%, sans qu'il soit d'ailleurs vraiment possible d'incriminer une consommation en oxygène par les sédiments plutôt qu'une légère latence dans l'équilibrage suite aux variations de température.

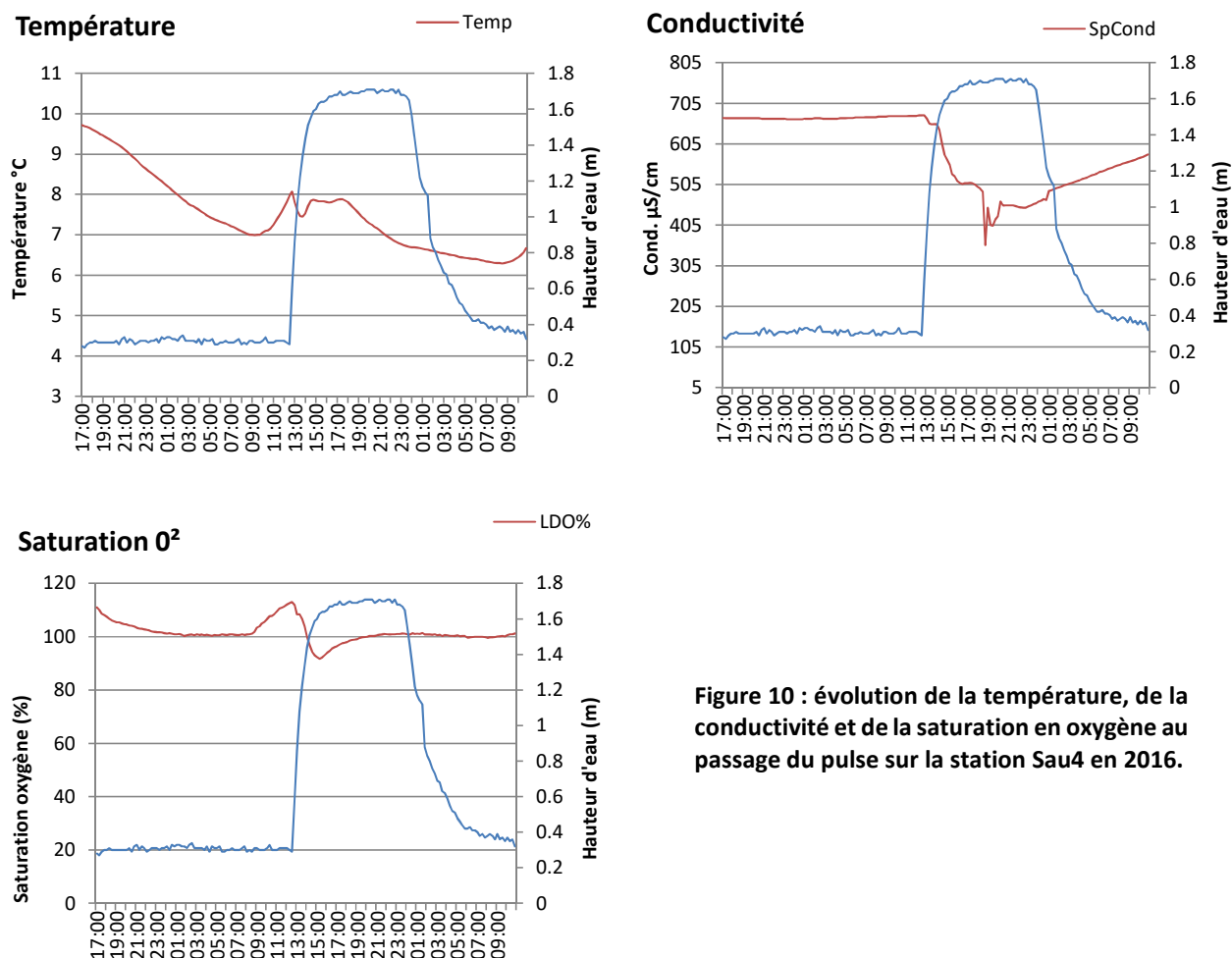


Figure 10 : évolution de la température, de la conductivité et de la saturation en oxygène au passage du pulse sur la station Sau4 en 2016.

IV.1.3 Effet sur le transport de matières en suspensions

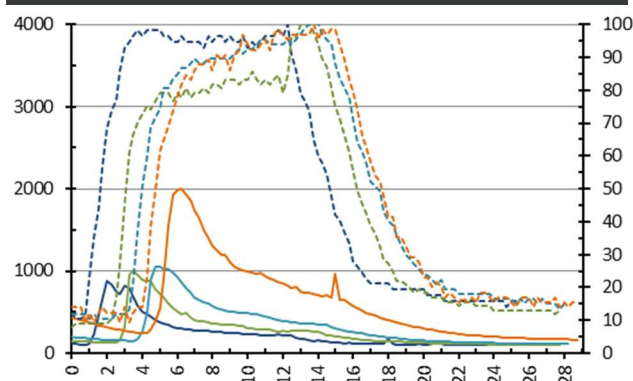
IV.1.3.1 Présentation des résultats

Les figures suivantes présentent les évolutions de hauteurs d'eau et de concentrations en MES en fonction du temps, exprimées en nombre d'heures après le début du pulse, et ce pour l'ensemble des stations et pulses suivis. Pour des raisons de lisibilité, les échelles des axes sont adaptées aux gammes de valeurs prises par tronçon. Les données ponctuellement non analysables ont été supprimées des graphiques, comme par exemple celles relatives aux stations SAU1 et SAU2 à l'occasion du pulse de la Saulce en 2016.

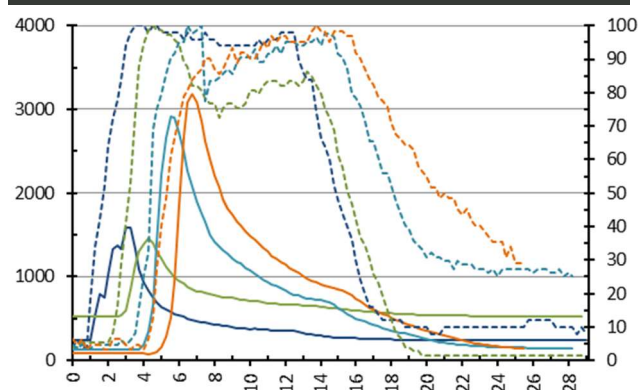
De manière générale, l'ensemble des stations suivies semble présenter un patron de réponse commun en ce qui concerne les variations de hauteurs d'eau et de MES.

Espinasses

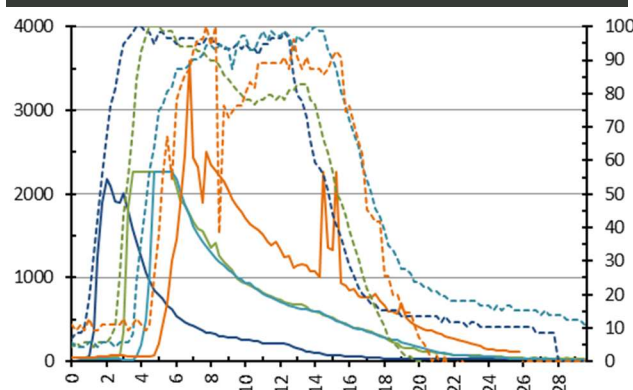
2014



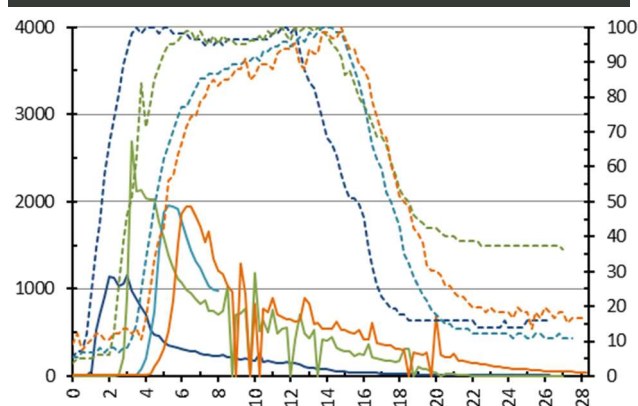
2015



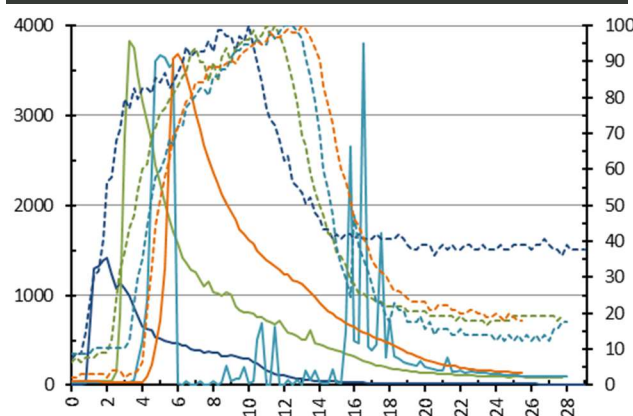
2016



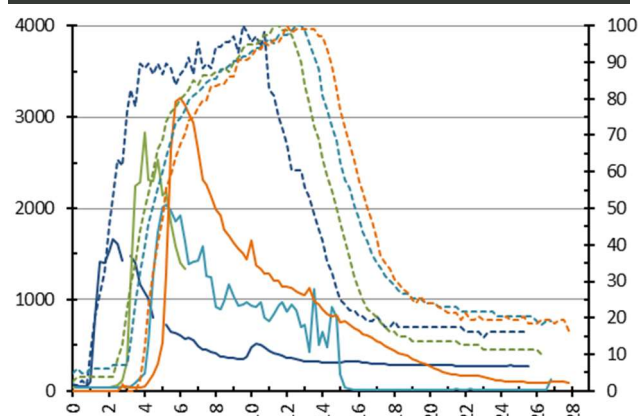
2017



2018



2019



MES (mg/l) Temps après pulse (h) % hauteur d'eau max
 — ESP1 MES — ESP2 MES — ESP3 MES — ESP4 MES
 ESP1 Heau ESP2 Heau ESP3 Heau ESP4 Heau

MES (mg/l) Temps après pulse (h) % hauteur d'eau max

Figure 11 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 – Tronçon d'Espinasses

Saulce

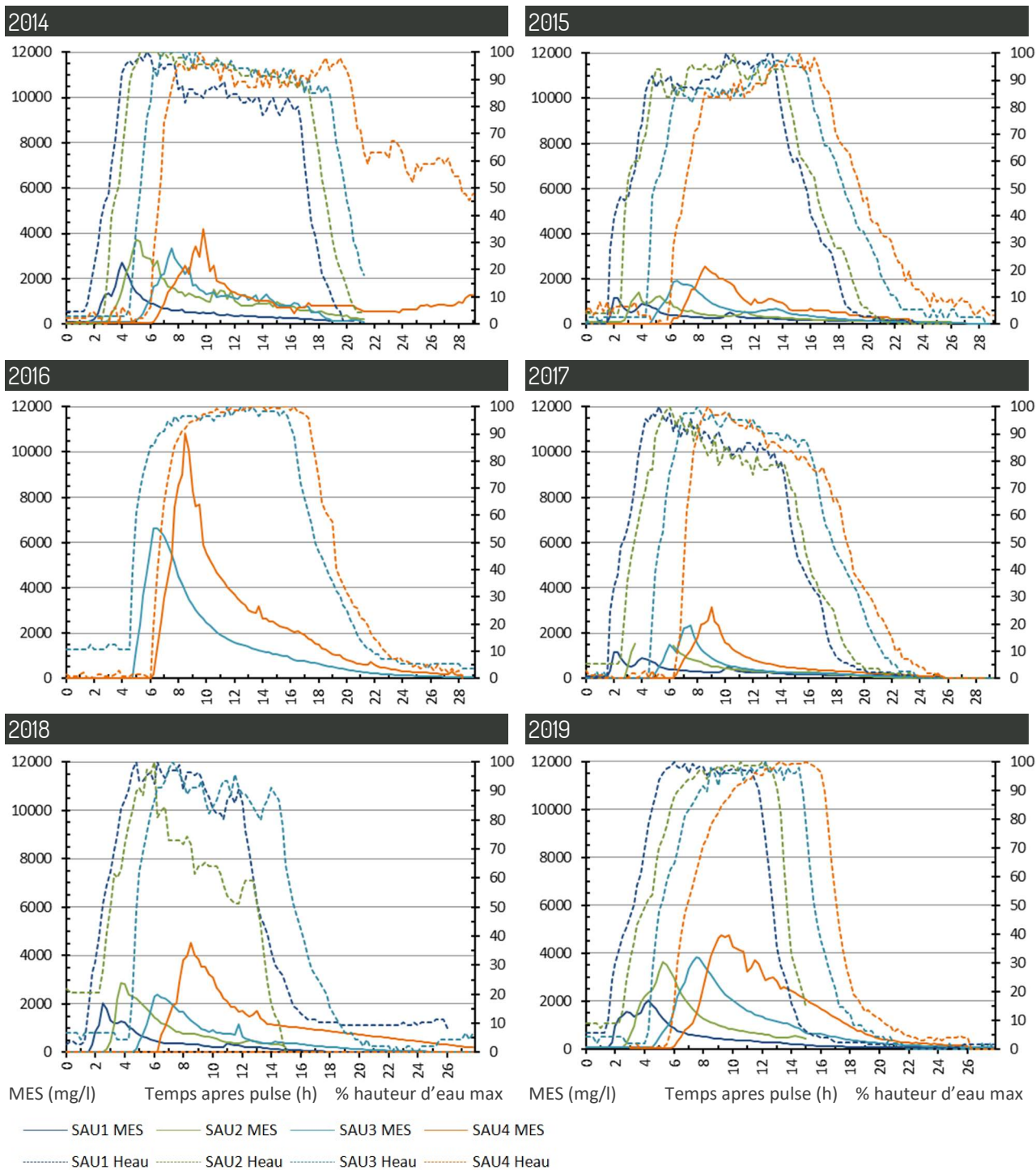
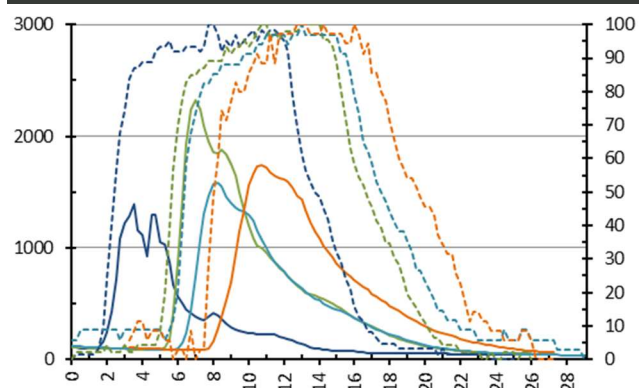


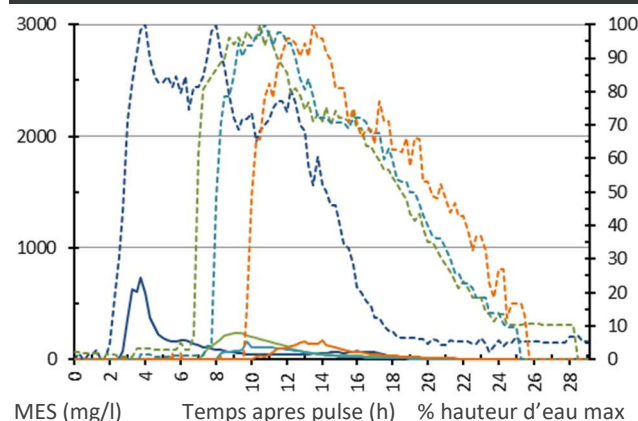
Figure 12 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 – Tronçon de la Saulce

Escale

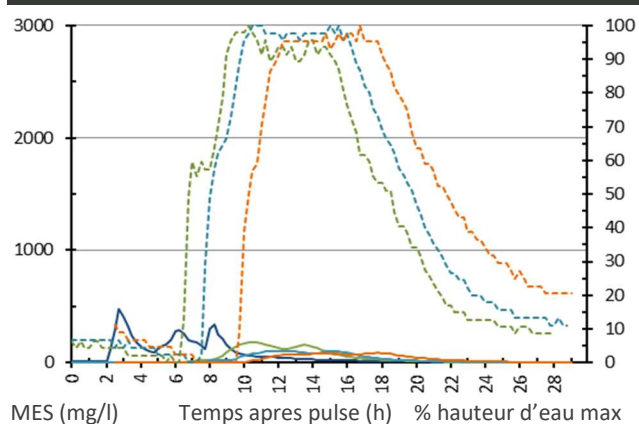
2016



2017



2018

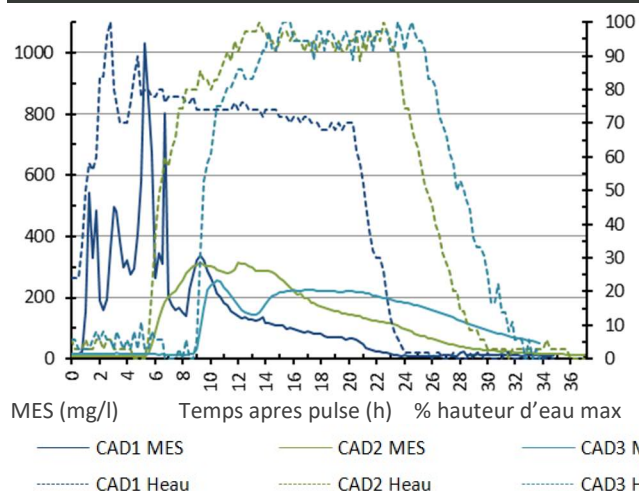


MES (mg/l) Temps apres pulse (h) % hauteur d'eau max

— ESCA1 MES — ESCA2 MES — ESCA3 MES — ESCA4 MES
 - - - ESCA1 Heau - - - ESCA2 Heau - - - ESCA3 Heau - - - ESCA4 Heu

Cadarahe

2016



2017

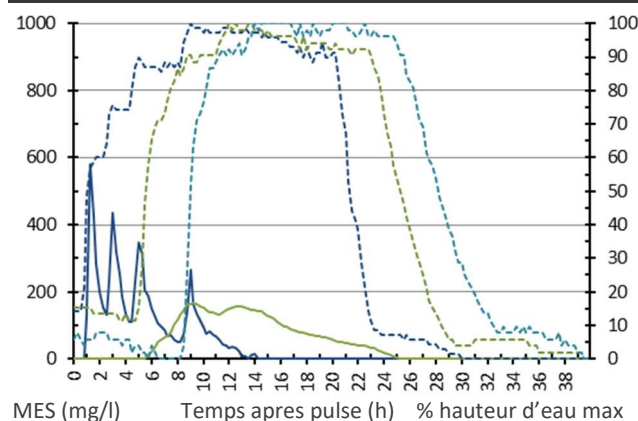


Figure 13 : évolutions de hauteurs d'eau (en % de la hauteur d'eau maximale, échelle à droite) et de concentrations en MES (en mg/l, échelle à gauche) en fonction du temps, exprimé en nombre d'heures après le début du pulse, pour les pulses suivis sur la période 2014-2019 : – Tronçons de l'Escale et de Cadarahe

IV.1.3.1.a Variations de la hauteur d'eau :

Le passage du pulse au niveau d'une station entraîne une augmentation rapide de la hauteur d'eau. La hauteur d'eau maximale est atteinte en 3 heures en moyenne, alors que le pulse représente un événement d'une vingtaine d'heure à l'échelle d'une station environ. La hauteur d'eau tend ensuite à se stabiliser pendant une phase de plateau, puis diminue progressivement vers un retour aux conditions initiales. Ce premier constat concerne l'ensemble des stations, y compris celles les plus aval de chaque bief.

Plusieurs anomalies peuvent modifier ce schéma :

- Une baisse ou une montée brusque de la hauteur d'eau en phase de stabilisation (ex : ESP2 en 2014, 2015 et 2016, ESP3 en 2015): ce phénomène est provoqué par le déplacement de la sonde, par charriage.
- Une dérive progressive du plateau, visible sur l'ensemble des stations de façon plus ou moins accentuée : elle est provoquée par des variations rapides de la pression atmosphérique.
- Un retard à la baisse, visible principalement sur les stations aval (Saulce 2014, Escale 2017). Ce retard est lié à des précipitations intervenant pendant le pulse et qui viennent interférer.

En dehors de ces exceptions, les variations de hauteurs d'eau enregistrées pour l'ensemble des stations suivent les variations des hydrogrammes des pulses appliqués, et ce même pour les stations les plus en aval de chaque tronçon. Les pulses ne sont donc pas laminés vers l'aval et ceci suggère que leurs effets potentiels ne diminuent pas avec la distance au barrage. Ils paraissent donc adaptés.

IV.1.3.1.b Variations de la concentration en MES :

L'évolution des MES durant les pulses sur les tronçons d'Espinasses et de la Saulce est globalement homogène. Les variations de hauteurs d'eau décrites ci-dessus engendrent dans un premier temps :

- ◆ **une augmentation rapide puis un pic de concentration en MES** dont la valeur tend à augmenter de l'amont vers l'aval pour un même tronçon. L'eau lâchée depuis les barrages étant claire, ce phénomène montre que les pulses permettent effectivement une remise en suspension de matériaux, l'eau se chargeant progressivement lors du parcours du tronçon court-circuité. Sur les tronçons de l'Escale et de Cadarache, l'évolution est différente. Les phénomènes observés seront décrits lors de l'analyse par tronçons, présentée ci-après.

Il est difficile de conclure avec certitude quant à l'ordre d'apparition entre :

- le pic de MES,
- et l'atteinte du débit maximum du pulse,

du fait des fluctuations de hauteur d'eau mesurées pendant les phases de plateau elles-mêmes. De manière générale, il semblerait que **les pics de MES arrivent concomitamment voire précèdent la phase de plateau de hauteur d'eau**. Ce phénomène a déjà été décrit sur d'autres sites et ne nuit pas à la réussite potentielle des lâchers.

- ◆ **Une phase de diminution de la concentration en MES** fait suite aux pics précités. Cette diminution débute systématiquement au cours de la phase de plateau des hauteurs d'eau et se poursuit jusqu'à un retour au niveau de base de MES. Les enregistrements montrent par ailleurs que les pics de MES sont abattus de 55 à 95% au moment de la diminution des hauteurs d'eau ce qui sous-entend que les MES sont bien exportées en dehors du tronçon cible.

Une autre représentation des résultats consiste à mettre en relation sur un graphique l'évolution du taux de MES, en fonction de la hauteur d'eau. Cette représentation s'affranchit de l'aspect temporel du pulse, pour surligner la relation entre ces deux paramètres.

Bien que les hauteurs d'eau aient été utilisées ici plutôt que les débits, la relation entre les MES et la hauteur d'eau décrit tout de même une forme d'hystérèse relativement répandue dans ce genre d'analyses (Williams, 1989 ; Batalla & Vericat, 2009). L'hystérèse est mise en évidence par le fait que la relation hauteur / MES observée à la montée, est différente de la courbe observée à la descente. Cela signifie que l'aspect chronologique interfère dans cette relation. La Figure 14 représente une courbe « type », observée sur la station SAU4 en 2016.

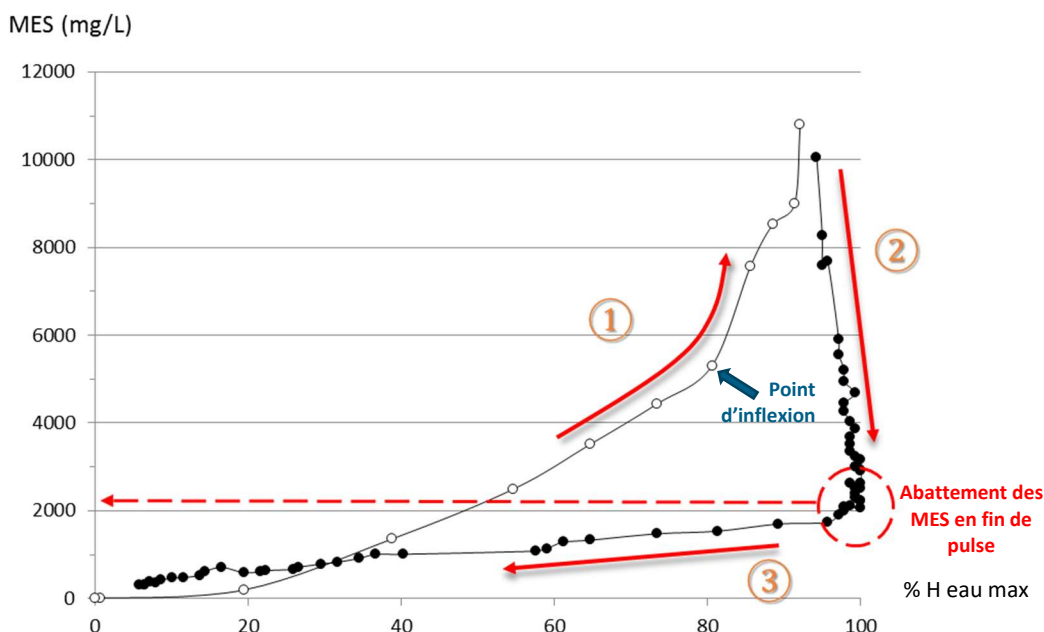


Figure 14 : relation « type » de l'évolution en hystérèse de la relation hauteur d'eau / MES observée sur les pulses – Ex du tronçon de la Saulce en 2016

Il est possible de distinguer trois phases dans l'état de la relation hauteur d'eau / MES.

- Une première phase ascendante, (1, en blanc) au cours de laquelle la concentration en MES croît avec la hauteur d'eau. Lors de cette phase l'érosion est prépondérante, augmentant plus ou moins progressivement au fur et à mesure de l'augmentation de l'énergie de la masse d'eau,
- Deux phases descendantes (2 et 3, en noir) au cours desquelles les MES diminuent :
 - une première caractérisée par une diminution de MES, à hauteur d'eau plus ou moins constante (2) : elle correspond à l'abattement de la turbidité pendant le plateau à débit maximum du pulse. Durant cette phase l'érosion diminue, et les matériaux sont purgés du tronçon,
 - une seconde (3), correspondant à la phase de diminution de MES, pendant la baisse de la hauteur d'eau, à la fin du pulse. La baisse de l'érosion se poursuit, potentiellement accélérée par la baisse de l'énergie de l'eau. Les quantités de MES sont faibles.

Ce type de représentation permet de visualiser plus nettement deux points caractéristiques dans l'évolution du taux de MES au cours d'un pulse :

Le point d'inflexion marquant une accélération de l'augmentation des MES au cours de la montée d'eau. Celle-ci se produit lorsque la hauteur d'eau atteint 60 à 80% de sa valeur maximale pour les tronçons d'Espinasses, de la Saulce. (Cf. Synthèse 2014-2017). Cette rupture de pente semble faire émerger un débit minimum efficace au-delà duquel l'érosion augmente fortement. L'atteinte de ce seuil montre que le débit du pulse est suffisant pour créer des érosions significatives sur le fond de la rivière.

Le niveau d'abattement des MES en fin de pulse. Observé sur la station aval, il est assimilable à la proportion de MES évacuées du tronçon en fin de pulse. Cet indicateur est utilisé dans la présente étude comme indicateur d'efficacité (Cf. IV.1.4)

A noter qu'en observant le bilan sédimentaire en fin de tronçon court-circuité, il n'est pas possible d'évaluer l'existence de phénomènes locaux de sédimentation. Ceux-ci sont en effet masqués par les phénomènes d'érosion qui sont prépondérants. Ces phénomènes peuvent notamment avoir lieu en bordure de lit mouillé ou sur des bancs immergés en milieu de lit mouillé. Ces phénomènes ne sont toutefois que très localisés et ne justifient pas une remise en cause des pulses. Par ailleurs, ils auraient lieu pour n'importe quel niveau de débit.

Espinasses :

Les valeurs maximales de concentration en MES sont globalement peu variables, comprises entre 2 et 3.5 g/l de MES. Elles sont croissantes d'amont vers l'aval, avec parfois une augmentation plus nette entre deux stations. Cette régularité est à l'image de l'hydrologie de ce tronçon qui n'a subi aucun autre lâché d'eau que les pulses durant la période d'étude. Le pulse se charge en sédiments sur tous les tronçons.

Saulce :

Les valeurs prises par le pic de MES sont assez variables d'une année sur l'autre. Elles varient de 2500 mg/l MES en 2015 à près de 11 000 la saison suivante. Ces variations d'intensités sont corrélées en partie à la chronique hydrologique précédant le pulse et à l'état de colmatage avant pulse qui en découle (Figure 15).

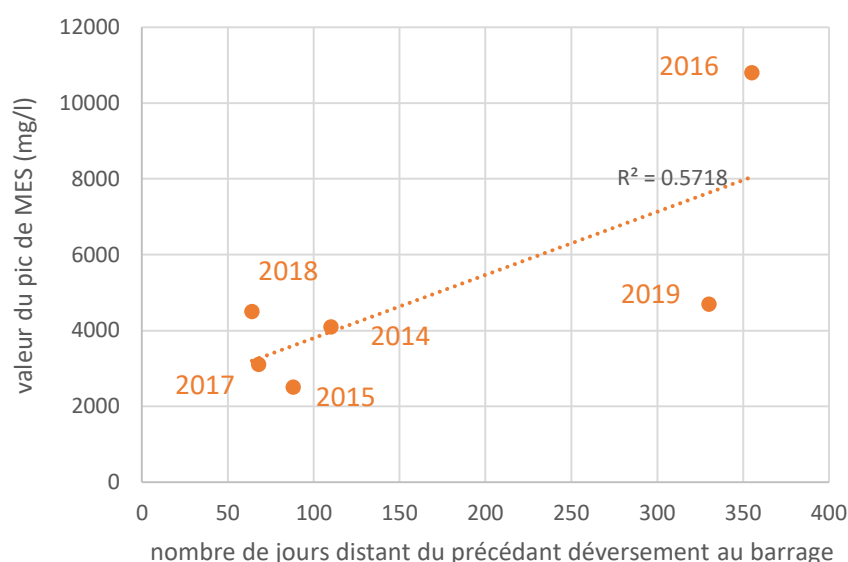


Figure 15: mise en relation de la valeur du pic de MES au niveau de la station aval (SAU4) avec le nombre de jours distant du précédent déversement dans le tronçon court-circuité.

La figure 15 est une représentation de la valeur du pic de MES au niveau de la station aval (SAU4) en fonction du nombre de jours distant du précédent déversé dans le tronçon court-circuité. Elle confirme l'existence d'une relation mais aussi que d'autres facteurs interviennent. Ainsi, en 2019 par exemple aucun déversé n'est intervenu sur une période de plus de 300 jours précédant le pulse, à l'image de 2016. Pourtant le transport solide est beaucoup plus faible que celui de 2016 et semble davantage se rapprocher de celui des années 2014, 2015, 2017 et 2018 pour lesquelles des déversés étaient intervenus moins de 110 jours avant le pulse. La différence est liée à un épisode de précipitations intenses intervenu moins de 100 jours avant le pulse de 2019 qui, s'il n'a pas provoqué de déversés au barrage de la Saulce, a gonflé les débits du tronçon court-circuité et a provoqué des déversés significatifs au barrage de saint Lazare. Ainsi il semble que ce type de phénomène a des effets similaires à un déversement sur ce paramètre. Une corrélation serait à rechercher

entre le débit réel transitant dans le tronçon court-circuité de la Saulce et le pic de MES du pulse mais en absence de station hydrométrique, la donnée n'existe pas.

L'Escale :

Les valeurs des pics de MES sont moins élevées que sur les autres tronçons, (< 1500 mg/l) et l'évolution entre les stations ne montre pas d'augmentation des concentrations en MES. C'est particulièrement marqué en 2017 et 2018 puisque le pic maximum est observé au niveau de la première station puis diminue vers l'aval.

Concernant les faibles valeurs des pics de MES, ce tronçon, comme le suivant est beaucoup plus affecté par les déversés hydrauliques aux barrages. Les deux dernières saisons en particulier font suite à des épisodes hydrologiques marquant, intervenu moins de 100 jours auparavant ce qui semble avoir purgé les matières mobilisables. L'état de colmatage moyen est de ce fait en général satisfaisant sur ce site.

La diminution de la valeur du pic d'amont vers l'aval pourrait également traduire des phénomènes de décantation ou de dilution par les apports intermédiaires. La décantation des MES vers l'aval est probable en raison de la présence de nombreux seuils qui ponctuent ce tronçon et créent des zones nettement ralenties au débit du pulse.

Compte tenu de la faiblesse du colmatage initial sur ce tronçon, il est encore difficile d'en tirer des conclusions sur le niveau d'efficacité du pulse et sur sa capacité à réellement mobiliser et exporter les sédiments fins.

Cadarache :

Concernant le site de Cadarache, les enregistrements effectués pendant les deux pulses effectués montrent une réponse différente des autres tronçons. D'une part, les gammes de valeurs de MES sont plus faibles, avec des pics de MES inférieurs à 1000 mg/L. D'autre part, la station CAD1 présente des variations chaotiques de MES au regard de hauteurs d'eau pourtant peu fluctuantes.

Les fluctuations chaotiques de teneurs en MES enregistrées sur la station amont (CAD1) peuvent être dues à la proximité particulière de la station vis-à-vis du barrage d'où ont lieu les déversés. Les enregistrements de la sonde sont probablement influencés par des phénomènes locaux de dépôts de matériaux qui n'ont pas été lissés par la distance. Le double pic en 2016 sur la station ESCA1, ainsi que le crénelage du pic 2017 sur ESP1, résultent sans doute du même mécanisme.

La diminution de la valeur du pic d'amont vers l'aval traduit là encore des phénomènes de décantation ou de dilution par les apports intermédiaires mais les faibles valeurs de MES concernées viennent relativiser l'intérêt de cette observation.

Compte tenu de la faiblesse du colmatage initial sur ce tronçon, il est encore difficile d'en tirer des conclusions sur le niveau d'efficacité du pulse sur sa capacité à réellement mobiliser et exporter les sédiments fins.

IV.1.3.2 Analyses quantitatives

L'analyse quantitative du transport solide en suspension généré par le pulse peut être analysé par deux indicateurs :

- **Le transport solide en suspension total**, mesuré au niveau de la station la plus aval de chaque tronçon (cf. §III.4.1.2). Cette valeur permet d'appréhender globalement ce qui a été exporté lors de chaque pulse.
- **Le transport solide en suspension spécifique**, rapporté au linéaire de tronçon court-circuité qui permet de quantifier l'intensité de ces phénomènes.

Ces deux indicateurs sont présentés dans la figure 16.

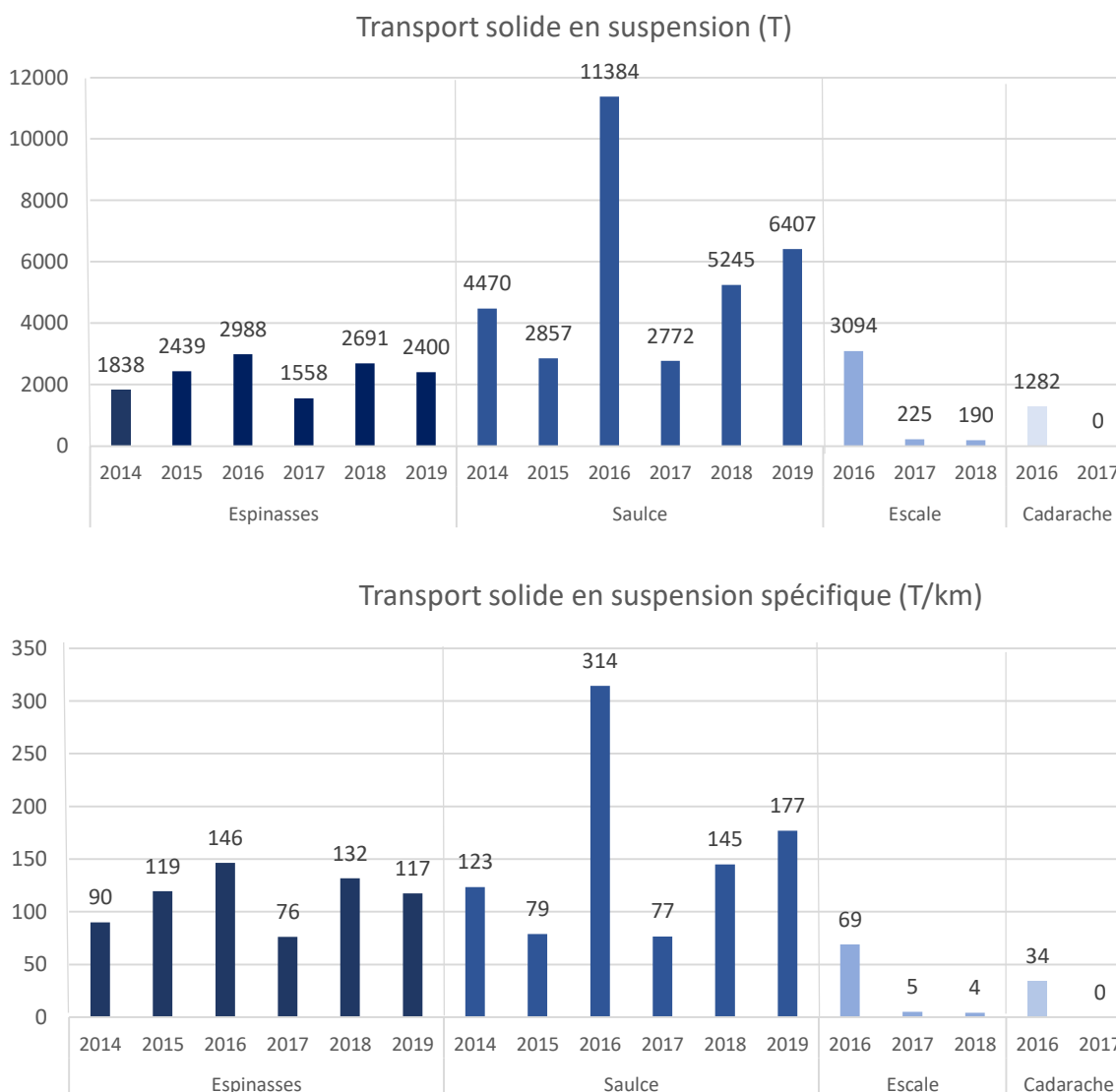


Figure 16 : Transport solide total (TST, tonnes) et transports solides spécifiques (TSS, tonnes/km) estimés à l'occasion des pulses hydrauliques

L'examen de ces résultats appelle plusieurs commentaires :

- **Un pulse sort très nettement du lot, celui de la Saulce, sur l'hiver 2016.** La valeur de transport solide évaluée (11 384 T) est de 2 à 8 fois celle observée sur les cinq autres saisons de ce tronçon. Pour rappel, la saison 2016 est la seule où aucun déversé n'est intervenu depuis le pulse 2015. La relation

entre le transport solide et le délai précédant le dernier déversé peut être effectué, comme précédemment pour le pic de MES. L'année 2019 présente un transport solide toujours plus faible qu'escompté en raison de l'épisode de précipitation évoqué précédemment mais il faut noter que le niveau de prédictibilité global de la corrélation entre le délai sans déversés et le niveau de transport solide est nettement amélioré ($> 70\%$).

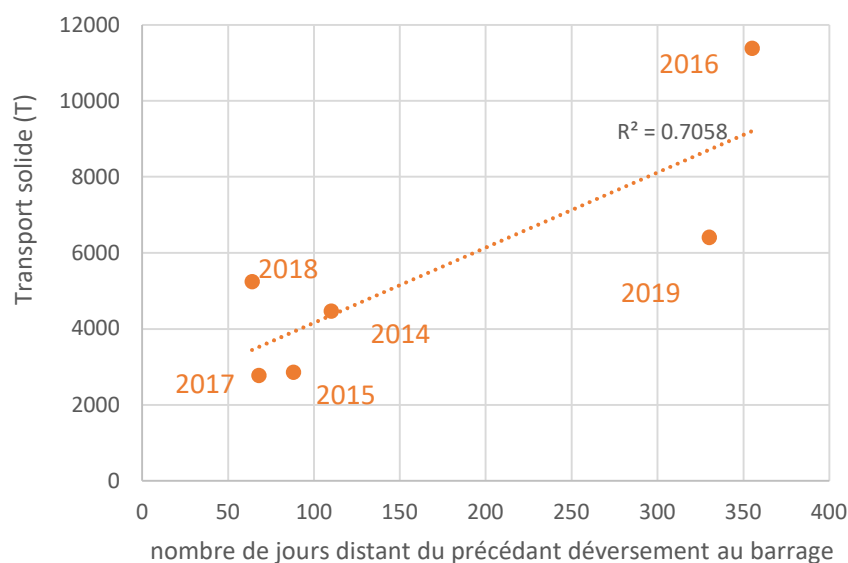


Figure 17: mise en relation du transport solide en suspension exporté par les pulses de la Saulce avec le nombre de jours distant du précédent déversement dans le tronçon court-circuité.

- **Le tronçon d'Espinasses** montre des valeurs moins fluctuantes, qui restent dans la gamme moyenne de celles observées sur la Saulce. L'absence de déversés sur la période explique vraisemblablement cette régularité mais il peut toutefois être remarqué que les valeurs de transport solide observées n'atteignent pas celles de la Saulce en absence de déversés (2016 et 2019). La comparaison entre ces deux tronçons met en évidence une sensibilité particulière de la Saulce au colmatage. Ce résultat sera mis en relation avec l'état initial des tronçons dans la suite du rapport.
- **Les tronçons de l'Escaie et de Cadarache** montrent les valeurs les plus faibles, voir complètement inexistantes sur 2017 et 2018. Les phénomènes d'érosions de limons sont bien moins marqués sur ces deux tronçons aval. La mise en relation des ces résultats avec le niveau de colmatage avant pulse est réalisé dans la suite du rapport.

Il est intéressant de noter qu'au-delà de l'effet de la chronique hydrologique, les tronçons pour lesquels le transport solide engendré par les pulses est supérieur correspondent à ceux dont les bassins versants intermédiaires sont connus comme étant des sources importantes de limons à l'échelle de la Moyenne et Basse Durance. En effet, Bertier & Bouchard (2007) expliquent que, de 1990 à 2002, le bassin versant intermédiaire de la Saulce apportait plus de 43% des limons à l'échelle de cette partie de la Durance. C'est celui qui montre les valeurs de matières en suspensions transportées les plus fortes. Les tronçons de l'Escaie et d'Espinasses produiraient environ 39 et 10% des limons respectivement. Le premier montre un transport solide faible, dans un contexte où de nombreux déversés d'ampleurs supérieurs existent, mais le second affiche des valeurs significatives, dans un contexte de stabilité hydrologique plus marqué. Ces résultats seront mis en évidence avec le niveau de colmatage des tronçons dans le chapitre suivant.

IV.1.4 Synthèse sur l'efficacité hydraulique du pulse

La synthèse de l'efficacité des pulses hydrauliques est effectuée par le rappel de trois paramètres :

- ✓ Le transport solide standard qui est indicateur de l'intensité globale des phénomènes d'érosion,
- ✓ L'amortissement de l'érosion avant le maximum de débit indique le potentiel d'érosion complémentaire si on applique un débit de pulse légèrement supérieur.
- ✓ L'abattement de la turbidité en fin de pulse indique, s'il est fort, que le pulse est suffisamment long pour épuiser la plus grande part des MES érodables au débit appliqué.

Tronçon	Saison	Transport MES Standard T/km	Amortissement de l'érosion avant le max. de débit	Abattement en fin de pulse %
Espinasse	2014	90	oui	67%
	2015	119	oui	75%
	2016	146	oui	75%
	2017	76	oui	88%
	2018	132	oui	86%
	2019	117	oui	76%
Saulce	2014	123	nc.	85%
	2015	79	oui	76%
	2016	314	non	84%
	2017	77	non	90%
	2018	145	nc.	nc.
	2019	177	oui	68%
Escale	2016	69	non	59%
	2017	5	nc.	nc.
	2018	4	nc.	nc.
Cadarache	2016	34	oui	30%
	2017	0	nc.	nc.

Figure 18 : bilan des principaux indicateurs d'efficacité hydraulique du pulse (nc : non calculable)

Espinasses :

Les six pulses font apparaître des valeurs moyennes et régulières de transport solide standard, indiquant des intensités d'érosions moyennes au regard des autres pulses suivis. L'amortissement de l'érosion avant le plateau du pulse témoigne d'un faible gain attendu pour un débit légèrement supérieur et l'abattement important (compris entre 67 et 88%) indique que la plus grande part des matières érodables à ce débit l'ont été. La réduction de 2 h de la durée du pulse en 2018 et 2019 ne provoque pas de dégradation de ces indicateurs.

Les éléments obtenus laissent penser que le dimensionnement du pulse d'Espinasses est bon.

Saulce

L'ensemble des pulses à l'exception de celui de 2016, affichent des valeurs médianes d'intensité de l'érosion, une érosion qui s'amortit de façon plus ou moins synchrone avec l'atteinte du pic de débit et un bon

abattement de la turbidité en fin de pulse³. Ces éléments laissent penser à **un bon dimensionnement du pulse dans le contexte de ces années.**

La troisième année (2016) affiche une intensité de l'érosion nettement plus forte, la plus forte de la chronique. Dans ce contexte l'érosion n'était pas amortie lorsque le pulse a atteint son débit maximum ce qui n'exclue pas que l'application d'un débit plus fort aurait permis de poursuivre l'augmentation de l'intensité de l'érosion. En revanche l'ensemble des autres paramètres sont positifs. En revanche, en 2017 le même phénomène s'est produit (érosion pas amortie) alors que le volume de transport solide était le même qu'en 2015. La variable débit n'est donc sans doute pas la seule variable explicative.

Le dimensionnement de ce pulse apparaît suffisant pour provoquer une érosion intense et pour épuiser le potentiel d'érosion au débit appliqué.

Escale

Le pulse de l'Escale, suivi en 2016, conduit à une érosion d'intensité moyenne à basse des limons, qui ne s'amortit pas avant le débit maximum du pulse. La durée du pulse permet en revanche d'épuiser la plus grande part des phénomènes d'érosions amorcés. Les indicateurs des pulses de 2017 et 2018 n'ont pu être calculés. **Les résultats devront être mis en relation avec les états initiaux de colmatage pour pouvoir discuter de l'efficacité hydraulique du pulse.**

Cadarache

Les phénomènes d'érosions observés sur les pulses 2016 et 2017 de Cadarache sont très faibles ce qui réduit l'intérêt d'observer les autres indicateurs. **Ces pulses semblent inefficaces sans qu'il soit possible de dire à ce stade de l'analyse si c'est du fait du dimensionnement hydraulique ou si ce résultat est dû à l'état initial.** Cette question sera abordée dans la suite de l'analyse.

³ Certains indicateurs d'amortissement ne sont pas calculables (n.c.) en raison du colmatage de la sonde en fin de pulse.

IV.2 SUIVI DU COLMATAGE SUPERFICIEL

La précédente synthèse (SAGE 2017) avait mis en évidence que les pulses ne provoquaient pas de modifications morphologiques sur les stations, en dehors de phénomènes locaux d'érosion de cônes sédimentaires d'affluents. De même, il était conclu que les pulses hydrauliques n'entraînent pas de changements profonds de granulométrie sur les sites étudiés. Ce constat est plutôt positif dans la mesure où les pulses hydrauliques sont dimensionnés afin de ne pas engendrer de perte de granulométrie intéressante pour la reproduction des espèces cibles. Il semblerait que les puissances appliquées dans ce cas respectent cet objectif. La présente synthèse actualise et complète l'analyse de l'effet du pulse sur le colmatage qui s'est révélé pertinent.

IV.2.1 Traitement des données

Dans le cadre de la synthèse pluriannuelle, les classes de granulométrie et d'enchâssement attribuées à chaque type de substrat (le plus grossier, dominant principal et secondaire) caractérisant les placettes échantillonnées ont permis le calcul de moyennes pondérées selon les expressions suivantes :

$$\text{Colmatage moyen} = Cl(S.\text{max}) * 0.1 + Cl(S.\text{dom1}) * 0.6 + Cl(S.\text{dom2}) * 0.3$$

$$\text{Granulométrie moyenne} = Cl(S.\text{max}) * 0.1 + Cl(S.\text{dom}) * 0.6 + Cl(S.\text{dom2}) * 0.3$$

Avec :

Cl : Classe de granulométrie ou d'enchâssement

S.dom1 : Substrat dominant principal

S.max : Substrat le plus grossier

S.dom2 : Substrat dominant secondaire

Ces calculs sont inspirés de ceux utilisés dans la méthode d'Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière (EVHA) (Ginot et al., 1998) permettant de quantifier la granulométrie d'un substrat. Les coefficients appliqués à chaque type de substrat ont été toutefois adaptés aux pourcentages de recouvrement utilisés dans les protocoles de cette étude. Ainsi, deux notes synthétiques sont attribuées à chaque placette pour ces paramètres.

Représentations graphiques

Les représentations graphiques ainsi que les analyses statistiques réalisées dans le cadre de cette étude et présentées ci-dessous ont été réalisées à l'aide du logiciel R, version 0.99.892.

Les Boxplot représentent les quartiles de la répartition des valeurs, et les valeurs extrêmes en utilisant le seuil d'1.5 l'espace interquartiles. Les valeurs dépassant ce seuil sont représentées par des points.

Analyse statistique

La distribution de l'enchâssement moyen a pu être assimilée à une distribution normale pour la quasi-totalité des échantillons en raison de leur grande taille. (>>30). La normalité a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, puis l'homogénéité des variances à l'aide du test de Bartlett. Les comparaisons ont été réalisées individuellement à l'aide de test de Student, ou par groupes à l'aide d'une Anova, couplé au test post hoc de Tuckey. Les comparaisons entre campagnes, pour évaluer l'effet du pulse prennent en compte l'appariement des points : en effet les mesures ont été réalisées autant que possible au même endroit d'une campagne sur l'autre et ont été identifiées dans les données comme telles. Ces comparaisons ont été réalisées par paires d'échantillons, à l'aide du test de Student pour échantillons appariés.

Pour les quelques échantillons dont la distribution n'obéissait pas à une loi normale, les comparaisons font appel au test de comparaisons de Wilcoxon-Mann-Withney.

L'évaluation du dépôt de limon fournit une note par placette qui n'a pas été transformée. La donnée obtenue est donc discrète. Les comparaisons multiples entre tronçons puis entre stations (toutes années confondues) ont été réalisées à l'aide de tests de Kruskal-Wallis, suivi du test post Hoc de Dunn. Les analyses entre campagnes font appel au test de comparaisons de Wilcoxon-Mann-Whitney pour échantillons appariés.

IV.2.2 Analyse du colmatage et de l'enchâssement

IV.2.2.1 Caractérisation du site d'étude

La figure 19 présente les valeurs d'enchâssement moyen par tronçons et par stations obtenues à partir des résultats des campagnes préliminaires. Bien que ces valeurs présentent une forte variabilité tant à l'échelle des stations que des tronçons, des différences significatives sont mises en évidence.

A l'échelle des tronçons :

Le test de comparaison de l'Anova indique que les tronçons présentent des degrés d'enchâssement significativement différents, décroissants d'amont vers l'aval (colmatage moyen : 3.6 -> 3.3 -> 2.6 -> 2.1).

Ce résultat met en évidence un gradient de diminution vers l'aval qui suit l'évolution de la morphologie générale du lit de la Moyenne et Basse Durance. En effet, alors que la morphologie du lit des tronçons d'Espinasses et de la Saulce est caractérisée comme étant méandriforme, celle-ci est davantage tressée au niveau de l'Escale pour finalement présenter un caractère divagant très prononcé vers Cadarache (Chapuis, 2012). A cela s'ajoute la diminution vers l'aval de l'influence du barrage de tête de Serre-Ponçon, traduite par une augmentation vers l'aval de la taille des bassins versants intermédiaires et donc des apports liquides et solides des divers affluents. Les biefs les plus aval sont de moins en moins influencés par les débits réservés et davantage soumis aux déversés provoqués par les précipitations (§III.3 p.17). Ainsi, les tronçons les plus aval présentent un substrat, plus fréquemment mobilisé et donc moins enchâssé.

A l'échelle des stations :

Les analyses réalisées à l'échelle stationnelle confirment l'existence du gradient d'enchâssement décrit précédemment tout en apportant des informations complémentaires :

Les tronçons de l'Escale et de Cadarache apparaissent homogènes en enchâssement. Aucune différence significative n'est observée entre les stations.

Sur les tronçons d'Espinasses et de la Saulce, deux stations diffèrent significativement de toutes les autres : ESP2 et SAU4. Ces deux stations ont en commun d'être influencées par des apports de matériaux en provenance d'affluent : un petit affluent sur ESP2, en amont immédiat de la station, et la Sasse pour SAU4, loin en amont mais fournissant un important transport solide. Ces observations confirment la causalité entre la réduction du transport solide dans les tronçons court-circuités, et l'enchâssement des matériaux.

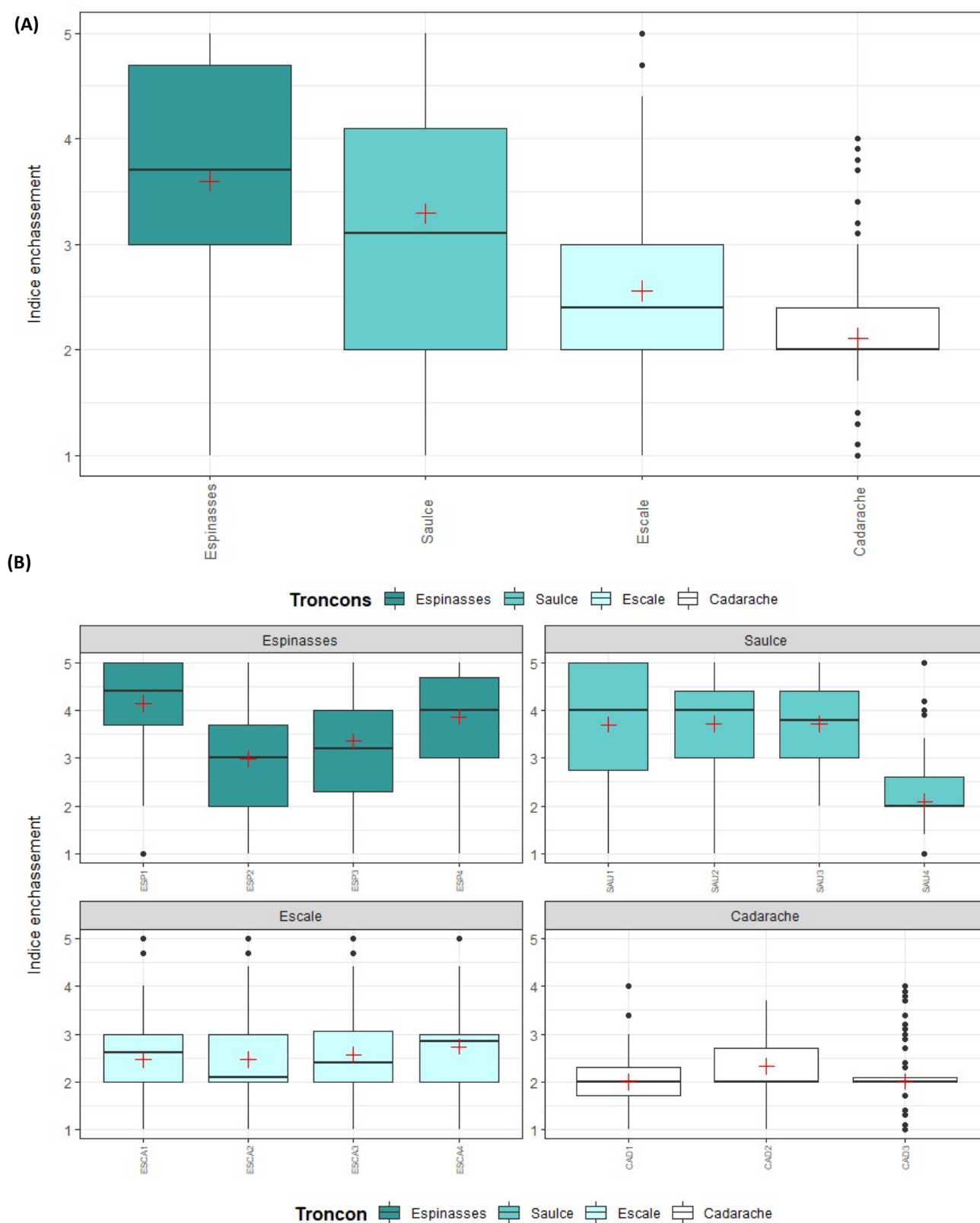


Figure 19 : Indice d'enchaînement pour les tronçons (A) et les stations (B) suivis, sur la période 2014-2019

IV.2.2.2 Variabilité temporelle

La variabilité temporelle, évaluée sur les campagnes initiales des pulses est présentée sur la Figure 20. A noter qu'à l'exception des campagnes initiales de 2014, les campagnes initiales des pulses annulés ont été intégrées.

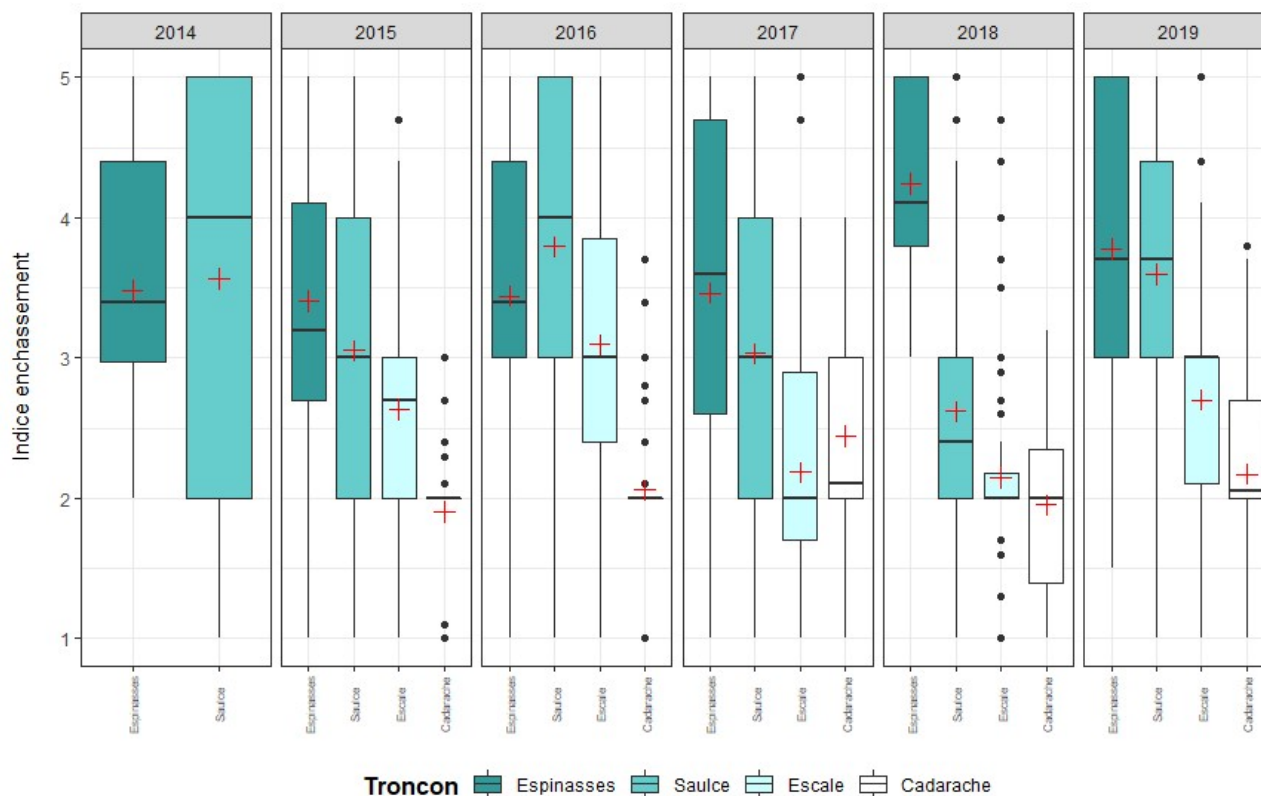


Figure 20 : Variation de l'indice d'enchâssement au cours des saisons

Espinasses :

L'état initial montre peu de fluctuations entre les années. Ce constat semble être une conséquence logique de la grande stabilité hydraulique de ce tronçon. Seul 2018 montre un état initial significativement supérieur aux années antérieures.

Saulce :

La plupart des états initiaux sont significativement différents chaque année montrant une réelle variabilité sur ce tronçon. Ces variations interannuelles importantes corroborent celles également observées sur le suivi de l'efficacité mécanique des pulses indiquant une relation binaire entre la présence effective d'un colmatage et la réussite plus prononcée d'un lâcher. La Figure 21 est une représentation de la valeur moyenne du colmatage lors de l'état initial en fonction du nombre de jours distant du précédent déversé dans le tronçon court-circuité. Elle confirme l'existence d'une relation qui semble directe.

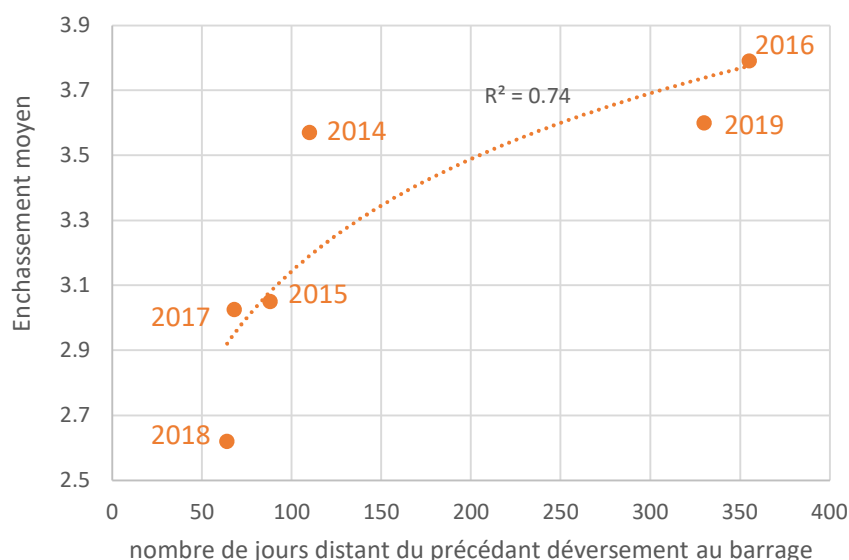


Figure 21: mise en relation de la valeur moyenne de colmatage de l'état initial Saulce avec le nombre de jours distant du précédent déversement dans le tronçon court-circuité de la Saulce.

Escale :

Les tendances de variations interannuelles de l'enchâssement moyen sont similaires à celles observées sur la Saulce, mais les valeurs absolues sont beaucoup plus faibles. La relation entre la chronique hydrologique avant pulse et l'enchâssement du tronçon est donc observable ici également. Sur le tronçon de l'Escale, les déversés sont nettement plus fréquents et d'amplitude plus importante que sur le tronçon de la Saulce mais il faut noter que les événements pluviométriques qui provoquent des déversements sur le tronçon court-circuité de la Saulce sont les plus importants, et qu'ils affectent également le tronçon de l'Escale avec plus de vigueur.

Cadarache :

Les états initiaux montrent de loin les niveaux de colmatage les plus faibles. Ils varient peu, excepté une légère augmentation en 2016, qui ne se retranscrit pas pour autant dans le flux de MES du pulse. Ce tronçon est globalement beaucoup moins enchâssé que les trois précédents.

IV.2.2.3 Effet du pulse

IV.2.2.3.a Evolution de l'enchâssement liée au pulse

L'analyse de l'effet du pulse est effectuée ici en comparant avant/après les caractéristiques moyennes d'enchâssement des placettes sur chaque site et sur chaque station (Figure 22).

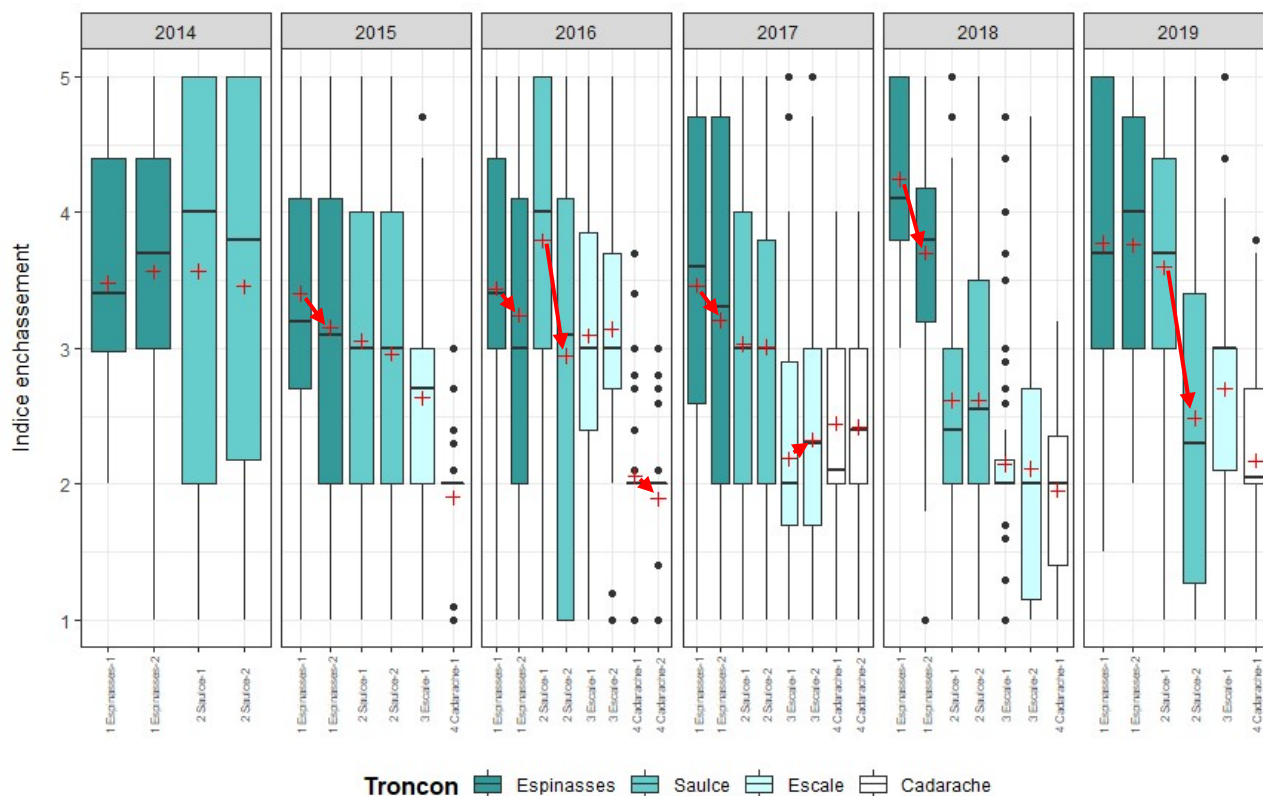


Figure 22 : variations de l'enchâssement lors de chaque pulse. Les flèches indiquent les variations statistiquement significatives

Les comparaisons des valeurs d'enchâssement moyen relevées entre les campagnes préliminaires et post-pulse indiquent des résultats différents selon les tronçons (Figure 22). Les résultats à l'échelle des tronçons ont été traités à l'aide de test de Student pour échantillons appariés.

Concernant le tronçon d'Espinasses :

Une baisse significative de l'enchâssement est observée lors de 4 pulses sur 6 sur la période de suivi. En 2014 et 2019, les variations observées sont non significatives. Toutefois le pulse de 2014 a été perturbé par des précipitations ce qui peut induire en erreur sur le résultat réel. Seul le pulse de 2019 est sans effets observables sur ce paramètre. Il faut rappeler ici que le tronçon d'Espinasses est le plus enchâssé des tronçons suivis et qu'à ce titre le substrat minéral est difficilement mobilisable. Des paramètres internes au tronçon court-circuité, tel que la présence de matériaux érodables au niveau des cônes sédimentaires des affluents pourraient expliquer les variations interannuelles d'efficacité.

Concernant le tronçon de la Saulce :

Sur les 6 pulses réalisés, deux montrent un gain significatif : 2016 et 2019. L'effet sur ce tronçon semble directement corrélé à l'état initial et donc comme mis en évidence précédemment à la chronique hydrologique précédant le pulse. Il faut noter que le tronçon de la Saulce est la principale source de limons de la Basse et Moyenne Durance et que cela est associé à une faible fréquence de déversement au barrage. Cette combinaison de facteur en fait vraisemblablement le tronçon le plus vulnérable à l'accumulation de limons. En 2016 et 2019, la période sans déversement est de plus de 300 jours avant le pulse.

Concernant le tronçon de l'Escale

Les états initiaux sur ce tronçon sont relativement bons, en comparaison des tronçons amont, et les effets mesurés sont de faible amplitude. Aucun effet positif significatif n'est mesuré. La seule évolution statistiquement significative est une augmentation de l'enchâssement au passage du pulse, en 2017. Sur ce tronçon, le suivi en temps réel du pulse a mis en évidence des phénomènes de décantations qui expliquent l'absence d'effets ou l'existence d'effets antagonistes.

Concernant le tronçon de Cadarache

Il semble que le niveau d'enchâssement soit inférieur après le passage du pulse de 2016 sur ce tronçon, où le niveau d'enchâssement diminue de 0.2 en deuxième campagne. En 2017, aucun gain n'est observé, en dépit d'un état initial légèrement moins bon.

A noter que sur ce tronçon la discussion concerne des gains très modestes, en relation avec un état initial peu colmaté.

IV.2.2.3.b Effet du pulse sur les placettes favorables

En complément de l'analyse de la significativité des évolutions de colmatage observées avant et après pulse, il est intéressant d'aborder plus précisément l'évolution de la proportion de placettes les moins enchâssées. Deux catégories ont été retenues ici :

- **Les placettes peu enchâssées** correspondent à celles ayant une classe d'enchâssement pour le substrat moyen de 1 ou 2. (Cf. Tableau 6, p.24). Elles correspondent aux placettes les plus favorables pour la faune puisque la granulométrie conserve une bonne porosité, et une mobilité peu affectée.
- **Les placettes moyennement enchâssées** prennent également en compte la classe 3. Cette classe correspond à un enchâssement léger du substrat associé à la présence de limons. La porosité du substrat est réduite mais il conserve un bon potentiel de mobilisation.

Au-delà de 3, le substrat est très enchâssé et non mobilisable en dehors de phénomènes hydrologiques importants.

L'évolution de la proportion de placettes appartenant aux deux catégories précédemment citées est présentée dans le Tableau 8.

Evolution du nombre de placettes favorables							
	Placettes peu enchâssées (classes 1 et 2)				Placettes enchâssement moyen (classes 1 à 3)		
	avant pulse	après pulse	évolution		avant pulse	après pulse	évolution
Espinasses							
2014	22%	23%	▲	1%	58%	46%	▼ -12%
2015	23%	34%	▲	12%	54%	58%	▲ 4%
2016	23%	34%	▲	12%	52%	57%	▲ 5%
2017	20%	42%	▲	22%	46%	49%	▲ 3%
2018	2%	11%	▲	9%	18%	42%	▲ 25%
2019	17%	18%	▲	1%	35%	41%	▲ 15%
Saulce							
2014	31%	29%	▲	-1%	44%	48%	▲ 4%
2015	35%	41%	▲	6%	69%	68%	▲ -1%
2016	16%	37%	▲	21%	33%	58%	▲ 24%
2017	35%	35%	▲	0%	66%	68%	▲ 3%
2018	51%	50%	▲	-1%	78%	73%	▼ -5%
2019	15%	58%	▲	43%	42%	76%	▲ 34%
Escale							
2016	32%	24%	▼	-8%	72%	72%	▲ 0%
2017	67%	53%	▼	-14%	93%	93%	▲ -1%
2018	82%	74%	▼	-8%	91%	90%	▲ -1%
Cadarache							
2016	84%	92%	▲	8%	98%	100%	▲ 2%
2017	62%	54%	▼	-8%	94%	97%	▲ 2%

Tableau 8: évolution des placettes peu et moyennement enchâssées au passage du pulse. Un seuil de 5% est retenu pour évaluer la tendance d'évolution.

Tronçon d'Espinasses :

◆ Classes 1 et 2 :

Quatre des six pulses montrent une évolution, de l'ordre de 9 à 22%, du taux de placettes peu enchâssées. Les années concernées (2015 à 2018) sont celles sur lesquelles une évolution statistiquement significative a été mise en évidence.

◆ Classes 1, 2 et 3 :

Trois années montrent une évolution positive supérieure à 5%, dont 2 de façon nette : 2018 et 2019. 2018 est l'année dont l'état initial est le plus mauvais (18% seulement de placettes peu à moyennement enchâssées) et l'évolution importante observée (+25%) place l'état après pulse dans la moyenne des années

précédentes (40 à 50%). 2019 est la seconde année où le colmatage est le plus mauvais et l'on observe un gain de 15%.

A noter que le basculement d'une classe très enchâssée (classes 4 et 5) à moyennement enchâssée (≤ 3) peut se faire localement par déstabilisation de la couche d'armure superficielle mais le mécanisme le plus couramment observé sur le tronçon d'Espinasses est un enfouissement de cette même couche d'armure sous un flux de substrat nouveau. Un tel effet a une durée limitée dans le temps et est dépendant de flux de matériaux en provenance principalement des cônes sédimentaires des affluents. La disponibilité des tels matériaux a vraisemblablement une influence sur le résultat du pulse sur le colmatage et cela explique sans doute l'absence de corrélation entre la quantité de transport solide en suspension pendant le pulse et l'effet de celui-ci sur l'enchâssement

💧 Bilan global :

Si l'on retient un gain net à l'issue de l'observation de ces deux indicateurs, 5 lâchers sur 6 ont au moins un des indicateurs positif, avec un gain supérieur à 12%. La seule année où aucun gain n'est visible sur chacun des indicateurs correspond à l'année 2014, année au cours de laquelle la lecture du lâcher a été très perturbée par des précipitations. Le niveau de colmatage de l'état initial et les résultats observés lors des autres années pourraient laisser penser que ce lâcher a quand même pu avoir des effets positifs

Tronçon de la Saulce

💧 Classes 1 et 2 :

Trois des six pulses étudiés montrent une évolution positive du taux de placettes peu enchâssées mais deux sont particulièrement significatives (+21% en 2016 et +43% en 2019). Ces deux lâchers correspondent aux années les plus colmatées (3.8 en 2016 et 3.6 en 2019).

Les deux lâchers ayant le moins fonctionné correspondent aux années où le colmatage initial était le plus faible (2.6 en 2018 et 3 en 2017).

Seule l'année 2014 se distingue avec un colmatage initial assez fort (3.6) et une absence de gain. Le rapport annuel indique cependant que le lâcher est intervenu 15 jours après des épisodes pluvieux relativement abondants (plus de 130mm entre le 13 et le 19 janvier) et que ces épisodes pluvieux intervenus entre la campagne préalable et la campagne post-pulse sont susceptibles de générer des effets sur le milieu physique qu'il sera difficile de distinguer de ceux du pulse. Il est donc possible que la lecture des effets du lâcher soit perturbée.

💧 Classes 1, 2 et 3 :

Ces deux pulses montrent également une nette évolution positive du taux de placettes moyennement enchâssées (respectivement +24% et +34%).

💧 Bilan global :

Le bilan global montre que 3 lâchers sur 6 sont positifs avec un doute sur une quatrième année (2014). Les deux années où les lâchers ont le moins fonctionné correspondent aux années où le colmatage initial est le plus faible. Les deux années où les lâchers ont le mieux fonctionné correspondent à celles où le TCC a connu la plus longue absence d'écoulement et le colmatage initial le plus fort.

Tronçon de l'Escale

💧 Classes 1 et 2 :

Sur les trois pulses réalisés, l'effet est systématiquement négatif sur les placettes peu enchâssées (-8 à -14%). Les milieux étaient très faiblement colmatés (2.2 en 2017 et 2.1 en 2018). En 2016, le colmatage était un peu plus élevé, le transport solide total également mais l'effet a tout de même été négatif. Il conviendra de vérifier à l'avenir sur un état plus colmaté si le même phénomène se produit.

💧 **Classes 1, 2 et 3 :**

Sur les trois pulses réalisés, l'effet est systématiquement nul en intégrant les placettes moyennement enchâssées.

💧 **Bilan global :**

Le bilan global est clairement négatif. Sur les trois pulses réalisés, l'effet est systématiquement négatif sur les placettes peu enchâssées (-8 à -14%), et nul si l'on intègre la classe 3. Il faut remarquer que les états initiaux des pulses suivis sont particulièrement favorables.

Tronçon de Cadarache

Sur le tronçon de Cadarache, l'effet n'est ni réellement positif ni réellement négatif pour les deux indicateurs suivis. Il faut remarquer que les états initiaux des pulses suivis sont particulièrement favorables.

IV.2.1 Analyse de la couverture de limons

Rappelons que l'analyse du dépôt de limons a été ajoutée au protocole fin 2015 pour affiner le niveau d'information lorsque l'analyse de l'enchrassement semblait manquer de sensibilité. Cet axe d'analyse n'est donc disponible qu'à partir de cette date.

IV.2.1.1 Caractérisation du site d'étude

La Figure 23 présente la répartition des classes de dépôt de limons mesurées sur les placettes, regroupées par tronçons et par stations.

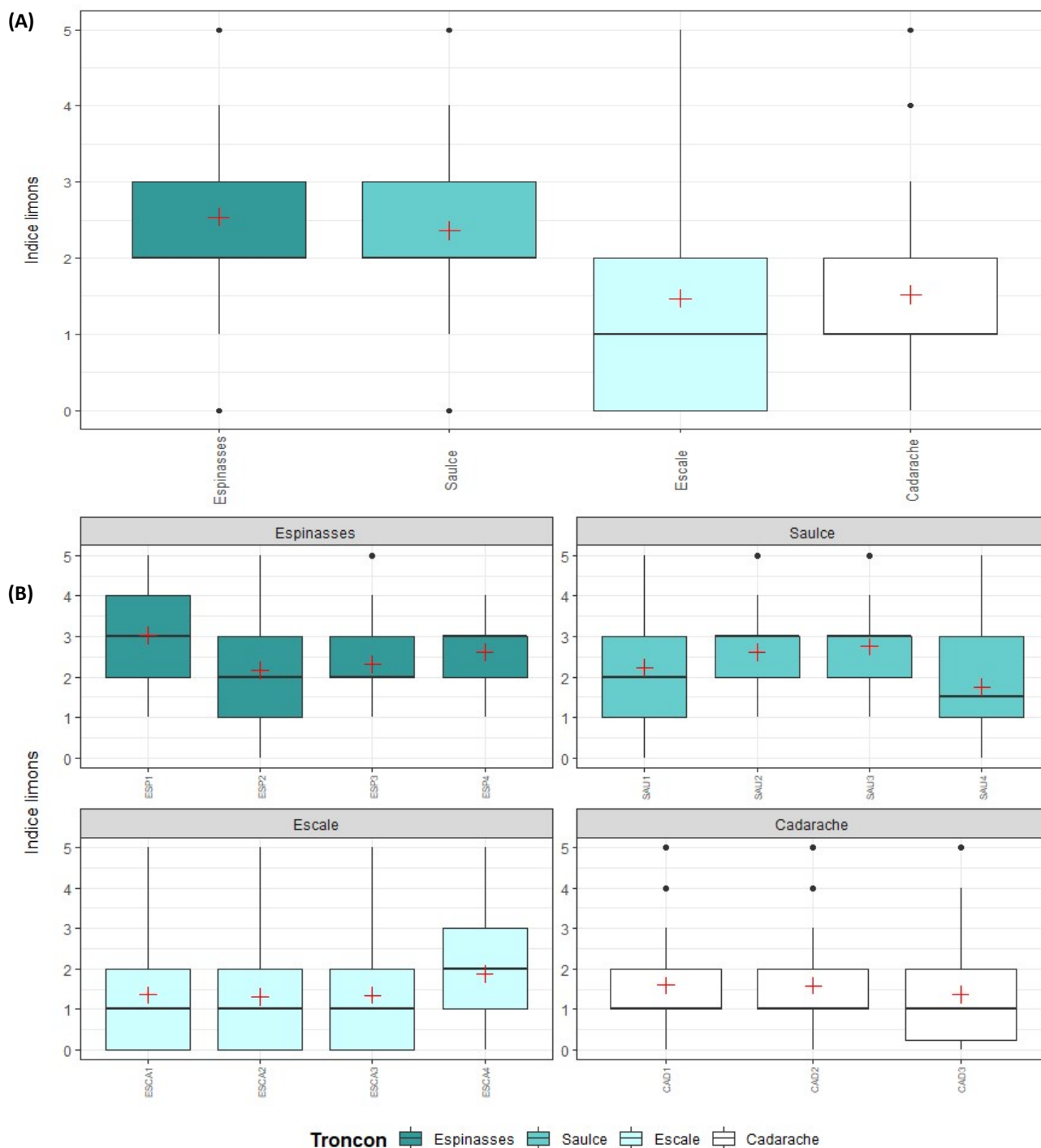


Figure 23 : classes de dépôts de limons observées lors des états initiaux à partir de fin 2015 ; (A) à l'échelle du tronçon ; (B) à l'échelle des stations

L'observation du recouvrement par les limons montre une situation comparable pour les sites d'Espinasses et de la Saulce. Ces deux sites montrent un colmatage significativement plus important que celui des deux autres tronçons. Le tronçon le moins colmaté apparaît être celui de l'Escale, suivi de Cadarache.

- **Le tronçon d'Espinasses** montre une situation assez hétérogène, marquée par une dégradation particulière, de la station la plus amont (ESP1).
- **Le tronçon de la Saulce** montre une évolution en cloche. La station la plus amont (SAU1), qui présentait le maximum d'enchâssement est ici moins touchée par les dépôts de limons. La station la plus aval, en revanche, est la plus préservée, tant du point de vue de l'enchâssement que de celui de la couverture de limons.
- **Sur l'Escale**, la couverture de limons est assez faible. A l'exception de la station aval (Esca4) qui montre une augmentation notable, la situation est plutôt homogène. Cette dernière station n'est pas particulièrement la plus enchâssée.
- **Le tronçon de Cadarache** enfin montre une relative homogénéité stationnelle, autour de valeurs basses de couvertures de limons.

Globalement s'il existe quelques différences à l'échelle stationnelle, les états initiaux des dépôts de limons montrent des évolutions similaires à ceux de l'enchâssement. Ce paramètre est toutefois probablement plus sensible aux événements hydrologiques de faible intensité. Il y a une causalité commune à l'enchâssement et au colmatage, à savoir : la fixité des débits cumulée à l'existence de flux de limons issus des bassins versant intermédiaires. Les stations en pied de barrages, plus touchées par la fixité des débits que par les flux de limons issus des affluents semblent à ce titre plus enchâssées qu'enlimonées. La station ESP1, la plus enlimonée du tronçon d'Espinasses, semble faire exception en raison de la présence d'affluents riches en limons dès le pied de barrage.

IV.2.1.2 Variabilité temporelle

La variabilité temporelle, évaluée sur les campagnes initiales des pulses est présentée sur la Figure 24.

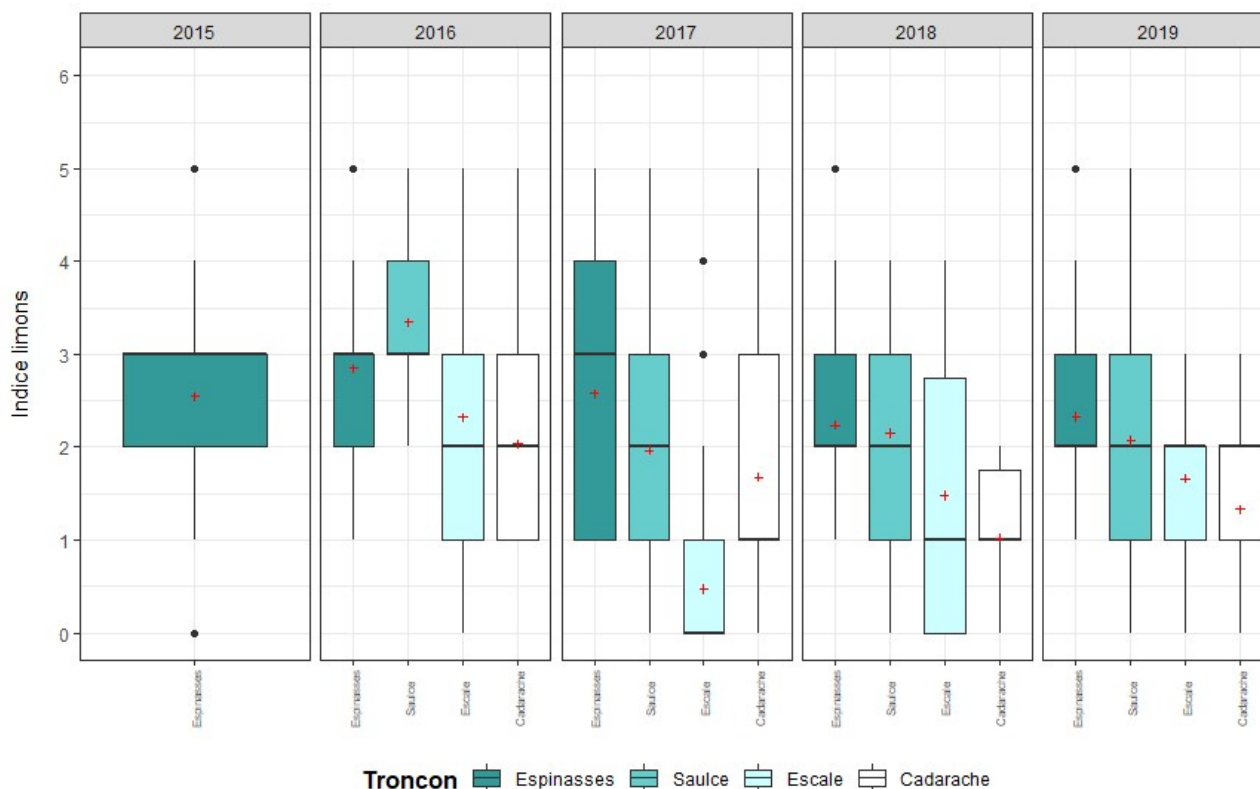


Figure 24 : Variation classes de limons au cours du suivi

Le tronçon d'Espinasses ne montre pas de variations interannuelles importantes. Cela s'explique par une couverture de limons importante et par la fixité des débits. La couverture de limons sur **le tronçon de la Saulce** est en revanche beaucoup plus variable, comme c'est également le cas pour l'enchâssement. Si le tronçon de la Saulce est en moyenne moins enlimonné que celui d'Espinasses, il présente en 2016 la valeur la plus importante de la chronique suite à l'absence de déversés pendant un an. Dans un contexte hydrologique en apparence similaire en 2019, l'état initial concernant les limons sur la Saulce est moins dégradé. La différence entre ces deux situations est qu'en 2019, des précipitations importantes sont intervenues avant l'état initial, sans provoquer de déversement. Sur cette même année, l'état initial de l'enchâssement sur la Saulce, évoqué précédemment, était proche de celui de 2016. Deux conclusions peuvent être émises :

- La couverture de limons est sensible aux événements hydrologiques de faibles ampleurs, telles que les précipitations sur le bassin versant intermédiaire des tronçons court-circuités.
- Le paramètre d'enchâssement est d'avantage sensible aux événements hydrologiques de grandes ampleurs, tels que ceux provoqués par des déversements aux barrages.

Ce dernier apparaît donc davantage pertinent pour l'évaluation de l'effet des pulses hydrauliques. Il peut être noté également qu'un suivi du colmatage interstitiel, mesuré par infiltration, a été abandonné en cours de programme en raison de son absence de sensibilité aux pulses hydrauliques. Il avait été mis en évidence (SAGE 2017) que sa gamme de sensibilité concernait les événements hydrologiques majeurs, tel que les crues morphogènes.

Sur ces bases il n'apparaît pas étonnant que **les tronçons de l'Escale et de Cadarache** montrent également des variations importantes de la note moyenne de la couverture de limons, non corrélées aux variations d'enchâssement observées précédemment.

IV.2.1.3 Effet du pulse

L'effet du pulse est analysé ici en mesurant l'écart de colmatage entre les campagnes pour chaque placette regroupée au sein des tronçons (Cf. Figure 25).

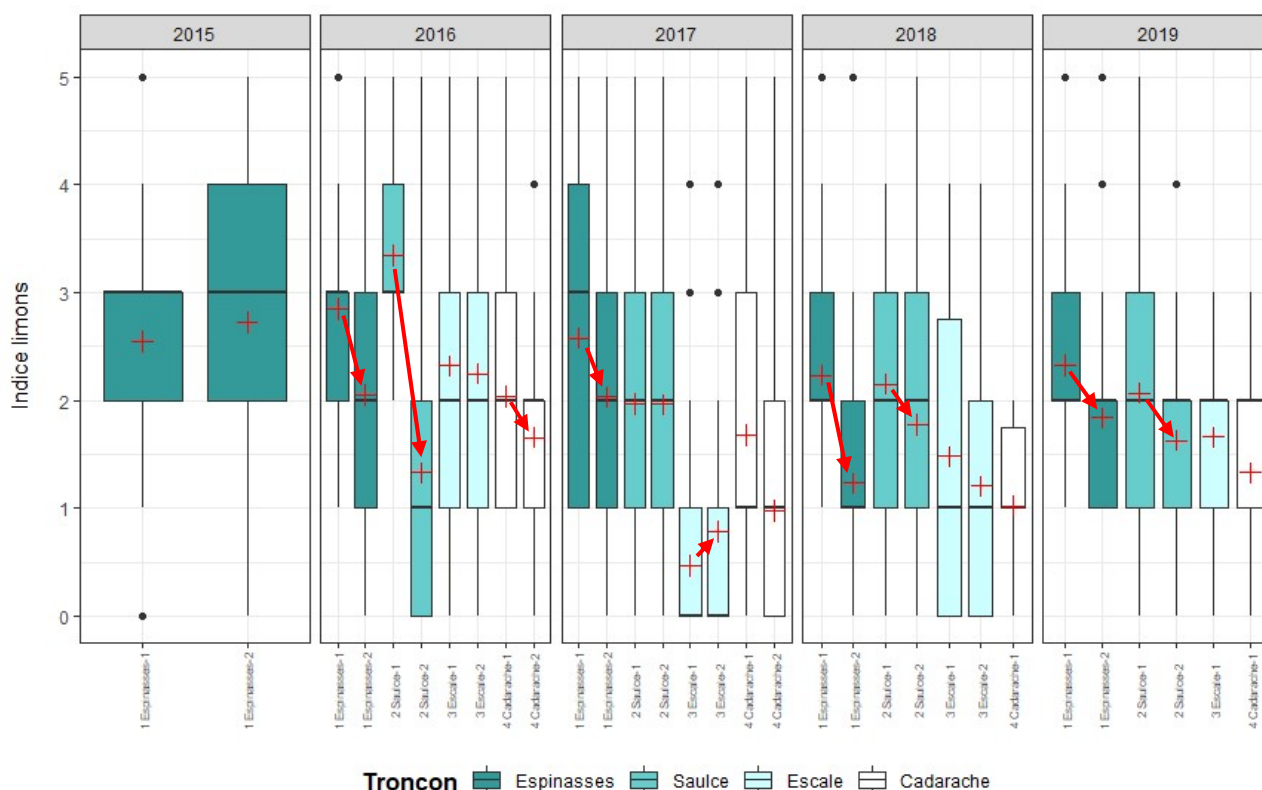


Figure 25 : Variations des classes de limons entre les campagnes. Les flèches indiquent les variations statistiquement significatives entre campagnes consécutives à l'échelle des tronçons

Un gain significatif est observé sur la plupart des pulses **pour le tronçon d'Espinasses**. Seule l'année 2015 ne montre pas d'évolution significative en raison de résultats hétérogènes. La situation est plus variable sur le **tronçon de la Saulce**, à l'image de ce qui est observé sur l'enchâssement. L'année 2016, dont l'état initial est là encore particulièrement mauvais, montre le meilleur gain de la chronique.

Aucun gain n'est confirmé sur le tronçon de l'Escale. La seule variation significative est une dégradation en 2017, année où l'état de colmatage est le plus faible (et par rapport aussi à l'ensemble des stations).

Un léger gain significatif semble exister sur **Cadarache** en 2016 en dépit d'état initiaux peu enlimonés.

Au bilan, l'effet le plus marqué des pulses sur la couverture de limons concerne le tronçon de la Saulce en 2016, qui a l'état initial le plus mauvais. Suivent les pulses d'Espinasses de 2016 et 2018. Des effets positifs du pulse sont observés sur le tronçon de Cadarache en 2016 malgré des états initiaux relativement bons, et l'absence d'effets observés sur l'enchâssement. Aucun effet n'est observé en revanche sur le tronçon de l'Escale, en dépit d'un état initial légèrement moins bon que celui du tronçon de Cadarache.

En conclusion, le pulse a plus fréquemment un effet sur la couverture de limons que sur l'enchâssement mais il est aussi biologiquement moins perturbant. La couverture de limons semble sensible aux événements hydrologiques de faibles ampleurs, telles que les précipitations sur le bassin versant intermédiaire des tronçons court-circuités. Le paramètre d'enchâssement est davantage sensible aux événements hydrologiques de grandes ampleurs, tels que ceux provoqués par des déversements aux barrages. Ce dernier apparaît donc davantage pertinent pour l'évaluation de l'effet des pulses hydrauliques. Néanmoins l'enlimonement permet de préciser les mécanismes en œuvre lorsque l'évolution de l'enchâssement ne fournit pas de résultats significatifs.

V. Bilan du dimensionnement et de l'effet des pulses

L'ensemble des éléments analysés dans le présent rapport est mis en parallèle et synthétisé dans le tableau 9. Les paramètres retenus sont agrégés selon la typologie suivante :

- **Paramètres d'états initiaux** : issus des campagnes avant pulses et témoignant du caractère plus ou moins dégradé (moins favorable) du milieu avant pulse
- **Paramètres de suivi de pulse** : ces paramètres concernent l'intensité de l'érosion pendant le pulse et le caractère *a priori* plus ou moins favorable de la chronologie d'évolution de la turbidité. (Cf. IV.1.4 p.38)
- **Les paramètres d'effets du pulses** qui correspondent à des comparaisons avant/après des moyennes des données obtenues de la proportion de placettes favorables à la faune en termes d'enchâssement.

A noter que le code couleur appliqué ici ne prend pas en compte la significativité, ou non, des écarts constatés. Les écarts significatifs figurent en gras.

		Etat initial				Suivi du pulse		Effet du pulse				Bilan du pulse
		Enchassement (moyen)	Couverture de limons (moyenne)	% placettes peu enchassées (classes 1 et 2)	% de placettes peu à moyennement enchassées (classes 1 à 3)	Transport de MES standard (T/km)	Pourcentage d'abatement en fin de pulse	Evolution de l'enchassement moyenne	Evolution de la couverture de limon moyenne	évolution % placettes peu enchassées	évolution % de placettes peu à moyennement enchassées	
Espinasses	2014	3.5	nd.	22%	58%	90	67%	0.1	nd.	1%	-12%	pas de gain
	2015	3.4	2.5	23%	54%	119	75%	-0.2	0.2	12%	4%	leger gain
	2016	3.4	2.9	23%	52%	146	75%	-0.2	-0.8	12%	5%	gain net
	2017	3.5	2.6	20%	46%	76	88%	-0.3	-0.6	22%	3%	gain net
	2018	4.2	2.2	2%	18%	132	86%	-0.54	-1.0	9%	25%	gain net
	2019	3.8	2.3	17%	35%	117	76%	0.0	-0.5	2%	15%	leger gain
Saulce	2014	3.6	nd.	31%	44%	123	85%	-0.1	nd.	-1%	4%	pas de gain
	2015	3.1	nd.	35%	69%	79	76%	-0.1	nd.	6%	-1%	leger gain
	2016	3.8	3.3	16%	33%	314	84%	-0.8	-2.0	21%	24%	gain net
	2017	3	2	35%	66%	77	90%	0.0	0.0	0%	3%	pas de gain
	2018	2.6	2.1	51%	78%	145	nc.	0.0	-0.4	-1%	-5%	pas de gain
	2019	3.6	2.1	15%	42%	177	68%	-1.1	-0.4	43%	34%	gain net
Escale	2016	3.1	2.3	32%	72%	69	59%	0.0	-0.1	-8%	0%	pas de gain
	2017	2.2	0.5	67%	93%	5	nc.	0.1	0.3	-14%	-1%	pas de gain
	2018	2.1	1.5	82%	91%	4	nc.	-0.2	-0.2	-8%	-1%	pas de gain
Cadarache	2016	2.1	2	84%	98%	34	30%	-0.2	-0.4	8%	2%	leger gain
	2017	2.4	1.7	62%	94%	0	nc.	0	-0.7	-8%	2%	pas de gain

Etat initial

favorable

moins favorable

Suivi du pulse

10 forte valeur

1 faible valeur

Effet du pulse

2 positif

0 non perceptible

-1 négatif

Bilan du pulse

gain net

leger gain

pas de gain

Tableau 9 : synthèse des paramètres d'états initiaux, de suivi de pulse, et d'analyse des effets ; en gras les écarts statistiquement significatifs

Tronçon d'Espinasses :

Le tronçon d'Espinasse présente de manière régulière les états initiaux de colmatage les plus mauvais des tronçons suivis. Les différences interannuelles sont peu marquées, mais une tendance à la dégradation semble émerger sur la chronique de 6 ans. Le suivi du pulse met en évidence des variations interannuelles de la quantité de matières en suspensions (de 76 à 146 T/km) qui ne dépendent pas de l'état initial.

L'effet du pulse sur le colmatage est positif sur 5 des 6 années suivies. Aucun effet n'est observable sur le colmatage en 2014 mais des épisodes pluvieux intervenus pendant le pulse perturbent le diagnostic. Trois années montrent un net gain (2016, 2017 et 2018), sans que cela ne puisse être corrélé à un état initial plus mauvais, ou à un transit de matières en suspension plus fort.

A noter que l'amélioration du colmatage et de l'enchâssement peut se faire localement par la déstabilisation de la couche d'armure sédimentaire mais le mécanisme le plus couramment observé sur le tronçon d'Espinasses est un enfouissement de cette même couche d'armure sous un flux de substrat nouveau. Un tel effet a été mis en évidence par le suivi des frayères potentielles pour la truite fario (rapport annuels SAGE 2015 à 2019) en aval de cônes sédimentaires d'affluents. Il a un effet bénéfique concernant la surface et la qualité de ces frayères et dépend étroitement de la disponibilité de ces matériaux au niveau des cônes sédimentaires. Ainsi il est possible que l'effet du pulse soit corrélé à cette disponibilité, qui elle est indépendante de l'enchâssement de l'état initial et de la quantité de limons érodables dans le tronçon court-circuité.

En conclusion, l'effet du pulse sur le colmatage du tronçon d'Espinasses est sans doute systématiquement positif dans le contexte figé de ce tronçon. Mais l'ampleur du gain n'est pas prévisible au regard des paramètres de l'état initial.

Tronçon de la Saulce :

Les résultats des pulses sur le tronçon de la Saulce sont très variables. Deux années sortent du lot : celui de 2016, et celui de 2019. Ces deux années cumulent des états initiaux les plus mauvais de la chronique, les plus forts taux de transport de MES, et le meilleur gain en termes de colmatage du substrat. L'examen de la chronique hydrologique met en évidence l'absence de déversement au barrage durant plus de 300 jours précédant ces deux pulses. Une différence existe néanmoins entre ces deux années. Alors que la période précédant le pulse 2016 était réellement inactive hydrologiquement, des précipitations importantes sont intervenues les mois précédant le pulse 2019, sans provoquer de déversements au niveau du barrage de la Saulce, mais en gonflant néanmoins les apports intermédiaires du tronçon court-circuité. Ces précipitations n'ont pas l'effet d'un pulse mais elles ont légèrement amélioré l'état initial et conduit à un transport de MES moindre par rapport à 2016.

Pour les autres années suivies, l'état initial semble corrélé au nombre de jour distant du précédent déversement au barrage, qui varie entre 110 pour 2014 à 62 pour 2018. Le gradient observé dans le nombre de jours de déversement comme sur l'état initial est ainsi : 2014->2015->2017->2018. Le transport de MES pendant le pulse recoupe plus ou moins ce gradient, ainsi que l'effet du pulse. Deux divergences peuvent toutefois être notées :

- En 2014 aucun gain n'est observé alors que l'état initial comme le transport de MES laissaient espérer un pulse efficace. Des précipitations importantes sont intervenues pendant et après le pulse, affectant l'état après pulse. La significativité de l'analyse de l'effet du pulse n'est donc pas bonne.
- En 2018, le transport de MES est relativement élevé, en dépit d'un état initial le meilleur de la chronique. Pour autant le pulse ne montre pas de gains, comme attendu.

Au bilan, l'effet du pulse sur le tronçon de la Saulce apparaît dépendant de l'état initial et du délai sans déversement avant pulse.

- Un effet net est observé pour les pulses ayant subi une période sans déversement de plus de 300 jours, (2016 et 2019),
- Un effet léger est observé (exception faite de 2014 pour les raisons évoquées précédemment) pour le pulse de 2015 ayant subi une période sans déversement de 88 jours, et dont l'état initial montre un enchâssement moyen 3.1.
- La limite d'effet semble être le pulse de 2017 : 68 jours sans déversement, enchâssement de 3, 35% de placettes peu enchâssées. Ces caractéristiques d'état initial ne semblent plus permettre de gain sur ce tronçon.

Ce constat met en évidence que les déversements aux barrages lors d'épisodes pluviométriques ont les mêmes effets que les pulses hydrauliques et que s'ils sont intervenus suffisamment récemment, le pulse n'apporte pas de gain complémentaire. En ce sens, pouvoir corrélérer l'état initial et les épisodes hydrologiques serait intéressant. Les caractéristiques de l'état initial de 2017 (colmatage à 3) pourraient ainsi être utilisées sur ce tronçon comme valeurs seuils pour n'appliquer les pulses que dans un contexte qui laisse espérer un gain de colmatage. L'expérience de 2019 montre que des précipitations intenses sans déversement, si elles ont un effet positif sur le colmatage, n'ont pas un effet comparable à un déversement au barrage qui est beaucoup plus efficace.

Tronçon de l'Escale

Les tendances de variations interannuelles de l'enchâssement moyen sont similaires à celles observées sur la Saulce, mais les valeurs absolues sont beaucoup plus faibles (Cf. IV.2.2.2, p. 43). La relation entre la chronique hydrologique avant pulse et l'enchâssement du tronçon est donc observable ici également. Sur le tronçon de l'Escale, les déversés sont nettement plus fréquents et d'amplitude plus importante que sur le tronçon de la Saulce mais il faut noter que les événements pluviométriques qui provoquent des déversements sur le tronçon court-circuité de la Saulce sont les plus importants, et qu'ils affectent également le tronçon de l'Escale avec plus de vigueur.

Ainsi aucun gain n'est observé dans les contextes de colmatage et d'hydrologie des années suivies. La question du dimensionnement hydraulique du pulse n'est pas tranchée, puisque des phénomènes de re-sédimentation des matériaux érodés ont été observés, provoquant une dégradation de certains indicateurs de colmatage mais celle-ci ne pourra sans doute être évaluée que dans le contexte d'un pulse appliqué sur un état initial laissant espérer un gain, soit plus mauvais que celui de 2016.

Tronçon de Cadarache

Le tronçon de Cadarache est celui qui présente les meilleurs états initiaux. Les résultats obtenus permettent même de qualifier le tronçon de « peu colmaté ». L'intensité de l'érosion est logiquement très faible mais étonnamment une légère amélioration des indicateurs est notée sans qu'il soit certain de pouvoir le corrélérer au Pulse.

Ces éléments de discussion ne changent toutefois pas la conclusion d'un pulse inefficace sur le tronçon de Cadarache, en raison d'états initiaux très bons. Comme pour l'Escale, il convient de constater les effets du lâcher sur un milieu colmaté avant de réinterroger son dimensionnement.

Bibliographie

Rapports annuels précédents

SAGE Environnement, 2014. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2013-2014 – Pulse de Saulce 2014. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2015. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2014-2015 – Pulse Espinasse 2014. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2015. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2014-2015 – Pulse de Saulce 2015. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2016. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse Espinasse 2015. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2016. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Saulce 2016. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2016. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de l'Escale 2016. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2016. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Cadarache 2016. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2017. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse d'Espinasses 2016. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2017. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Saulce 2017. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2017. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de l'Escale 2017. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2017. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Cadarache 2017. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2018. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse d'Espinasses 2017. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2018. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Saulce 2018. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2018. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de l'Escale 2018. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2019. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse d'Espinasses 2018. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2019. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse de Saulce 2019. Rapport annuel.

SAGE Environnement, 2020. Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance. Suivi des pulses de décolmatage 2015-2016 – Pulse d'Espinasses 2019. Rapport annuel.

Synthèses précédentes

SAGE Environnement, 2017. Analyse des effets des pulses hydrauliques de décolmatage sur le substrat minéral en Moyenne et Basse Durance - Synthèse pluriannuelle 2014-2016

SAGE Environnement, 2018. Analyse des effets des pulses hydrauliques de décolmatage sur le substrat minéral en Moyenne et Basse Durance - Synthèse pluriannuelle 2014-2017

Bibliographie externe

AFNOR, 2012. Qualité de l'eau – Guide d'application de la norme expérimentale XP T 90-333:2009

(Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes)

Barbiero C., Bouchard J.P., Pereira A., Poirel A., 2003. L'expérience d'Electricité de France dans la gestion du transport solide au droit des retenues. Comité Français des Grands Barrages (CFBR) et Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). Colloque Barrages et développement durable en France, Paris, 191-211.

Batalla R. J., Vericat D., 2009. Hydrological and sediment transport dynamics of flushing flows: implications

Bertier C., Bouchard J.P., 2007. Gestion sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant : La Durance.

Diapositives de présentation. EDF/LNHE

Braud S., Alber A., 2013. Synthèses des connaissances et proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau. DREAL Centre. 76 pages.

Bruslé J., Quignard J. P., 2001. Biologie des poissons d'eau douce européens. *Lavoisier* : 625 pages.

Chapman D. W., 1988. Critical Review of Variables Used to Define Effects of Fines in Redds of Large Salmonids, *Transactions of the American Fisheries Society*, 117:1.

Chapuis M., 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance (thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, France), 252 pages.

Chapuis M., Collomb D., 2012. La cicatrisation des rivières méditerranéennes françaises après les grandes perturbations de la seconde moitié du XXe siècle: réponses des systèmes fluviaux et stratégies de gestion. *Méditerranée*, 1 : 65-74.

Datry T., 2011. Colmatage interstitiel des cours d'eau : Développement d'un protocole de mesure standardisé sur les réseaux de contrôle de surveillance français. Rapport final. 106 pages.

Descloux S., 2011. Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : méthode d'estimation et effets sur la composition et la structure des communautés d'invertébrés benthiques et hyporhéiques (thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, France), 314 pages.

- Dumas J., Olaïzola M., Barrière L., 2007.** Survie embryonnaire du saumon Atlantique (*Salmo salar* L.) dans un cours d'eau de son aire de répartition, la Nivelle. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 384 :39-60.
- Fraisse L., Malavoi J.R., Souchon Y., Trocherie F., 1989.** Etude des conditions d'application de l'article 410 du code rural sur les débits réservés – 2^{ème} partie : Résultats d'une enquête relative aux effets des réductions de débits sur la qualité biologique des cours d'eau. Rapport Final. CEMAGREF. 127 pages.
- Gayraud S., Hérouin E., Philippe M., 2002.** Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macroinvertébrés. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (365-366) : 339-355
- Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P., Valentin S., 1998.** Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière. Guide méthodologique. CEMAGREF, 130 pages.
- Jean A.M., Lefebvre J., Pelissier F., 1981.** Utilisations et transferts des eaux de la Durance et du Verdon. *Méditerranée*, 43 : 23-37.
- Kemp P., Sear D., Collins A., Naden P., Jones I., 2011.** The impacts of fine sediment on riverine fish. *Hydrological Processes*, 25 : 1800-1821.
- Kondolf G. M., Wilcock P. R., 1996.** The flushing flow problem: defining and evaluating objectives. *Water Resources Research*, 32: 2589-2599.
- Leeks G.J.L., Newson M.D., 1989.** Re-sponses of the sediment system of a regulated river to a scour valve release: Llyn Clywedog, mid-Wales, UK. *Regulated Rivers: Research & Management*, 3: 93-106.
- Magand C., 2014.** Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique (thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, France), 350 pages.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 1989.** Méthodologie de description, quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux : exemple d'une station sur la Fillière (Haute-Savoie). *Revue de géographie de Lyon*, vol. 64 :252-259.
- Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011.** Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema. 216p
- Petticrew E.L., Krein A., Walling D. E., 2007.** Evaluating fine sediment mobilization and storage in a gravel-bed river using controlled reservoir releases. *Hydrological Processes*, 21 : 198-210.
- Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C., 1997.** The natural flow regime. *BioScience*, 47 :769-784.
- Schälchli U., 1992.** The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Hydrobiologia*, 235 : 189-197.
- Souchon Y., Nicolas V., 2011.** Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux. Rapport final. 28 pages.
- Tachet H., Richoux P., Bournaud M., Usseglio-Polatera P., 2010.** Invertébrés d'eau douce: systématique, biologie, écologie. CNRS éditions, Paris. 607 pages.

Thivin G., 2012. Evaluation physique standardisée du colmatage du lit des cours d'eau. Guide méthodologique et scientifique. IRSTEA, 45 pages.

Williams G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111 : 89-106.

Wood P.J, Armitage P.D.,1997. Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental management*, 21 : 203-217.