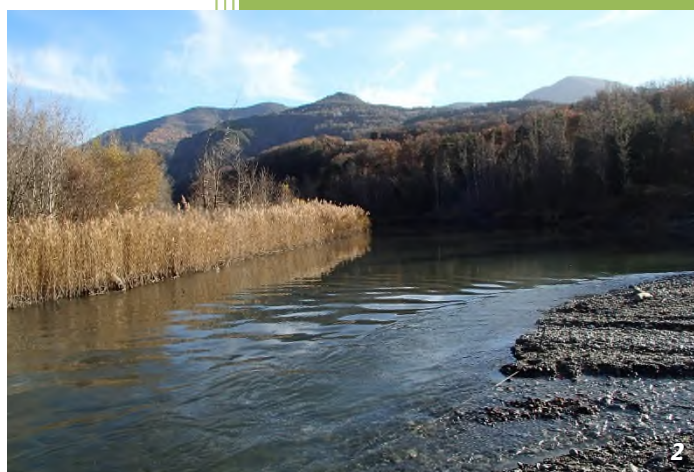


Suivi hydrobiologique de la vallée de la Durance

Suivi des pulses de décolmatage 2014/2019

Pulse Espinasses 2015



mars 2017

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



SAGE Environnement
12 Avenue du Pré de Challes
74940 Annecy-le-Vieux

(1) : Vue aérienne de la station ESP4

(2) : Prise de vue de la station ESP2 – Vue amont

(3) : Turbidité de la Durance pendant le pulse

(4) : Colmatage et enchâssement du substrat sur la station ESP2 lors de la campagne 1

N° d'affaire :	15.274	Date d'édition du rapport :	02/03/2017
N° de devis :	13.10.575	Indice de révision :	1
Chargé d'études :	Dumoutier Q.	Statut du document :	final
Intervenants :	Auzeil A. ; Billier G. ; Renahy S.	Confidentialité :	-

CONTEXTE	8
SUIVI DE COLMATAGE DU PULSE D'ESPINASSES 2015	10
I Stations de mesure	10
I.1 Localisation	10
I.2 Description	11
II Programme.....	15
II.1 Contexte hydrologique	15
II.2 Mise en œuvre du programme	15
III Matériel utilisé	17
III.1 Levés topographiques	17
III.2 Mesures de vitesses d'écoulement	17
III.3 Suivi physico-chimique des pulses	18
III.3.1 Matériel enregistreur	18
III.3.2 Préleveurs automatiques	19
III.4 Colmatage interstitiel	20
IV Méthodes mises en œuvre	21
IV.1 Suivi physico-chimique du pulse	21
IV.1.1 Programme du pulse	21
IV.1.2 Suivi en temps réel	21
IV.1.3 Recalcul des taux de matières en suspension	23
IV.1.4 Calcul du volume exporté pendant le pulse	23
IV.2 Suivi de la granulométrie et du colmatage	25
IV.2.1 Suivi de la granulométrie et du colmatage superficiel	26
IV.2.2 Suivi du colmatage interstitiel	31
IV.3 Suivi topographique des stations	32
IV.4 Suivi des peuplements d'invertébrés	33
IV.4.1 Principe du protocole	33
IV.4.2 Efforts de détermination	33
IV.4.2.a Détermination et stades de développement	33
IV.4.2.b Niveaux taxinomiques retenus	34
IV.4.2.c Détermination spécifique des EPT (Ephémères, Plécoptères, Trichoptères)	35
IV.4.3 Mise en œuvre dans le cadre du programme de suivi	36
IV.4.4 Résultats obtenus	36
IV.5 Suivi du niveau de colmatage et d'enchâssement du substrat sur les frayères potentielles	37
V Résultats.....	39
V.1 Suivi physico-chimique du pulse	39
V.1.1 Effet du pulse sur la hauteur d'eau	39
V.1.2 Effet du pulse sur les paramètres physico-chimiques	40
V.1.2.a Température	40
V.1.2.b Conductivité	41
V.1.2.c Oxygène dissous	42
V.1.3 Effet du pulse sur le transport solide	43
V.1.3.a Taux de MES sur les stations	43
V.1.3.b Volumes de matériaux exportés par le pulse	44
V.1.3.c MES et hauteur d'eau sur les stations	45

V.1.3.d	Relation entre l'énergie du pulse et le taux de MES.....	46
V.2	Suivi topographique du profil.....	48
V.3	Suivi granulométrique et colmatage superficiel	53
V.3.1	Evolution granulométrique globale.....	53
V.3.2	Evolution du colmatage et de l'enchassement	54
V.3.2.a	Description et interprétation à l'échelle stationnelle.....	54
V.3.2.b	Analyse à l'échelle du tronçon	67
V.4	Suivi du colmatage interstitiel.....	70
V.5	Suivi invertébrés.....	72
V.6	Suivi des frayères potentielles.....	73
V.6.1	Secteur Rochebrune	73
V.6.2	Secteur Archidiacre	78
V.6.3	Conclusions sur l'effet du pulse sur les frayères	82
VI	Conclusions et retour d'expérience	83
VI.1	Premiers éléments de conclusion sur l'efficacité du pulse 2015 d'Espinasse.....	83
VI.2	Retour d'expérience méthodologique	84
BIBLIOGRAPHIE.....		85

Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des lâches d'eau par tronçon	8
Tableau 2 : Données de pose des sondes enregistreuses	21
Tableau 3 : Echelle granulométrique de Wentworth (1922) modifiée par Malavoi et Souchon (1989)	27
Tableau 4 : Caractéristiques de l'échantillonnage du protocole de mesure du colmatage interstitiel pour le pulse d'Espinasses (2015).....	31
Tableau 5 : Niveaux taxinomiques retenus dans la présente étude (sauf diptères)	34
Tableau 6 : Niveaux taxinomiques retenus pour les diptères	34
Tableau 7 : Niveau de détermination atteint pour les genres d'EPT collectés sur la Durance durant l'année 2015	35
Tableau 8 : Limites des classes d'état selon l'arrêté du 25 janvier 2010 pour l'indice biologique suivi	36
Tableau 9 : Evolution granulométrique du substrat dominant sur les 30 placettes étudiées, entre les trois campagnes ; le trait pointillés rouge matérialise le pulse	53
Tableau 10 : Résumé de l'intensité d'enchâssement du substrat observée sur le tronçon d'Espinasses ; en colonne les classes d'enchâssement, et en ligne les résultats pas faciès et par campagnes	68
Tableau 11 : Taux d'infiltration sur les stations ESP1 et ESP3 avant et après pulse	71

Photographies

Photo 1 : Station ESP1 - Vue amont - Novembre 2015.....	11
Photo 2 : Station ESP2 - Vue aval pendant le pulse- Novembre 2015	12
Photo 3: Station ESP3 - Vue aval - Octobre 2015	13
Photo 4: Station ESP4 - Vue aval - Octobre 2015	14
Photo 5 : Réalisation de levés topographiques - 2015	17
Photo 6 : Mesures de vitesses d'écoulement - 2014	18
Photo 7: ISCO installés en bordure du cours d'eau	19
Photo 8: Mise en œuvre du protocole d'évaluation du colmatage interstitiel « Datry » – Photo gauche : Enfoncement du piézomètre dans le substrat, Photo droite : Infiltration du volume d'eau dans le piézomètre	20
Photo 9 : Dispositif de pose des sondes enregistreuses - La sonde est protégée dans le tube, retenue en amont par un lest et relevé vers l'aval par un pied - L'ensemble est sécurisé par un câble en acier de 3 mm	22
Photo 10 : Dispositif de pose des sondes enregistreuses en place	22
Photo 11: Reprise du cône alluvial suite au pulse d'Espinasses 2015 sur le profil amont (ESP2A) de la station ESP2 – Le lit s'est enfoncé de 70 cm	52

Figures

Figure 1 : Déversés 2015 au barrage d'Espinasses – source : (EDF & CIH, 2015)	15
Figure 2 : Programme prévisionnel et réalisation effective des opérations par station	16
Figure 3 : Planning prévisionnel et réalisation effective des interventions de suivi du pulse d'Espinasses de novembre 2015	16
Figure 4 : Conditions météorologiques pendant la période d'étude du pulse d'Espinasses 2015 – Station météorologique de La Beaume - source : (Meteociel, 2016)	16
Figure 5 : Dimensions d'un mini-piézomètre d'après le guide méthodologique et scientifique d'évaluation standardisée du colmatage du lit des cours d'eau (Datry, 2011).....	20
Figure 6 : Projection graphique du programme du pulse du 17/11/2015 sur le barrage d'Espinasses – source : (EDF CIH, 2016).....	21

Figure 7 : Corrélation NTU/MES obtenue sur 40 échantillons lors du pulse d'Espinasses 2015	23
Figure 8 : Illustration des données utilisées pour le calcul du taux de MES transitant pendant le pulse sur une station (ESP1 - 2015).....	24
Figure 9 : Stratégie de relevé de la granulométrie et du colmatage sur une station	26
Figure 10 : Méthode d'évaluation du degré de colmatage et d'enchâssement des matériaux du substrat alluvial (Archambaud et al., 2005 in Braud).....	28
Figure 11 : Estimation visuelle du dépôt de particules fines (GA T90-733, 2012)	29
Figure 12 : Grille d'évaluation du dépôt de limons (Adaptée par SAGE Environnement)	29
Figure 13 : Grille d'évaluation du niveau de colmatage proposée par Thivin, 2012.	32
Figure 14 : Stratégie d'observation mise en œuvre dans le cadre du suivi des frayères potentielles.....	38
Figure 15: Evolution des hauteurs d'eau sur les différentes stations au passage du pulse d'Espinasses en 2015 ; le pulse en m3/s a été surimposé	39
Figure 16: Evolution de la température de l'eau sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé	40
Figure 17 : Evolution de la conductivité de l'eau sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé	41
Figure 18: Evolution de la saturation de l'eau en oxygène sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé	42
Figure 19 : Evolution du taux de matières en suspension sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé	43
Figure 20 : Estimation de la quantité de matières solide en suspension transitant sur les quatre stations pendant le pulse d'Espinasses 2015	44
Figure 21 : Courbes d'évolutions des taux de matières en suspensions, cumulées aux hauteurs d'eau sur les quatre stations du tronçon d'Espinasses (2015) ; la flèche matérialise l'effet de la fin du pulse sur le taux de MES	45
Figure 22 : Evolution du taux de MES sur la station ESP1 en fonction des modalités de mise en œuvre du pulse	46
Figure 23: Relation entre le débit et le pic de MES sur la station ESP1	47
Figure 24 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP1 ; fond de carte 2015	55
Figure 25 : Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP1 ; fond de carte 2015	56
Figure 26 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP1	57
Figure 27 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP2 ; fond de carte 2015	58
Figure 28: Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP2 ; fond de carte 2015	59
Figure 29 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP2	60
Figure 30 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP3 ; fond de carte 2015	61
Figure 31 : Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP3 ; fond de carte 2015	62
Figure 32: Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP3	63
Figure 33 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP4 ; fond de carte 2015	64
Figure 34 : Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP4 ; fond de carte 2015	65
Figure 35 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et d'enchâssement sur la station ESP4	66
Figure 36 : Résumé du niveau de colmatage superficiel observé sur le tronçon d'Espinasses entre les trois campagnes	67
Figure 37 : Résumé du niveau d'enchâssement du substrat observé sur le tronçon d'Espinasses entre les trois campagnes.....	69
Figure 38 : Histogramme de répartition des valeurs de conductivité hydraulique sur les stations ESP1 et ESP3 entre les campagnes 1 et 3 ; Les résultats du haut sont comparées par station et les résultats du bas par campagne.....	70
Figure 39 : principaux indicateurs d'analyse des peuplements d'invertébrés.	72
Figure 40 : Evolution des surfaces potentielles de reproduction sur le secteur de Rochebrune	73

Figure 41 : Rehaussement des fonds suite au pulse 2015 sur le secteur de Rochebrune (SFR : Roch 4) – Le quadra orange a la même position sur la photo de gauche (pré-pulse) que celle de droite (post pulse) soulignant le rehaussement des fonds.....	73
Figure 42 : localisation des SFR et des placettes de mesure avant et après pulse sur le site de Rochebrune	74
Figure 43 : intensité du dépôt de limons sur les SFR du secteur de Rochebrune avant et après pulse	75
Figure 44 : enchâssement sur les SFR du secteur de Rochebrune avant et après pulse	75
Figure 45 : dépôts de limons sur les SFR avant et après pulse sur le site de Rochebrune	76
Figure 46: enchassements sur les SFR avant et après pulse sur le site de Rochebrune	77
Figure 47 : Evolution des surfaces potentielles de reproduction sur le secteur d'Archidiacre	78
Figure 48 : Modification granulométrique sur le secteur d'Archidiacre après le pulse (SFR : Archi 4) – Les « graviers grossiers » visibles sur la photo de gauche (pré pulse) disparaissent au profit des « cailloux grossiers »	78
Figure 49 : localisation des SFR et des placettes de mesure avant et après pulse sur le site d'Archidiacre	79
Figure 50 : intensité du dépôt de limons sur les SFR du secteur d'Archidiacre avant et après pulse	80
Figure 51 : enchâssement sur les SFR du secteur d'Archidiacre avant et après pulse	80

CONTEXTE

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 débit réservé applicables aux aménagements hydroélectriques existants, au plus tard au 1^{er} janvier 2014.

EDF a défini et proposé un relèvement du débit réservé des tronçons de la chaîne hydroélectrique de la Durance dans le cadre de cette législation. EDF a également proposé la mise en œuvre de pulses hydrauliques (lâchers d'eau pour le décolmatage du lit de la rivière) sur certains de ces tronçons. Ces modifications interviennent à partir de 2014.

Afin de quantifier les gains pour l'environnement, EDF a établi un protocole de suivi diversifié de ces débits réservés et pulses. Tous les compartiments des milieux aquatiques sont concernés par ces suivis.

Un ensemble d'études a été effectué par SAGE Environnement en 2014 et 2015 pour suivre les opérations expérimentales de décolmatage des tronçons court-circuités de la Durance. Les lâchers d'eau ont pour vocation principale de « nettoyer » les substrats avant la période de reproduction des espèces pisciaires utilisant les substrats minéraux pour leur ponte, de façon à améliorer le recrutement de ces espèces cibles. Parmi les autres effets positifs, ils favorisent les invertébrés benthiques (meilleure qualité du substrat) et ils permettent d'améliorer les échanges avec la nappe d'accompagnement (d'où un effet induit sur la température de l'eau).

Le tableau suivant récapitule les principales modalités des lâchers par tronçon, telles que proposées pour les premiers essais (Tableau 1).

Barrage	Espèce cible	Période du Lâcher	Volume maximal annuel du lâcher (hm ³)	Volume testé lors du 1 ^{er} lâcher (hm ³)	Q du lâcher (m ³ /s)	Q en rivière (m ³ /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 : Caractéristiques des lâches d'eau par tronçon

Le programme 2015 prévoyait la réalisation et le suivi des quatre pulses décrit précédemment. Parmi ceux-ci, deux seulement ont été réalisés : celui de la Saulce, le 12 février 2015 et celui d'Espinasses, le 17 novembre 2015.

Le pulse de l'Escale a été annulé à la demande de l'ONEMA en raison d'une fin d'hiver particulièrement douce. Des mesures de températures de l'eau réalisées dans la Durance la semaine précédant le pulse

laissaient craindre que la reproduction de l'Apron soit commencée. Le Pulse de Cadarache quant à lui a été annulé par la DREAL en raison d'un risque de dispersion d'une pollution existante dans le tronçon court circuité.

Le présent rapport concerne la réalisation d'un monitoring et d'un calibrage de ce programme sur le tronçon d'Espinasses.

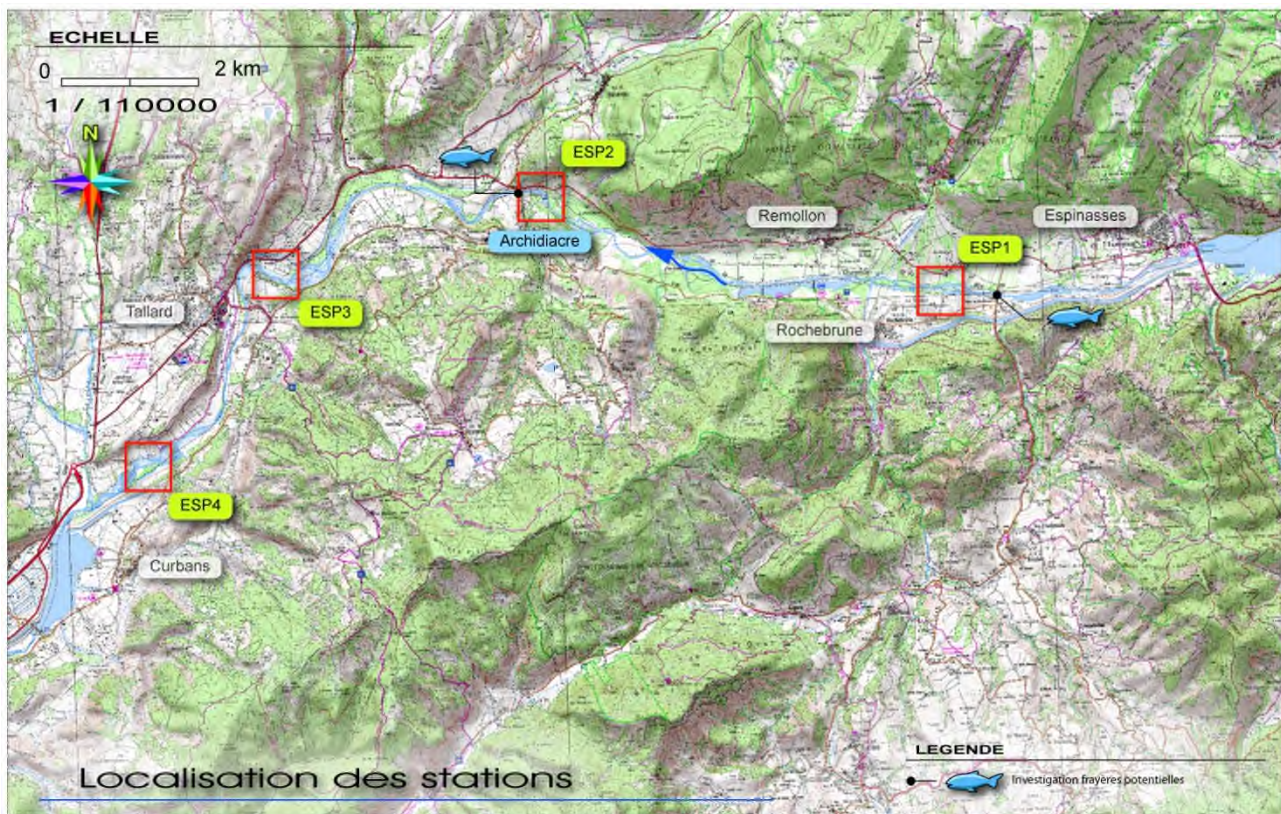
SUIVI DE COLMATAGE DU PULSE D'ESPINASSES 2015

I STATIONS DE MESURE

I.1 LOCALISATION

Quatre stations sont réparties sur le tronçon d'Espinasses (Carte 1). Le positionnement global a été effectué par EDF pour répondre à plusieurs objectifs à savoir, réutiliser autant que possible les stations historiques (que ce soit lors des études précédentes d'EDF ou de l'ONEMA), et assurer une répartition équidistante sur le tronçon.

L'implantation locale a été réalisée en 2014 et est conservée depuis. Elle s'est faite sur une succession lotique permettant la mise en œuvre des investigations.



Carte 1 : Localisation des stations de mesure sur le tronçon d'Espinasses

I.2 DESCRIPTION

Le positionnement des stations est présenté ci-après. L'ensemble des mesures réalisées est inclus entre les bornes affichées.

Station ESP1



Carte 2 : Bornes de la station ESP1 sur fond de photo aérienne. (Source IGN 2009)



Photo 1 : Station ESP1 - Vue amont - Novembre 2015

Station ESP2



Carte 3 : Bornes de la station ESP2 sur fond de photo aérienne. (Source IGN 2009)



Photo 2 : Station ESP2 - Vue aval pendant le pulse- Novembre 2015

Station ESP3



Carte 4 : Bornes de la station ESP3 sur fond de photo aérienne. (Source IGN 2009)



Photo 3: Station ESP3 - Vue aval - Octobre 2015

Station ESP4



Carte 5 : Bornes de la station ESP4 sur fond de photo aérienne. (Source IGN 2009)



Photo 4: Station ESP4 - Vue aval - Octobre 2015

II PROGRAMME

II.1 CONTEXTE HYDROLOGIQUE

La figure ci-dessous résume les déversés 2015 au barrage d'Espinasses (Figure 1).

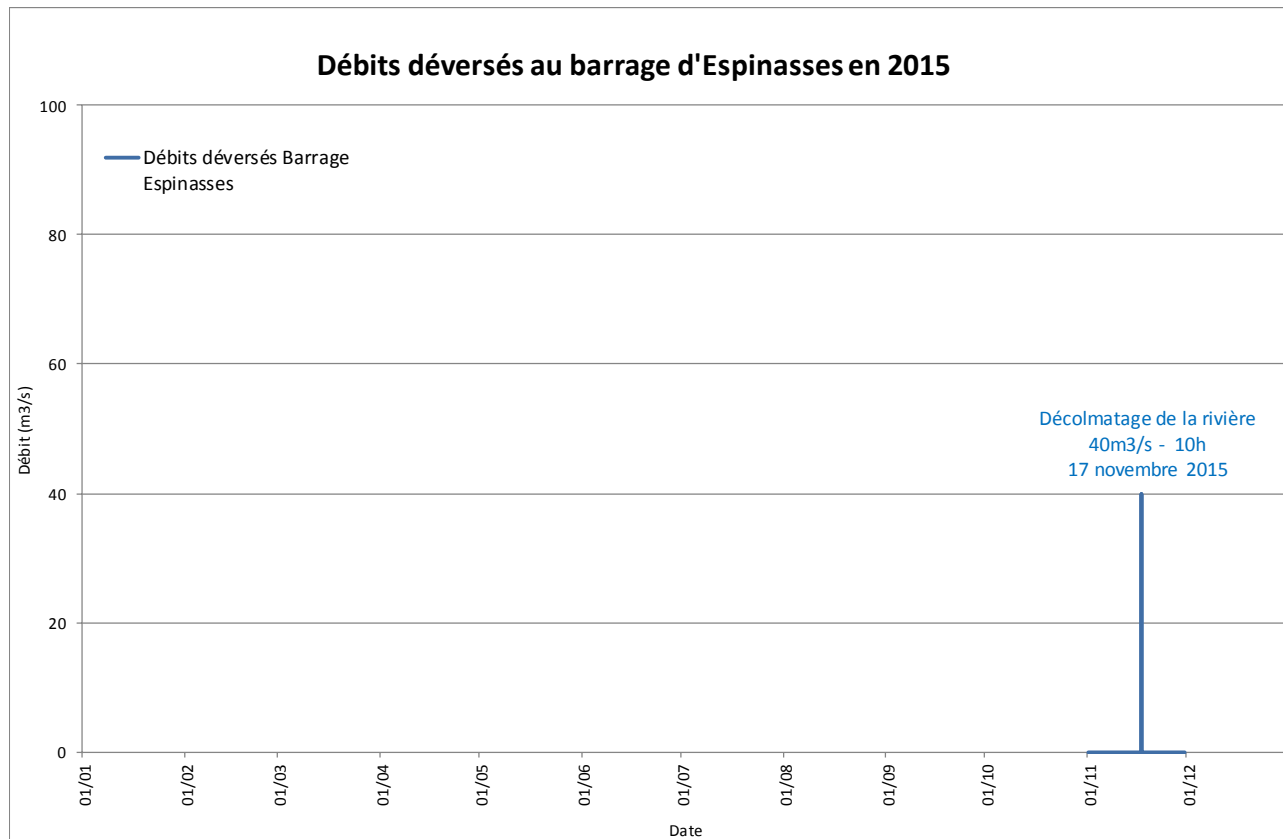


Figure 1 : Déversés 2015 au barrage d'Espinasses – source : (EDF & CIH, 2015)

Le seul déversé annuel est celui du pulse de décolmatage, étudié dans le présent rapport. Cette présentation ne prend pas en compte les apports des affluents dans le tronçon court-circuité et donc les précipitations sur le bassin versant direct de celui-ci. Ils sont traités dans le paragraphe qui suit.

II.2 MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME

Le programme est prévu autour de trois campagnes, deux encadrant le pulse et une pendant. Les figures page suivante résument le programme d'étude initial et la réalisation effective des opérations (Figures 6 à 8).

Le pulse a eu lieu le 17/11/2015, de 7 à 22h.

	Campagne préalable				Suivi du pulse			Campagne post-pulse			
	Colmatage sup.	Colmatage int.	Suivi topo.	Invertébres	Colmatage sup.	Suivi topo.	Suivi p-c	Colmatage sup.	Colmatage int.	Suivi topo.	Invertébres
Esp1											
Esp2											
Esp3											
Esp4											

Figure 2 : Programme prévisionnel et réalisation effective des opérations par station

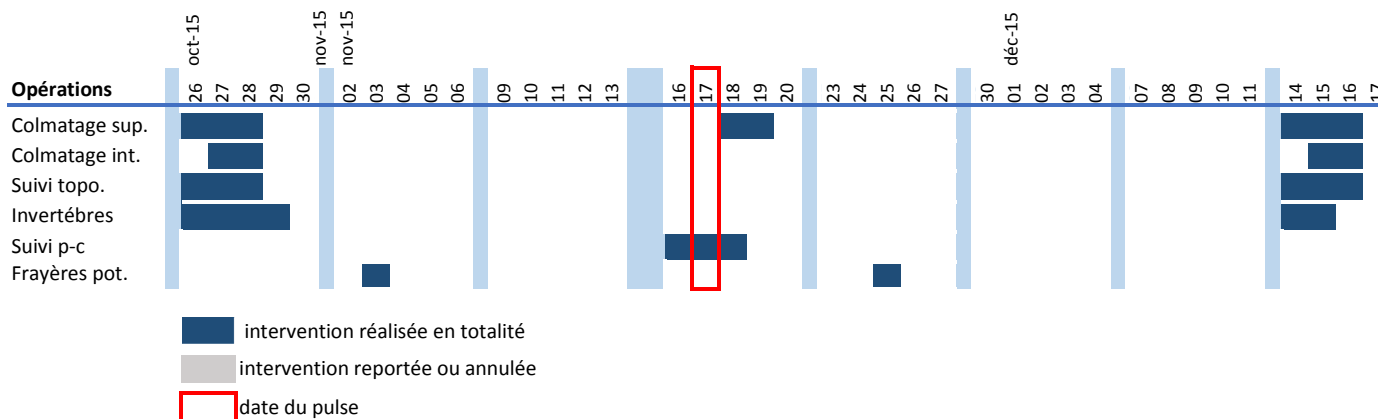


Figure 3 : Planning prévisionnel et réalisation effective des interventions de suivi du pulse d'Espinasses de novembre 2015

Contexte météorologique du pulse d'Espinasses 2015

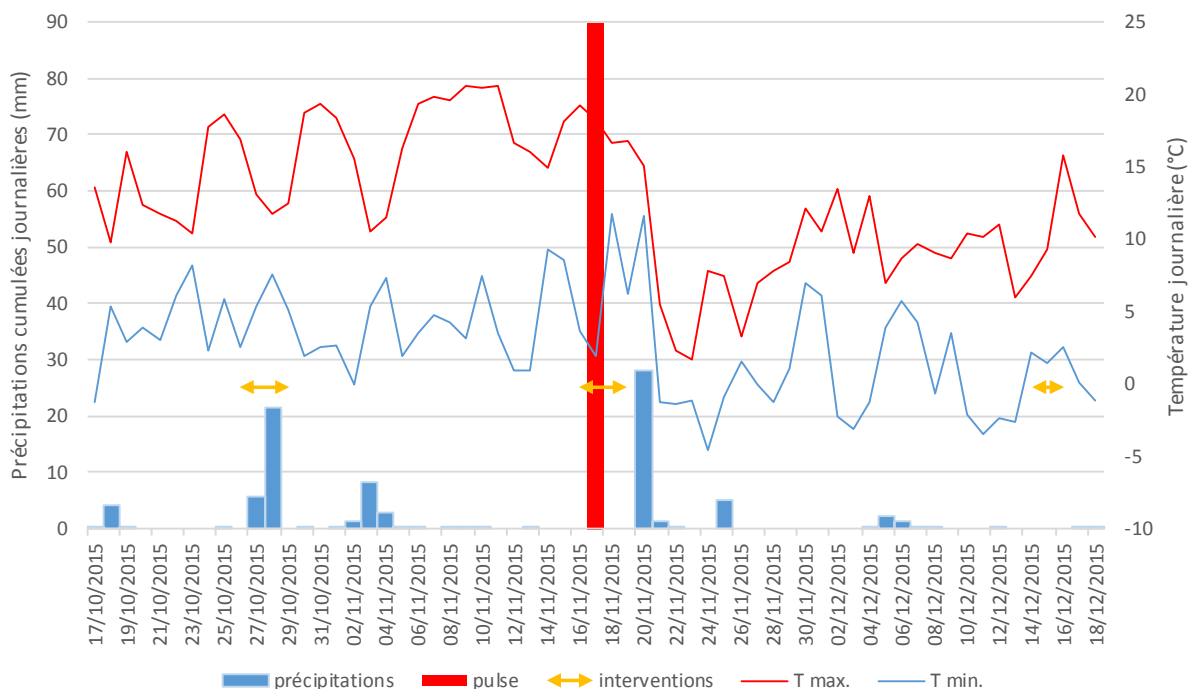


Figure 4 : Conditions météorologiques pendant la période d'étude du pulse d'Espinasses 2015 – Station météorologique de La Beaume - source : (Meteociel, 2016)

Le pulse est intervenu dans un contexte peu humide. Les quelques précipitations intervenues pendant la campagne pré-pulse n'ont pas interférées avec les mesures de terrain.

Toutes les mesures initialement prévues ont pu être réalisées dans de bonnes conditions.

III MATERIEL UTILISE

III.1 LEVES TOPOGRAPHIQUES

Les levés de positions sont effectués à l'aide d'un récepteur GNSS ProMark™ 700 de Spectra Precision (Photo 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce récepteur utilise un système de positionnement GPS avec un mode RTK (Real Time Kinematic) donnant une précision de 1 cm + 1 ppm en horizontal et 2 cm + 1 ppm en vertical.

La correction en temps-réel est assurée grâce à une prestation de « Geodata Diffusion » sur le réseau de correction ORPHEON.



Photo 5 : Réalisation de levés topographiques - 2015



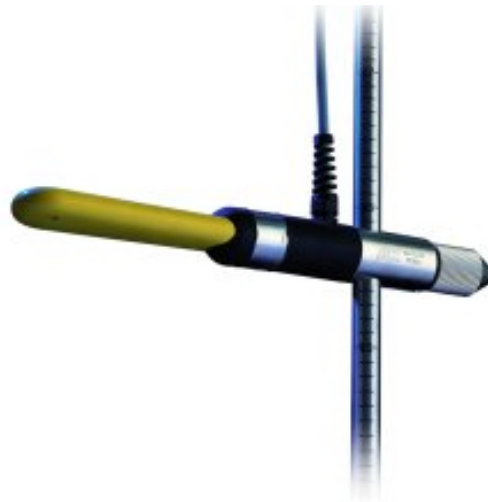
III.2 MESURES DE VITESSES D'ÉCOULEMENT

Les mesures de vitesses sont réalisées à l'aide d'un courantomètre « Nautilus C2000 » de marque OTT (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cet appareil portable travaille selon le principe de mesures par induction magnétique. La vitesse est fournie en cm/s.

Pour la réalisation des mesures de vitesse géo-référencées, le courantomètre est associé au récepteur GNSS ProMark™ 700.



Photo 6 : Mesures de vitesses d'écoulement - 2014



III.3 SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE DES PULSES

III.3.1 MATERIEL ENREGISTREUR

Le suivi physico-chimique des pulses se fait par la pose de sondes enregistreuses autonomes de marque OTT modèle MS5 sur chaque station. Ces sondes sont alimentées sur batteries internes et fonctionnent sans connexion extérieure.

Les sondes utilisées sont équipées des capteurs suivants :

- ✓ Oxygène dissous (sondes LDO)
- ✓ Conductivité
- ✓ Turbidité
- ✓ Hauteur d'eau



La mesure de hauteur d'eau est réalisée sans compensation à l'air. Elle ne prend donc pas en compte les variations de pression atmosphérique. Pour compenser ce point, la sonde est étalonnée à l'air juste avant le déploiement et la dérive est vérifiée à la récupération. Si besoin une correction linéaire est appliquée. Les variations attendues, liées à la pression atmosphérique, sont toutefois faibles étant donné la brièveté de l'opération.

III.3.2 PRELEVEURS AUTOMATIQUES

Des prélèvements sont réalisés pendant le pulse à l'aide de préleveurs automatiques portable de type ISCO 3700 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



Photo 7: ISCO installés en bordure du cours d'eau

Les préleveurs automatiques sont programmables et permettent de réaliser jusqu'à 24 échantillons dans une période choisie.

Pour pallier à une défaillance d'un appareil, un échantillonneur supplémentaire est installé en parallèle.

III.4 COLMATAGE INTERSTITIEL

L'évaluation du colmatage interstitiel est réalisée en mesurant le temps d'infiltration d'un volume d'eau connu dans un mini piézomètre battu dans le substrat (Figure 5).

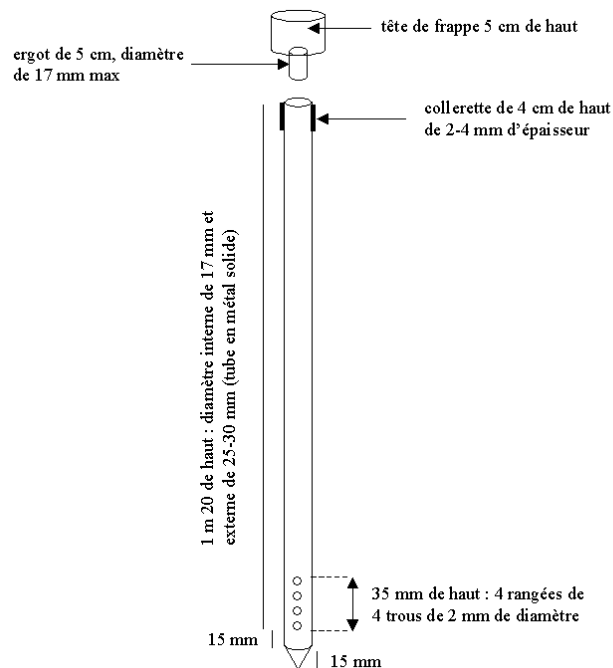


Figure 5 : Dimensions d'un mini-piézomètre d'après le guide méthodologique et scientifique d'évaluation standardisée du colmatage du lit des cours d'eau (Datry, 2011)

Le matériel utilisé est un mini piézomètre en inox, dimensionné sur les bases du guide méthodologique et scientifique d'évaluation standardisée du colmatage du lit des cours d'eau (Datry, 2011). Il est associé à un lot de petits outillages nécessaires pour réaliser l'ensemble des mesures définies dans la méthode : sonde de niveau dans le tube, mètre, entonnoir, bec verseur, etc (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



Photo 8: Mise en œuvre du protocole d'évaluation du colmatage interstitiel « Datry » – Photo gauche : Enfoncement du piézomètre dans le substrat, Photo droite : Infiltration du volume d'eau dans le piézomètre

IV METHODES MISES EN ŒUVRE

IV.1 SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE DU PULSE

IV.1.1 PROGRAMME DU PULSE

Le pulse a été programmé le 17/11/2015 entre 7h et 22h soit une durée totale de 15h. Le débit maximum du pulse est de 40m³/s, les augmentations et les diminutions de débit s'effectuent par paliers.

Les données fournies par EDF dans le cadre de ce suivi ont été mises en forme dans le graphique suivant (Figure 6).

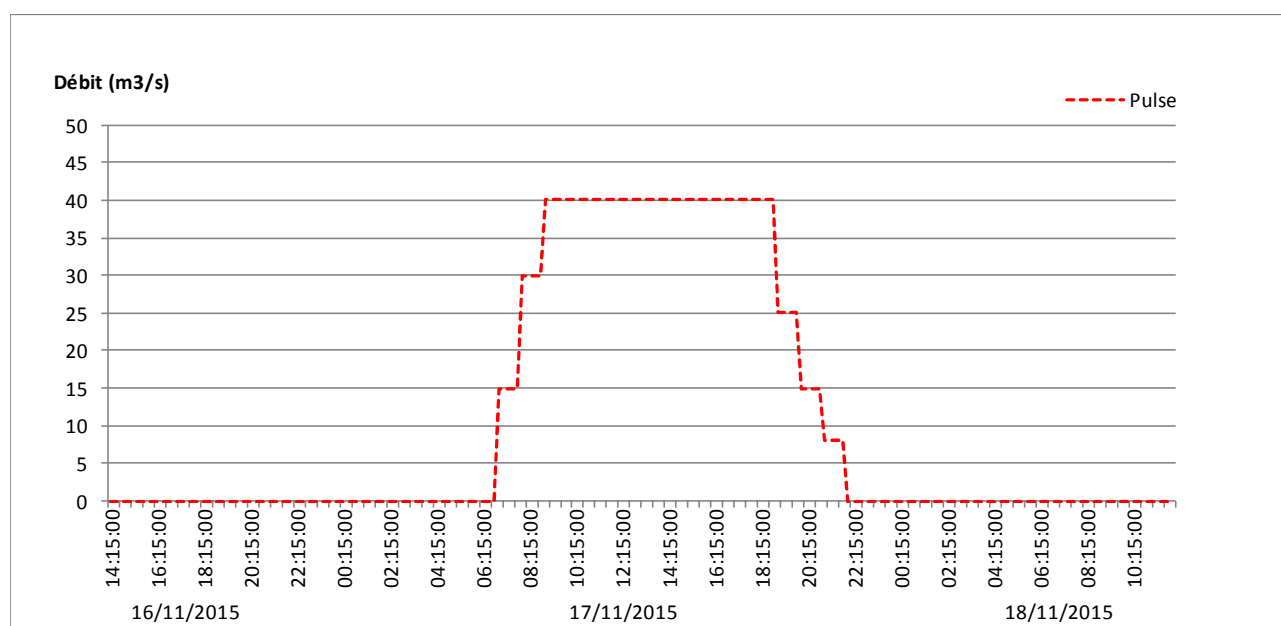


Figure 6 : Projection graphique du programme du pulse du 17/11/2015 sur le barrage d'Espinasses – source : (EDF CIH, 2016)

Le débit maximum de 40 m³/s est atteint en trois heures et est maintenu pendant 10 h. Le retour au débit réservé commence à 18h et est effectué en quatre heures.

IV.1.2 SUIVI EN TEMPS REEL

Le suivi « temps réel » est réalisé par la pose d'une sonde enregistreuse par station, sur une période d'environ 40h encadrant le pulse.

Le tableau ci-dessous résume les données de pose des sondes (Tableau 2).

station	identifiant sonde	faciès	X L93	Y L93	début du suivi	récupération de la sonde	durée du suivi (h)
ESP1	pulse1	radier	953874	6378637	16/11/15 14:00	18/11/15 12:30	46,5
ESP2	pulse2	tête de radier	947803	6379943	16/11/15 15:00	18/11/15 11:45	44,8
ESP3	pulse3	tête de radier	944038	6378775	16/11/15 15:45	18/11/15 11:15	43,5
ESP4	pulse4	tête de radier	942084	6376122	16/11/15 16:45	18/11/15 8:45	40,0

Tableau 2 : Données de pose des sondes enregistreuses

A noter qu'un problème de paramétrage de l'heure (synchronisation) s'est produit sur les sondes pulse1 et pulse2. De ce fait, aucune exploitation des temps de transit ne sera établie dans la suite du rapport sur ces deux stations.



Photo 9 : Dispositif de pose des sondes enregistreuses - La sonde est protégée dans le tube, retenue en amont par un lest et relevée vers l'aval par un pied - L'ensemble est sécurisé par un câble en acier de 3 mm

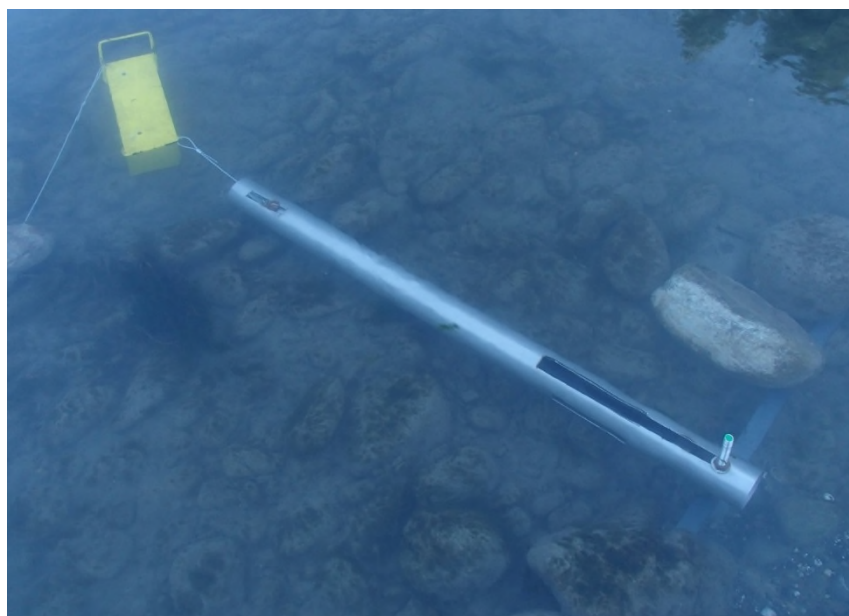


Photo 10 : Dispositif de pose des sondes enregistreuses en place

Pour la Durance, le positionnement des sondes a été retenu pour répondre aux conditions suivantes :

- ✓ Rester au maximum dans le flux de matières en suspension pendant toute la durée du pulse ;
- ✓ Conserver des conditions d'écoulements relativement homogènes ;
- ✓ Eviter les configurations où un gradient vertical de matières en suspension pourrait exister. C'est par exemple le cas des sections de rivière où le profil en travers présente un secteur profond.

Les têtes de radier ont été sélectionnées car l'intégralité de la lame d'eau transite dans des faibles profondeurs et que les conditions d'écoulement restent stables durant tout le pulse. C'est la garantie de « capter » le transport solide transitant.

Lors de la première mise en œuvre de ces mesures sur le pulse de la Saulce, les sondes posées sur le fond du lit avaient été partiellement ensevelies ce qui avait affecté la précision des données. Suite à ce retour

d'expérience, les mesures ont été faites à une hauteur de 25 cm au-dessus du fond (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** & **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

IV.1.3 RECALCUL DES TAUX DE MATIERES EN SUSPENSION

Le taux de matières en suspension dans l'eau est recalculé suite à l'établissement d'une corrélation entre la turbidité lue par les sondes et les analyses de MES faites sur des échantillons prélevés pendant le pulse par les échantillonneurs automatiques.

Deux préleveurs automatiques ont été utilisés pour prélever 40 échantillons d'eau. Les échantillonneurs ont été positionnés sur la station ESP4 (tête de radier).

Les échantillons ont fait l'objet :

- ✓ D'une lecture de la turbidité avec la sonde enregistreuse « pulse4 » ;
- ✓ D'une analyse de MES par le laboratoire CARSO.

La corrélation obtenue est présentée sur le graphique ci-dessous (Figure 7).

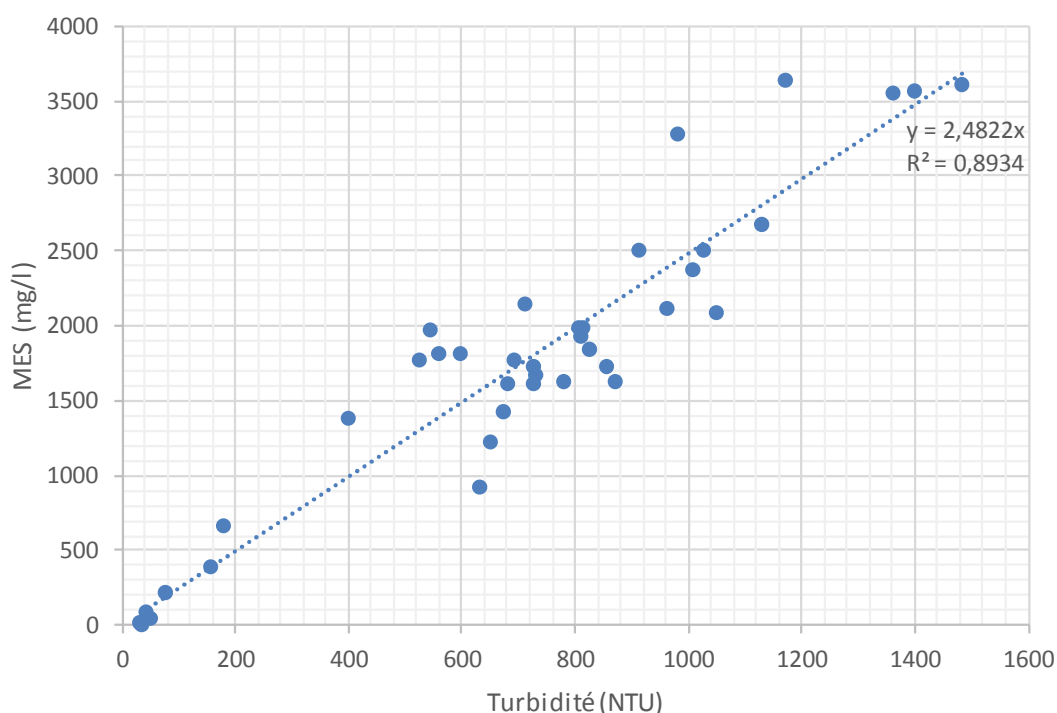


Figure 7 : Corrélation NTU/MES obtenue sur 40 échantillons lors du pulse d'Espinasses 2015

La corrélation entre la turbidité et les matières en suspensions est bonne. Le coefficient de détermination de 0,89 est satisfaisant au vu des objectifs poursuivis.

Cette équation est utilisée dans la suite du rapport pour évaluer le taux de matières en suspensions pendant le pulse.

IV.1.4 CALCUL DU VOLUME EXPORTE PENDANT LE PULSE

En absence de courbe de tarage sur les stations suivies, les données de hauteur d'eau ne peuvent être converties en débit et par conséquent les volumes de MES exportés ne peuvent être précisément calculés. Une estimation peut toutefois être obtenue en considérant que l'augmentation de hauteur d'eau pendant le pulse est un indicateur de transit du volume d'eau pulsé (Figure 8).

Sur cette base, la formule de calcul suivante a été appliquée sur chaque station, à l'ensemble de la période de passage du pulse, avec un pas de 15 mn, correspondant à la fréquence d'enregistrement des sondes.

$$V_{MES} = \sum_{p=15\text{ mn}} T_p \times A_p \times V_t$$

V_{MES} = volume de mes transitant pendant le pulse sur la station n

T_p = taux de matières en suspension pendant la période p

A_p = avancement du pulse, en pourcentage, pendant la période p

V_t = volume total du pulse calculé d'après des données usines. Pour plus de justesse, le volume d'eau transitant par le débit réservé est ajouté.

Avec

$$A_p = \frac{Heau_p}{\sum Heau}$$

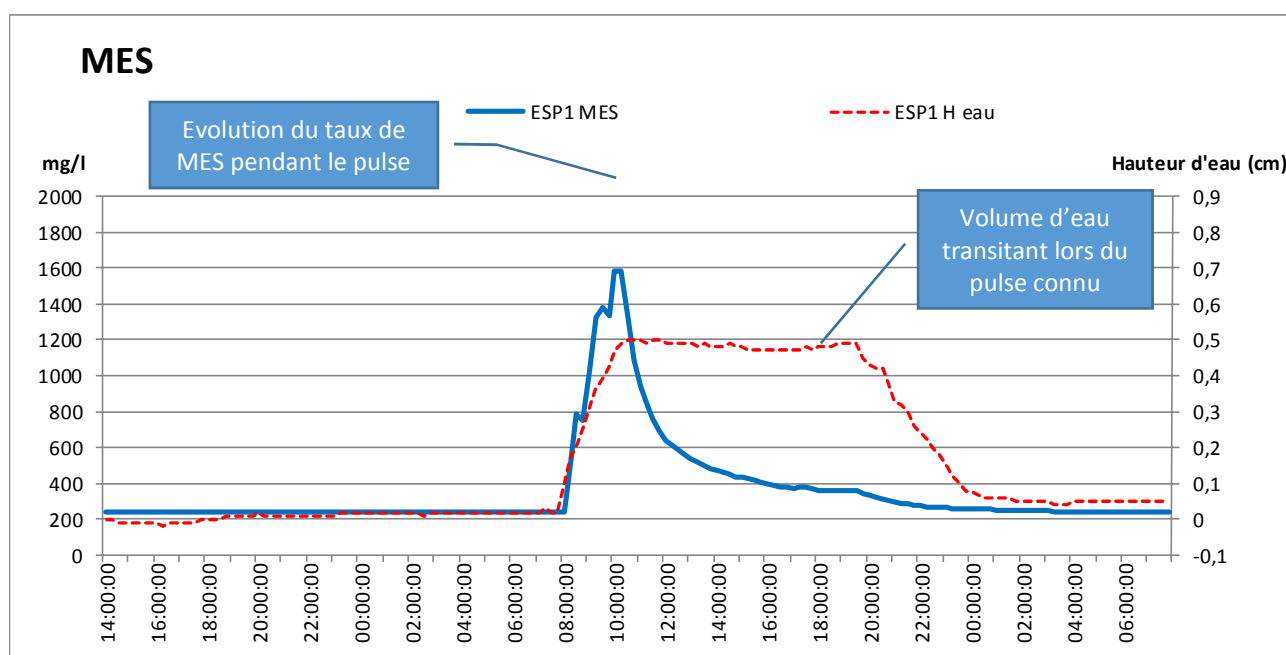


Figure 8 : Illustration des données utilisées pour le calcul du taux de MES transitant pendant le pulse sur une station (ESP1 - 2015)

Le calcul du volume de matières solides transitant au niveau de la station aval permet une approximation du volume évacué par le pulse. Les limites de l'estimation sont les suivantes :

- ✓ L'extrapolation de la relation hauteur/débit est linéaire ce qui tend à augmenter la contribution des faibles valeurs de hauteur d'eau. Celles-ci sont toutefois limitées aux phases de début et de fin du pulse.
- ✓ Une proportion de MES est encore évacuée par le débit réservé après l'arrêt du pulse, tant que la turbidité de l'eau ne revient pas à la normale ce qui prend plusieurs jours et dépasse le cadre du présent suivi. Pour uniformiser les estimations, le calcul est réalisé à partir de la première montée d'eau jusqu'au retour à la cote normale.

Néanmoins ces réserves sont marginales et on peut considérer que les valeurs calculées sont des ordres de grandeurs réalistes, qui peuvent être comparés entre les sites et ce, de façon interannuelle.

IV.2 SUIVI DE LA GRANULOMETRIE ET DU COLMATAGE

Un point de définition des différents termes utilisés dans le rapport est rappelé ci-dessous.

Le colmatage correspond au phénomène de dépôt et d'infiltration de sédiments fins de nature organique ou minéral dans les habitats aquatiques.

On distingue deux niveaux de colmatage :

Le colmatage superficiel : Il se définit comme le dépôt et le recouvrement des alluvions grossières par des particules fines de diverses natures uniformisant temporairement les fonds. Ces sédiments se déposent principalement dans les zones où la capacité de transport est réduite (Datry, 2011).

L'estimation du colmatage superficiel a été réalisé au travers deux protocoles complémentaires :

- ✓ L'estimation du « colmatage » des substrats selon le protocole développé par l'IRSTEA (Archambaud et al., 2005, in Braud 2013). La notion de « colmatage » prend en compte dans ce cas prioritairement l'enchâssement des éléments grossiers, bien que la notion de dépôt de limons soit prise en compte avec la densité de nuages de fines. Ce protocole sera donc appelé indifféremment « colmatage Archambaud » ou « enchâssement » dans la suite de ce rapport.
- ✓ L'observation visuelle du dépôt de limons (quantification du dépôt de fines) qui s'appuie sur une grille mise en œuvre par la DREAL Lorraine dans le cadre guide d'application du protocole RCS (GA T90-733, 2012). Ce protocole est appliqué pour la première fois de façon expérimentale dans ce suivi de pulse. Il concorde mieux avec la notion de colmatage superficiel tel qu'évoqué par Datry. Il sera également désigné « colmatage superficiel » dans cette étude.

Le colmatage hyporhéique ou interstitiel : Il correspond au dépôt et à l'infiltration de sédiments fins dans la matrice sédimentaire du lit. Il y a dans ce cas, pénétrations des sédiments en profondeur, dans la zone hyporhéique. Cela concerne uniquement les particules de taille inférieure à 0,06 mm (Gayraud et al., 2001).

L'évaluation du colmatage interstitiel a été réalisé par la mesure de la conductivité hydraulique, selon le protocole « DATRY ».

IV.2.1 SUIVI DE LA GRANULOMETRIE ET DU COLMATAGE SUPERFICIEL

- **Stratégie des relevés**

Le suivi de l'évolution de la granulométrie et de l'enchâssement est réalisé en effectuant lors de chaque campagne, des mesures sur une trentaine de placettes par stations, réparties sur 5 à 6 faciès différents.

Une station de mesure est ici définie comme une séquence lotique encadrée ou non par des séquences lentiques. 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 pisciaires identifiées sont rhéophiles et fréquentent prioritairement ces zones.

Une succession classique des faciès, tels que pris en compte ici, est présentée ci-dessous (Figure 9). Elle comprend généralement tout ou partie de la succession de faciès suivant (d'amont vers l'aval) :

- ✓ plat courant
- ✓ tête de radier
- ✓ radier
- ✓ rapide
- ✓ chenal lotique

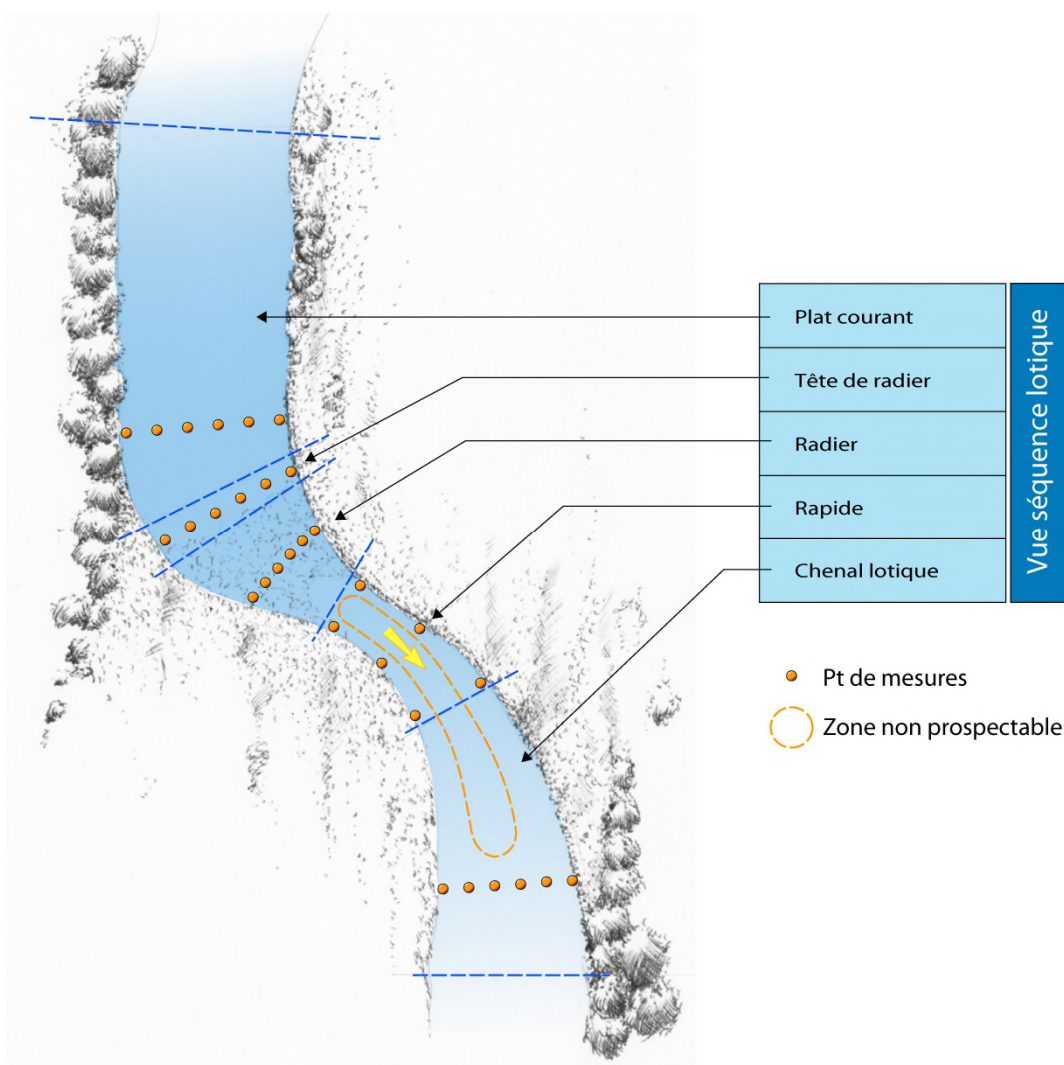


Figure 9 : Stratégie de relevé de la granulométrie et du colmatage sur une station

Au sein de chaque faciès, les points de mesure (généralement au nombre de 5 ou 6) sont répartis sur un transect. Si le faciès n'est pas prospectable sur toute sa largeur ou que sa morphologie ne permet pas de réaliser un transect, les points de mesures sont répartis sur les secteurs accessibles.

Les relevés sont réalisés trois fois :

- ✓ Lors **d'une première campagne**, quelques jours (voire semaines) avant la date du pulse, pour évaluer les conditions initiales ;
- ✓ Lors **d'une seconde campagne**, la plus proche possible du pulse (quelques jours) pour évaluer l'effet immédiat du pulse sur la granulométrie, le colmatage et le dépôt de fines ;
- ✓ Lors **d'une troisième campagne**, environ un mois après le pulse, pour évaluer la durabilité des effets.

Lors de la première campagne, les bornes de la station sont précisément positionnées et le protocole est mis en œuvre.

Pour les campagnes suivantes, les mesures sont réalisées exactement aux mêmes endroits par implantation des points au GPS haute précision.

- **Relevés granulométriques**

Le relevé de la granulométrie des placettes est réalisé par la méthode de Malavoi et Souchon (1989) permettant de classer visuellement les substrats observés par un code de six caractères.

- ✓ Deux caractères pour l'élément le plus grossier (à rapprocher du D90 ou du D84 utilisés en hydraulique),
- ✓ Deux caractères pour l'élément dominant (proche du D50 s'il n'y a qu'un seul dominant),
- ✓ Si besoin deux caractères pour le second élément dominant (s'il représente au moins 30% de la surface de la placette).

Les codes utilisés sont rappelés dans le Tableau 3.

La détermination de la taille des particules est effectuée sur le terrain avec une échelle visuelle.

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
dalle	>1024	D
rocher	>1024	R
bloc	256-1024	B
pierre grossière	128-256	PG
pierre fine	64-128	PF
cailloux grossier	32-64	CG
cailloux fin	16-32	CF
gravier grossier	8-16	GG
gravier fin	2-8	GF
sable grossier	0,5-2	SG
sable fin	0,0625-0,5	SF
limons	0,0039-0,0625	L
argile	<0,0039	A

Tableau 3 : Echelle granulométrique de Wentworth (1922) modifiée par Malavoi et Souchon (1989)

- **Evaluation de l'enchâssement**

L'Irstea d'Aix-en-Provence (Archambaud et al., 2005) a développé une méthode d'évaluation visuelle sommaire mais reproductible du colmatage de surface et du niveau d'enchâssement des éléments grossiers du substrat.

Elle consiste à soulever un de ces éléments et à estimer sa facilité d'extraction ainsi que la densité du nuage de fines qui est libéré lors de cette extraction.

Cinq classes ont été définies selon ces deux critères. Ces classes sont illustrées dans la Figure 10.

Pour plus de lisibilité, les codes couleurs suivants sont adoptés dans la suite du rapport.

	classe 1 - absence de colmatage
	classe 2 - peu colmaté
	classe 3 - colmatage moyen
	classe 4 - colmatage important
	classe 5 - colmatage très important

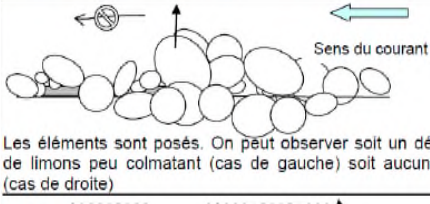
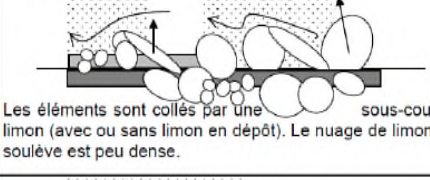
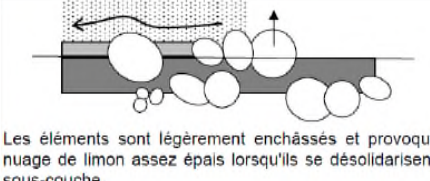
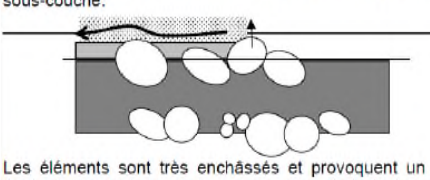
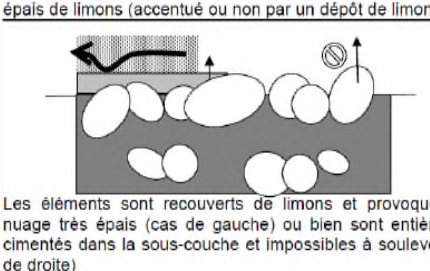
Code	Classes de Colmatage	Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on soulève un élément du fond)
1	] 0 - 25%]	 Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite)
2	] 25 - 50%]	 Les éléments sont collés par une sous-couche de limon (avec ou sans limon en dépôt). Le nuage de limon qui se soulève est peu dense.
3	] 50 - 75%]	 Les éléments sont légèrement enchâssés et provoquent un nuage de limon assez épais lorsqu'ils se désolidarisent de la sous-couche.
4	] 75 - 90%]	 Les éléments sont très enchâssés et provoquent un nuage épais de limons (accentué ou non par un dépôt de limons)
5	] 90-100%]	 Les éléments sont recouverts de limons et provoquent un nuage très épais (cas de gauche) ou bien sont entièrement cimentés dans la sous-couche et impossibles à soulever (cas de droite)

Figure 10 : Méthode d'évaluation du degré de colmatage et d'enchâssement des matériaux du substrat alluvial (Archambaud et al., 2005 in Braud)

• Evaluation du dépôt de particules fines

L'observation visuelle du dépôt de particules fines s'appuie sur une grille mise en œuvre par la DREAL Lorraine dans le cadre guide d'application du protocole RCS (GA T90-733, 2012). Cette évaluation est mise en œuvre pour la première fois de façon expérimentale dans ce suivi de pulse.

Dans ce protocole, seule la pellicule superficielle de fine est estimée, l'enchâssement des substrats n'est pas pris en compte. Six classes de colmatage sont présentées (Figure 12).

L'évaluation de la classe de dépôt de limons nécessite de pouvoir visualiser très nettement le substrat et leurs interstice. Cela est rendu possible par l'utilisation d'un bathyscope long (66 cm) qui offre dans la plupart des cas une observation parfaite du substrat jusqu'à une profondeur d'environ 80 cm. Lorsque la qualité d'observation n'est pas suffisante pour réaliser une évaluation de bonne qualité, la mesure n'est pas réalisée.

Une grille colorimétrique d'évaluation du niveau de dépôt de limon est proposée dans la Figure 12.

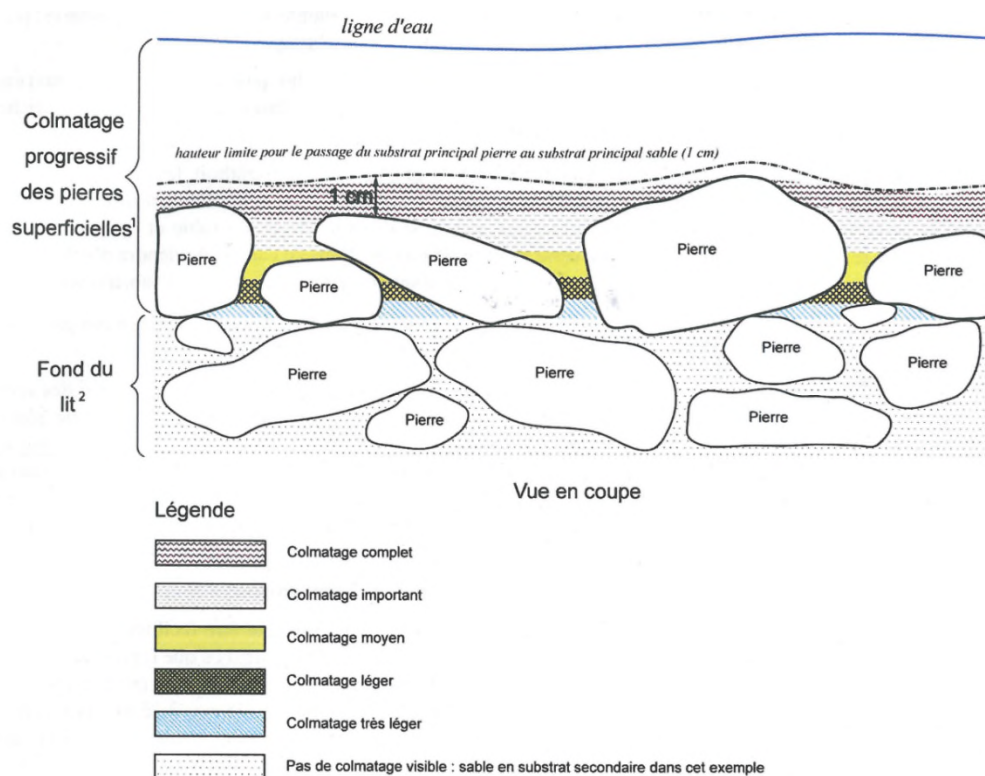


Figure 11 : Estimation visuelle du dépôt de particules fines (GA T90-733, 2012)

Intensité	Libellé	Explications
0	Pas de colmatage	Aucun colmatage (dépôt) visible
1	Colmatage très léger	Colmatage peu présent et peu perturbant. Très fine pellicule de limons
2	Colmatage léger	Présence faible (fine pellicule) mais régulière
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.

Figure 12 : Grille d'évaluation du dépôt de limons (Adaptée par SAGE Environnement)

- **Relevés de terrain**

Pour chaque point de mesure les paramètres suivants sont relevés :

- ✓ Numéro de transect
- ✓ Faciès
- ✓ Coordonnés (X, Y, Z)
- ✓ Hauteur d'eau
- ✓ Substrat le plus gros, enchâssement (1 à 5)
- ✓ Substrat dominant, enchâssement (1 à 5)
- ✓ Substrat secondaire (+ 30%), enchâssement (1 à 5)
- ✓ Abondance du périphyton (1 à 3),
- ✓ Présence d'un dépôt de limons (0 à 5).

- **Discussion sur l'incertitude de mesure**

Lors des campagnes 2 et 3, les points de la campagne 1 ont été chargés sur le GPS haute définition et réimplantés sur place. Chaque mesure a ainsi pu être réalisée exactement sur la même placette à chaque fois.

Pour limiter l'incertitude liée aux différences d'appréciation de la granulométrie et du colmatage, chaque mesure a fait l'objet d'un relevé contradictoire sur la base du relevé précédent.

Concrètement chaque fiche de terrain était pré-remplie dans sa partie gauche avec :

- L'identifiant du point précédent
- Les résultats du relevé précédent

La partie droite restait à remplir avec les résultats observés lors de la campagne en cours.

Il était ainsi possible d'apprécier sur le terrain et pour chaque point l'évolution de la granulométrie et du colmatage. Chaque mesure a ainsi été validée dans son contexte (modification d'écoulement ou non) et chaque changement de granulométrie et de colmatage validé par les deux opérateurs sur le terrain. Pour des raisons de fonctionnalité, au moins un des deux opérateurs d'une campagne avait réalisé la campagne précédente mais ce second point ne nous semble pas structurant pour la reproductibilité des résultats du fait de ces précautions méthodologiques ; la condition nécessaire est que les opérateurs soient expérimentés pour ce type de mesures.

L'incertitude résiduelle de l'évaluation peut, en revanche, résider dans la difficulté à visualiser les substrats car la Durance est un cours d'eau fréquemment trouble et la planification des pulses peut ne pas offrir la possibilité de programmer les mesures dans des conditions optimales de visibilité.

Pour conserver la traçabilité des conditions de mises en œuvre des mesures, la transparence de l'eau est évaluée lors de chaque campagne, sur chaque station, et est indiquée dans les tables de données.

Au-dessus de cette profondeur, les relevés ont été réalisés à vue et présentent une fiabilité optimale.

En dessous, l'évaluation est réalisée « au touché » ce qui induit nécessairement une précision moins importante. En cas de doute, ces points peuvent être ignorés dans l'exploitation des données mais cela n'a pas été le cas car l'évaluation « au touché » n'a pas induit de doutes sur la nature des résultats du suivi.

Concernant la mise en œuvre du protocole d'évaluation du dépôt de limons, celui-ci est fortement dépendant la visibilité et de la transparence de l'eau. Dès lors, aucune évaluation du colmatage superficiel sur la base de ce protocole n'a été réalisée lorsque les conditions de visibilité du substrat n'étaient pas satisfaisantes.

IV.2.2 SUIVI DU COLMATAGE INTERSTITIEL

Le protocole de suivi du colmatage interstitiel est celui décrit par l'ONEMA et l'IRSTEA dans la publication de Datry de janvier 2011.

« Il s'agit d'évaluer le colmatage interstitiel du substrat des cours d'eau [...]. S'entend ici par colmatage le dépôt et l'infiltration de sédiments fins dans la matrice sédimentaire du lit. Les conséquences écologiques de ce colmatage sont nombreuses : réduction des échanges d'eau, de nutriments et d'invertébrés entre la surface et le milieu interstitiel, réduction et homogénéisation de l'habitat disponible pour les invertébrés de surface et interstitiels dans les sédiments affectant ainsi les rôles de refuge et de nurserie joués par le milieu interstitiel, modification des conditions biogéochimiques du milieu interstitiel avec réduction de l'oxygénation des sédiments notamment, etc.. »

Le protocole étant décrit en totalité dans la publication citée, il ne sera repris ici que les choix spécifiques à la présente étude.

- **Définition de la station**

La station de mesure du colmatage interstitiel a été positionnée pour recouper a minima la station de suivi du colmatage superficiel. En particulier, il est vérifié que chaque station comprend au moins une succession des « faciès types » définis ci-avant.

La méthodologie prévoit une longueur de station de l'ordre de 14 fois la largeur plein bord ou 20 fois la largeur de lit mouillé. Sur un grand milieu, tel que la Durance, ces prescriptions sont rarement réalistes notamment sur les tronçons en aval de Sisteron où la largeur plein bord atteint 300 m de large et la largeur du lit mouillé jusqu'à 150 m. Dans ce contexte, une station devrait mesurer entre 3 et 4 km ce qui pose plusieurs difficultés :

- ✓ Elle inclut dans ce cas une proportion importante de linéaires non prospectable (hauteur / vitesse dans les fosses) ;
- ✓ La distance entre deux points est tellement importante (> 250 m) qu'il est difficile de considérer que les faciès présents sur ce linéaire soient réellement décrits. Pour correctement décrire des stations de cette longueur, il serait nécessaire d'augmenter également très sensiblement le nombre de points de mesures.

Le choix retenu est donc de suivre les longueurs théoriques de station préconisées dans la méthode chaque fois que cela était possible et de retenir un linéaire adapté, proche de celui des stations des autres protocoles de mesures le cas échéant.

- **Plan d'échantillonnage**

Comme convenu dans la méthode, 20 points de mesures sont effectués sur 15 transects.

Le plan de répartition est tiré aléatoirement parmi les grilles fournies (Tableau 4). Lorsqu'un point n'était pas réalisable pour des raisons d'accessibilité du milieu (hauteur d'eau, vitesse) celui-ci a été reporté sur un secteur accessible du même transect ou sur un autre transect.

Station	Campagne	Longueur station (m)	Largeur station retenue (m)	Distance inter-transects (m)	Grille aleatoire	Remarques
ESP1	1	500	adaptée	33 (50)	B	Ecart inter-transect augmenté à 50 m à partir du T11 afin de prendre en compte une zone potentielle d'exfiltration
ESP3	1	750	Lpb	50	D	
ESP1	3	500	adaptée	33 (50)	B	
ESP3	3	750	Lpb	50	D	

Tableau 4 : Caractéristiques de l'échantillonnage du protocole de mesure du colmatage interstitiel pour le pulse d'Espinasses (2015)

- **Traitement des données**

Les mesures réalisées permettent de calculer la conductivité hydraulique en utilisant la formule simplifiée de Baxter et. Al (2003, in DATRY 2011).

$$K = \frac{0.2501 * D_{piezo}}{DT} * \ln\left(\frac{H_0}{H}\right)$$

Avec :

D_{piezo} : diamètre en cm du piézomètre

DT : temps d'infiltration en secondes

H_0 : le niveau d'eau dans le tube avant infiltration (hauteur d'air plus hauteur d'eau dans l'entonnoir)

H : le niveau d'eau dans le piézomètre avant infiltration (hauteur d'air)

Le manque de référence et de données antérieures à ce jour ne permet pas de déduire le degré de colmatage d'une station à partir de la valeur de conductivité hydraulique (THIVIN, 2012). En revanche les résultats obtenus peuvent être exploités relativement.

Thivin (2012), propose une grille d'évaluation basée sur le nombre de points présentant une infiltration selon la grille suivante (Figure 13) :

Proportion de points présentant une infiltration ($K > 0$)			
Classe 1	proportion ≤ 0.2		Très colmaté
Classe 2	$0.2 < \text{proportion} \leq 0.4$		Moyennement colmaté
Classe 3	$0.4 < \text{proportion} \leq 0.7$		Peu colmaté
Classe 4	proportion > 0.7		Non colmaté

Figure 13 : Grille d'évaluation du niveau de colmatage proposée par Thivin, 2012.

Cette grille est issue de campagnes effectuées par l'ONEMA entre 2010 et 2011 sur une centaine de stations.

IV.3 SUIVI TOPOGRAPHIQUE DES STATIONS

Deux transects topographiques par cheminement sont réalisés sur chaque station et sont repris lors de chaque campagne de mesure du colmatage superficiel. Ces transects ont pour vocation de suivre, pendant le pulse et à l'échelle de plusieurs années, les événements hydro-morphologiques susceptibles d'influencer les autres mesures réalisées.

Ces transects sont pris dans la mesure du possible sur la totalité de la bande active, perpendiculairement au lit plein bord, sans tenir compte des écoulements puisque ceux-ci sont fluctuants.

Les mesures sont réalisées au GPS haute précision, avec une précision standard centimétrique. Néanmoins, la précision peut être affectée par le couvert végétal et la présence de falaises à proximité de la station. Toutes les mesures dont la précision excède 10 cm sont éliminées du traitement et ne sont pas prises en compte.

Les résultats sont présentés sous formes de profils en travers.

IV.4 SUIVI DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES

Les prélèvements ont été réalisés selon le protocole dit « IBGN-DCE », utilisé dans le cadre des réseaux nationaux de contrôle et de surveillance (RCS/RCO). SAGE Environnement est accrédité COFRAC pour les analyses biologiques (accréditation 1-1635, portée disponible sur www.cofrac.fr) et dispose également de l'agrément correspondant, émanant du ministère en charge de l'environnement.

IV.4.1 PRINCIPE DU PROTOCOLE

Ce protocole de prélèvement a été élaboré pour répondre aux exigences de la Directive Cadre Européenne (2000/60/CE) et pour remplacer l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN – NF T 90-350), non DCE compatible car ne permettant pas de mesurer l'écart entre le peuplement observé et le peuplement de référence. Dans l'attente de ce nouvel indice et pour assurer la transition, un IBGN DCE compatible (norme XP T90-333 de septembre 2009) a été mis en place. Les trois principaux objectifs de ce nouveau protocole RCS sont :

- ✓ Fournir une image représentative du peuplement d'invertébrés d'une station mais en échantillonnant et séparant la faune des habitats dominants et marginaux,
- ✓ Permettre le développement et la mise en œuvre d'un nouvel indice multi-métrique d'évaluation de l'état écologique à partir des invertébrés non disponibles actuellement,
- ✓ Permettre néanmoins le calcul, avec une marge d'incertitude acceptable, d'un équivalent IBGN cela afin d'assurer la transition jusqu'à l'adoption du nouvel indice.

Après une reconnaissance de la station et de la mosaïque d'habitat, un plan d'échantillonnage divisé en trois phases est établi.

- ✓ La phase A, composée de 4 prélèvements parmi les habitats marginaux les plus biogènes représente l'échantillonnage marginal,
- ✓ L'échantillonnage représentatif de la mosaïque d'habitats repose sur un échantillonnage des habitats dominants basé sur huit prélèvements unitaires (phases B et C).

Dans le cas présent, le traitement de chaque flacon est individualisé afin de pouvoir associer chaque détermination à un substrat donné.

IV.4.2 EFFORTS DE DETERMINATION

L'effort de détermination standard dans le cadre du protocole IBGN-DCE est la plupart du temps au genre, sauf certains groupes où une détermination à niveau inférieur est attendue. Dans le cadre de la présente étude, des déterminations plus poussées, souvent à l'espèce, ont été mise en œuvre afin de permettre une meilleure valorisation des données récoltées. Les objectifs poursuivis ainsi que les précautions prises pour assurer un travail robuste sont présentés ci-après.

IV.4.2.a Détermination et stades de développement

Nous attirons l'attention sur un point déterminant concernant la qualité du travail de détermination : un niveau de détermination sans risque d'erreur doit être défini en fonction du stade de développement des individus collectés et de leur état de conservation.

L'expérience montre que l'évolution morphologique des macroinvertébrés au cours de leur développement impose de ne déterminer au niveau le plus précis que les individus suffisamment matures, seul stade à faire

l'objet de descriptions complètes dans la littérature. Pour le cas particulier des déterminations au niveau spécifique, s'ajoute le problème de l'absence de description de certaines espèces au stade larvaire. Les deux citations suivantes tirées d'ouvrages de référence illustrent ce propos :

« Les caractères présentés ne sont bien visibles que chez des larves de derniers stades [...] Lorsqu'on considère des stades juvéniles, de nombreux caractères ne sont pas encore apparus » Tachet et al. 2010.

« The atlas is still handicapped by the fact that many larvae remain unknown and that it is valid only for ultimate instars » Waringer & Graff 2011.

Les niveaux présentés ci-après n'ont donc été appliqués qu'aux individus répondant à ces exigences.

IV.4.2.b Niveaux taxinomiques retenus

Les niveaux de détermination retenus ont été définis dans l'optique d'utiliser les traits biologiques, physiologiques et écologiques (TBPE) codifiés dans Tachet et al. 2010. à l'exception des éphéméroptères, plécoptères et trichoptères (EPT) pour lesquels la détermination a été effectuée à l'espèce pour un traitement plus poussé de ces groupes à forte valeur bio-indicatrice.

Le Tableau 5 synthétise le niveau retenu pour l'ensemble des groupes hormis l'ordre des diptères qui fait l'objet du Tableau 6.

Le groupe des diptères présente des niveaux de détermination variés liés aux difficultés de détermination propres à cet ordre. On notera que la famille des Chironomidae n'a pas été déterminée au niveau maximum de l'ouvrage cité précédemment. Ce choix est motivé par les risques d'erreur liés à la détermination à un niveau plus précis à l'aide d'une loupe binoculaire et à l'effort inadapté au présent travail que demanderait la réalisation de montages microscopiques.

Groupe taxinomique	niveau retenu
Porifera	genre
Coelenterata	genre
Bryozoa	genre
Turbellaria	genre
Nemertea	genre
Nematoda	famille
Nematomorpha	famille
Oligochaeta	ordre
Hirudinea	genre
Gastropoda	genre
Bivalvia	genre
Crustacea	genre
Ephemeroptera	espèce
Plecoptera	espèce
Odonata	genre
Heteroptera	genre
Planipennia	genre
Megaloptera	genre
Lepidoptera	genre
Hymenoptera	genre
Coleoptera	genre
Trichoptera	espèce

Tableau 5 : Niveaux taxinomiques retenus dans la présente étude (sauf diptères)

Famille	niveau retenu
ATHERICIDAE	Genre
BLEPHARICERIDAE	Genre
CERATOPOGONIDAE	Sous-famille
CHAOBORIDAE	Genre
CHIRONOMIDAE	Famille
CULICIDAE	Sous-famille
CYLINDROTOMIDAE	Genre
DIXIDAE	Genre
DOLICHOPODIDAE	Famille
EMPIDIDAE	Sous-famille
EPHYDRIDAE	Famille
LIMONIIDAE	Tribu
MUSCIDAE	Famille
PSYCHODIDAE	Famille
PTYCHOPTERIDAE	Famille
RHAGIONIDAE	Genre
SCIOMYZIDAE	Famille
SIMULIIDAE	Tribu
STRATIOMYIIDAE	Famille
SYRPHIDAE	Famille
TABANIDAE	Famille
THAUMALEIDAE	Famille
TIPULIDAE	Famille

Tableau 6 : Niveaux taxinomiques retenus pour les diptères

IV.4.2.c Détermination spécifique des EPT (Ephémères, Plécoptères, Trichoptères)

i Référentiel taxinomique

Le référentiel taxinomique utilisé pour cette étude est celui publié par le groupe Opie benthos (<http://www.opie-benthos.fr/opie/insecte.php>). Ce référentiel alimentera prochainement le référentiel national Taxref conçu à partir de la base de données *fauna europea* obsolète à ce jour.

ii Niveau de détermination

Le Tableau 7 détaille le niveau de détermination atteint pour les genres d'EPT collectés sur la Durance durant les années 2014 et 2015. Il présente les limites actuelles imposées par les lacunes de connaissances de la faune française : descriptions larvaires en partie erronées, espèces non décrites, hybridations non documentées et les limites propres au secteur considéré et aux périodes d'échantillonnage.

Famille	Genre	niveau courant de détermination	remarque générale	remarque propre à l'étude
EPHEMERIDAE	<i>Ephemera</i>	espèce		
POLYMITARCYIDAE	<i>Ephoron</i>	espèce		
POTAMANTHIDAE	<i>Potamanthus</i>	espèce		
OLIGONEURIIDAE	<i>Oligoneuriella</i>	espèce		
HEPTAGENIIDAE	<i>Rhithrogena</i>	espèce	incertitudes taxinomiques sur certaines espèces rares	
HEPTAGENIIDAE	<i>Ecdyonurus</i>	espèce/genre	hybridations possibles, descriptions lacunaires, nouvelles espèces à décrire	niveau typologique propice aux hybridations, présence soupçonnée d'espèces aux descriptions erronées ou lacunaires (<i>E. macani</i> , <i>E. ruffii</i> , <i>E. venosus</i> Gr., <i>E. insignis</i>)
HEPTAGENIIDAE	<i>Heptagenia</i>	espèce		
HEPTAGENIIDAE	<i>Electrogena</i>	espèce		
CAENIDAE	<i>Caenis</i>	espèce/genre	hybridation possible	individus hybrides <i>C. luctuosa/macrura</i>
BAETIDAE	<i>Baetis</i>	espèce/genre	hybridation possible <i>B. fuscatus/scambus</i>	
BAETIDAE	<i>Acentrella</i>	espèce		
BAETIDAE	<i>Centropilum</i>	espèce		
BAETIDAE	<i>Procladius</i>	espèce		
BAETIDAE	<i>Cloeon</i>	espèce		
EPHEMERELLIDAE	<i>Serratella</i>	espèce		
EPHEMERELLIDAE	<i>Torleya</i>	espèce		
LEPTOPHLEBIIDAE	<i>Paraleptophlebia</i>	espèce		
LEPTOPHLEBIIDAE	<i>Habrophlebia</i>	espèce	descriptions lacunaires	
LEPTOPHLEBIIDAE	<i>Habroleptoides</i>	espèce		
LEPTOPHLEBIIDAE	<i>Choroterpes</i>	espèce		
TAENIOPTERYGIDAE	<i>Taeniopteryx</i>	espèce		
TAENIOPTERYGIDAE	<i>Brachyptera</i>	espèce		
NEMOURIDAE	<i>Amphinemura</i>	espèce		
NEMOURIDAE	<i>Protonemura</i>	espèce/genre	descriptions lacunaires	manque de matériel mûre
NEMOURIDAE	<i>Nemoura</i>	espèce/genre	descriptions lacunaires	manque de matériel mûre
NEMOURIDAE	<i>Nemurella</i>	espèce		
LEUCTRIDAE	<i>Leuctra</i>	genre/espèce	descriptions très lacunaires, seulement quelques espèces déterminables	détermination possible de <i>L. geniculata</i> , <i>L. major</i>
CAPNIIDAE	<i>Capnia</i>	genre	genre en cours de redéfinition, nouvelles espèces à décrire	
CHLOROPERLIDAE	<i>Chloroperla</i>	espèce		
PERLODIDAE	<i>Besdolus</i>	espèce		
PERLODIDAE	<i>Isoperla</i>	espèce/genre	niveau de détermination variable selon les individus	
PERLODIDAE	<i>Perlodes</i>	espèce/genre	niveau de détermination variable selon les individus	
PERLIDAE	<i>Perla</i>	espèce/genre	niveau de détermination variable selon les individus	
PERLIDAE	<i>Dinocras</i>	espèce/genre	niveau de détermination variable selon les individus	
RHYACOPHILIDAE	<i>Rhyacophila</i>	sous-groupes	descriptions lacunaires	nymphes déterminables à l'espèce
GLOSSOSOMATIDAE	<i>Agapetus</i>	espèce		
HYDROPTILIDAE	<i>Hydroptila</i>	genre	descriptions lacunaires	nombreuses nymphes déterminables à l'espèce
HYDROPSYCHIDAE	<i>Hydropsyche</i>	espèce/genre	niveau de détermination variable selon les individus, nécessité d'une quantité de matériel importante	nymphes déterminables à l'espèce
PHILOPOTAMIDAE	<i>Chimarra</i>	espèce		
POLYCENTROPODIDAE	<i>Polycentropus</i>	espèce/genre	descriptions lacunaires	
PSYCHOMYIIDAE	<i>Psychomyia</i>	espèce		
LEPTOCERIDAE	<i>Mystacides</i>	espèce		
LEPTOCERIDAE	<i>Ceraclea</i>	espèce	descriptions lacunaires	
LEPTOCERIDAE	<i>Athripsodes</i>	espèce/genre	descriptions lacunaires	
LEPTOCERIDAE	<i>Setodes</i>	espèce	descriptions lacunaires	
ODONTOCERIDAE	<i>Odontocerum</i>	espèce		

Tableau 7 : Niveau de détermination atteint pour les genres d'EPT collectés sur la Durance durant l'année 2015

IV.4.3 MISE EN ŒUVRE DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE SUIVI.

Les stations ont été positionnées sur les mêmes sites de mesures que pour les autres protocoles. En complément des relevés classiques inhérents à la méthode, les relevés suivants ont été réalisés sur chaque placette de prélèvement :

- ✓ Le positionnement au GPS haute précision,
- ✓ La vitesse de fond, mesurée au courantomètre à une profondeur de 0,2 fois la hauteur d'eau,
- ✓ Pour les substrats minéraux, la granulométrie et le colmatage, selon les mêmes modalités que décrites précédemment.

Le protocole de prélèvement est établi lors de la première campagne de mesure. Au cours de la campagne post-pulse (campagne retour), le positionnement des placettes est si possible repris sauf si les conditions mésologiques qui ont conduit au choix initial de l'emplacement ont changées. Dans ce cas, des conditions mésologiques similaires sont recherchées à proximité.

IV.4.4 RESULTATS OBTENUS

Les résultats sont génériquement exprimés sous la forme de trois listes faunistiques avec des niveaux de détermination variables selon les taxons et fournies dans les rapports d'essais. On obtient donc une liste par bocal dont les différentes combinaisons permettent :

- ✓ D'obtenir une liste « équivalent IBGN » en regroupant A et B, pouvant être comparée à la grille d'interprétation des résultats fixant les limites des classes d'état mentionnées dans l'annexe 3 de l'arrêté du 25 janvier 2010 pour l'hydro-écorégion correspondante,
- ✓ D'obtenir une liste pour les habitats dominants en regroupant B et C,
- ✓ D'obtenir une liste pour les habitats marginaux avec A,
- ✓ Et d'avoir une liste globale en sommant A, B et C.

L'IBGN calculé peut être comparé à la grille d'interprétation des résultats fixant les limites des classes d'état mentionnées dans l'annexe 3 de l'arrêté du 25 janvier 2010 pour l'hydro-écorégion correspondante.

La Durance relève du type CEMAGREF TG6-7/2 (hydroécorégion 6 – Méditerranée - Très Grand cours d'eau/hexogène de l'hydroécorégion 2 - Alpes internes ou 7 – Préalpes du Sud). Les limites de classes d'état pour les très grands cours d'eau ne sont pas définies, en l'absence de référence. A titre informatif, nous avons appliqué les limites de classes d'état des Grands cours d'eau, qui elles sont définies sur cette hydroécorégion, soit G6-7/2.

Cette grille d'interprétation figure ci-dessous. Invertébrés – Equivalent IBGN – Recalculé sur la base des phases A et B Hydroécorégion Méditerranée – Grands cours d'eau		
Classe d'état		Equivalent IBGN
Très bon		supérieur ou égal à 16
Bon		compris entre 13 et 15
Moyen		compris entre 9 et 12
Médiocre		compris entre 6 et 8
Mauvais		inférieur à 6

Tableau 8 : Limites des classes d'état selon l'arrêté du 25 janvier 2010 pour l'indice biologique suivi

IV.5 SUIVI DU NIVEAU DE COLMATAGE ET D'ENCHASSEMENT DU SUBSTRAT SUR LES FRAYÈRES POTENTIELLES

Pour compléter le diagnostic, une étude spécifique du colmatage et de l'enchâssement du substrat sur les frayères de truites fario a été mise en œuvre.

Les deux secteurs concernés sont les deux sites les plus connus de reproduction sur le tronçon d'Espinasse : le secteur de Rochebrune et celui de l'Archidiacre. Le dénombrement des frayères effectives est réalisé en parallèle dans le cadre de l'étude piscicole pluriannuelle de la Durance (SAGE Environnement, 2015).

La méthodologie mise en œuvre consiste à évaluer lors de deux campagnes, encadrant le pulse :

- les surfaces favorables à la reproduction,
- leur niveau d'enchâssement et de colmatage par les limons.

En complément des mesures de granulométries, vitesse d'écoulement, et hauteur d'eau ont été réalisées. Ces données ne sont pas exploitées dans le présent rapport.

✓ Surfaces favorables à la reproduction (SFR).

Les SFR sont évaluées sur la base du référentiel RefMADI, (2013). Ce référentiel prend en compte les surfaces de substrat dont la granulométrie est favorable à la reproduction de la truite fario (principalement graviers, galets), sans prendre en compte les conditions d'écoulement.

Sur chacun des deux sites d'étude, ces surfaces ont été cartographiées au GPS haute précision, ce qui a permis de les quantifier.

✓ Colmatage des SFR

Le colmatage des surfaces favorables à la reproduction a été évalué sur des placettes de 1m², puis synthétisé à l'échelle des unités de SFR (Cf. Figure 14). Il était prévu initialement de comparer chaque placette avant et après pulse mais cette approche s'est révélée peu pertinente car la géométrie de la plupart des d'unités a été modifiée ce qui a conduit à la sortie des placettes des SFR (Cf. Planche photographique 1). Au final les placettes ont été utilisées pour qualifier le niveau de colmatage moyen des unités de SFR.



Planche photographique 1: Rehaussement des fonds suite au pulse 2015 sur le secteur de Rochebrune (SFR : Roch 4)
 – Le quadra orange a la même position sur la photo de gauche (pré-pulse) que celle de droite (post pulse) soulignant le rehaussement des fonds

Le croquis ci-dessous résume la stratégie d'observation qui a été mise en œuvre (Figure 14).

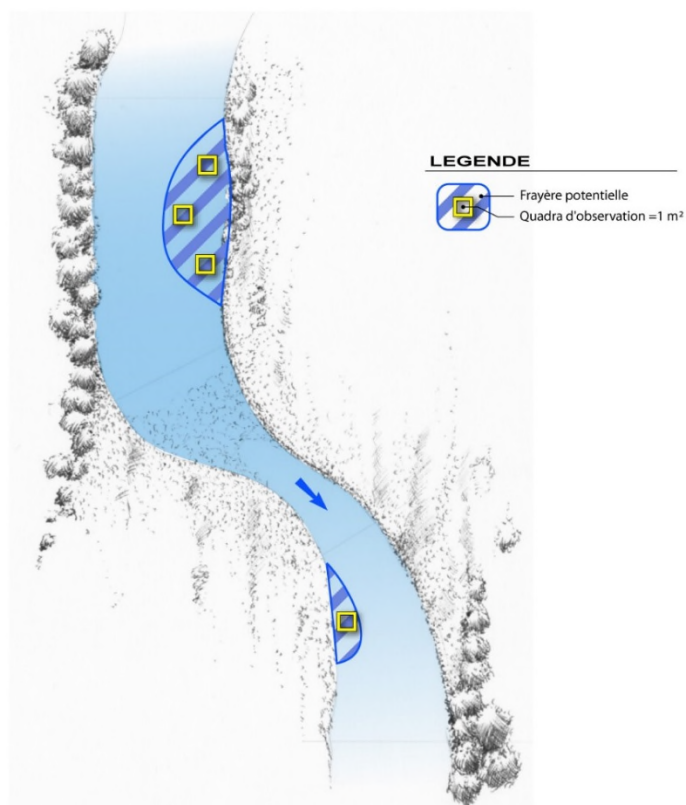


Figure 14 : Stratégie d'observation mise en œuvre dans le cadre du suivi des frayères potentielles

✓ Exploitation des résultats

Les résultats obtenus peuvent être exploités en termes :

- d'évolution des surfaces et des localisations des SFR avant et après pulses,
- de qualité des celles-ci, évaluée sur le base du niveau de colmatage.

V RESULTATS

V.1 SUIVI PHYSICO-CHIMIQUE DU PULSE

V.1.1 EFFET DU PULSE SUR LA HAUTEUR D'EAU

La morphologie du pulse sur les quatre stations a été enregistrée par les quatre sondes enregistreuses. Le résultat est présenté ci-dessous (Figure 15) :

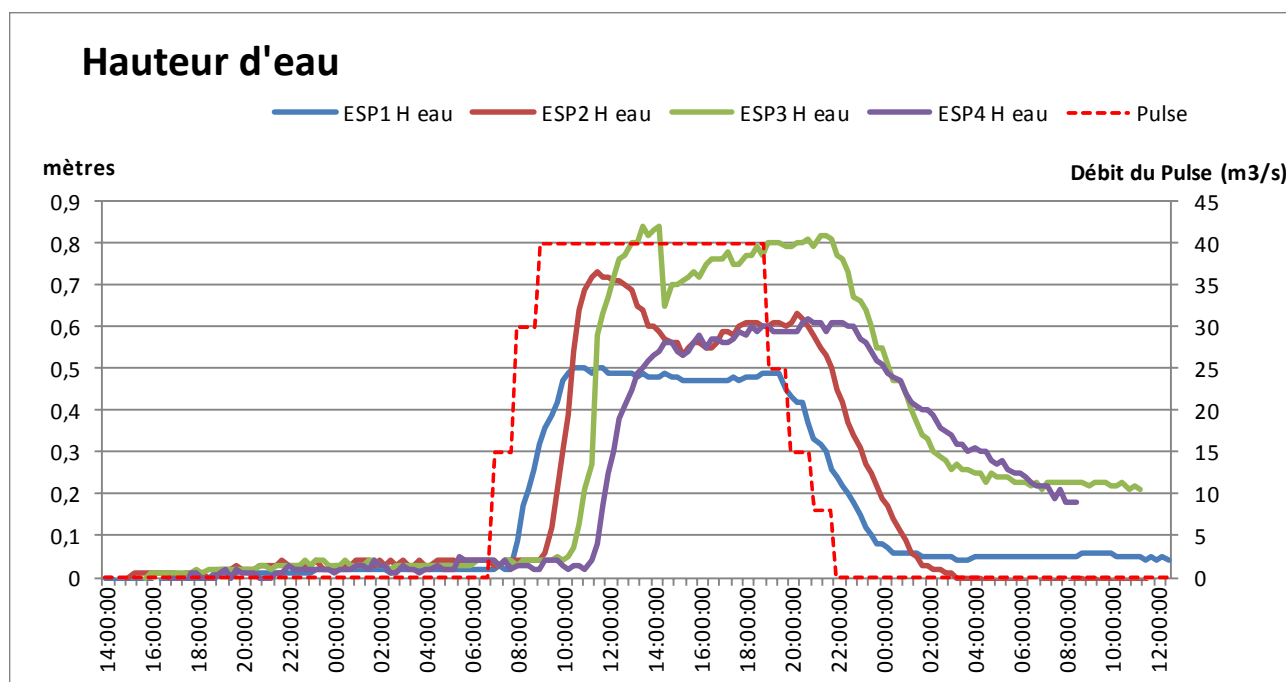


Figure 15: Evolution des hauteurs d'eau sur les différentes stations au passage du pulse d'Espinasses en 2015 ; le pulse en m3/s a été surimposé

Les commentaires suivants peuvent être émis :

- Les hauteurs d'eau atteintes par le pulse varient entre 50 et 84 cm selon la station. Un pic est observé au début du pulse sur les stations ESP2 et ESP3. Il correspond très probablement à un déplacement des sondes ou à une modification des écoulements sous l'effet du pulse.
- La baisse des hauteurs d'eau est plus lente et incomplète sur les deux stations les plus aval. Ce phénomène pourrait être lié à un laminage du lâché d'eau lors du parcours du tronçon mais aucun laminage n'était observé en 2014 et il est peu probable que la morphologie du tronçon court-circuité ait significativement évolué en un an. Une évolution locale des écoulements pourrait aussi expliquer ce phénomène qui ne serait dans ce cas qu'un artéfact. Ce point reste en suspens.

Les temps de transit entre les sites ne peuvent être précisément évalués en 2015 et raison d'un problème de désynchronisation des sondes. Toutefois les résultats obtenus lors du pulse 2014, sont supposés être peu variables, les modalités du pulse hydraulique étant identiques.

V.1.2 EFFET DU PULSE SUR LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les paramètres physico-chimiques suivis pendant le pulse sont les suivants : température, hauteur d'eau et l'oxygène dissous.

V.1.2.a Température

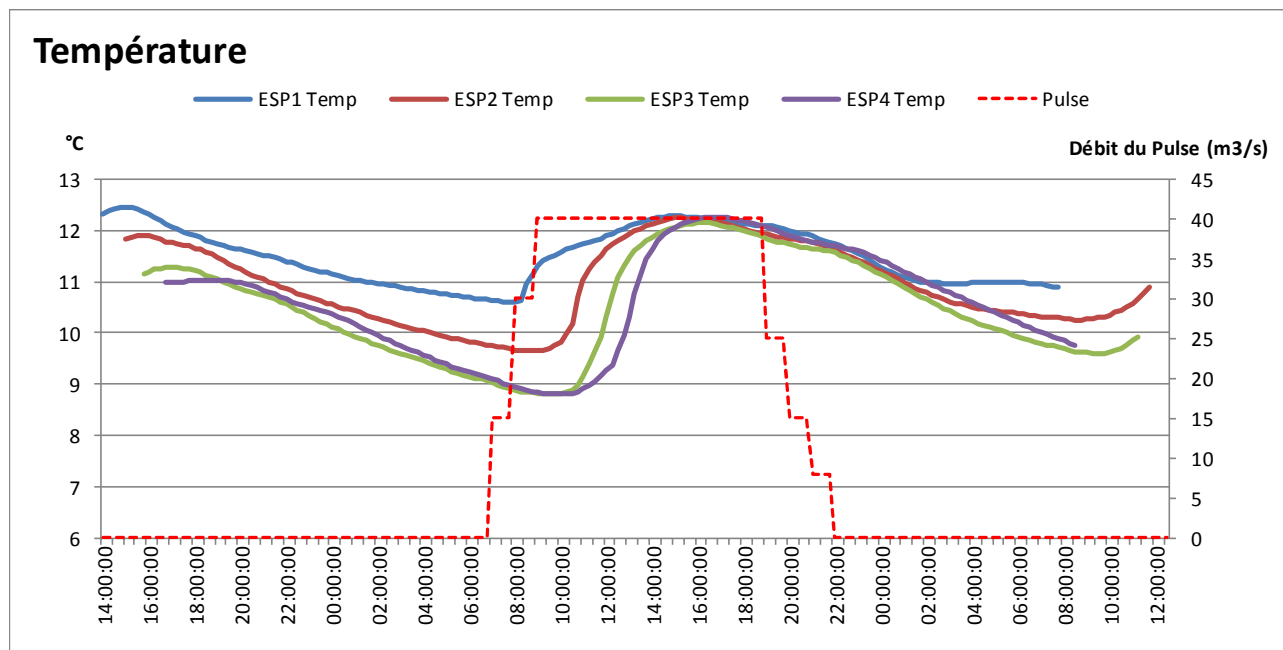


Figure 16: Evolution de la température de l'eau sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé

Avant le pulse, les courbes de températures montrent un refroidissement vers l'aval sous l'effet du cycle nyctéméral (Figure 16).

Pendant le pulse la température de l'eau délivrée est sensiblement plus chaude, jusqu'à 3,5°C sur la station ESP4. Cette amplitude est moins marquée sur l'amont.

Après le pulse, les températures chutent sur toutes les stations, pour revenir approximativement aux mêmes valeurs.

L'eau délivrée en amont du tronçon court-circuité d'Espinasses (vraisemblablement entre 12 et 13°C) semble plus chaude que ne le serait de l'eau en équilibre thermique avec l'air. La présence du barrage de Serre-Ponçon en amont en est à l'origine. Vers l'aval, on approche de cet équilibre avant le pulse et l'eau est plus froide (8,9°C).

Le pulse délivre rapidement de l'eau entre 12 et 13°C ce qui réchauffe l'ensemble des stations. L'amplitude thermique observée est toutefois de même ordre de grandeur que l'amplitude nyctémérale observée sur la demi-journée précédente.

V.1.2.b Conductivité

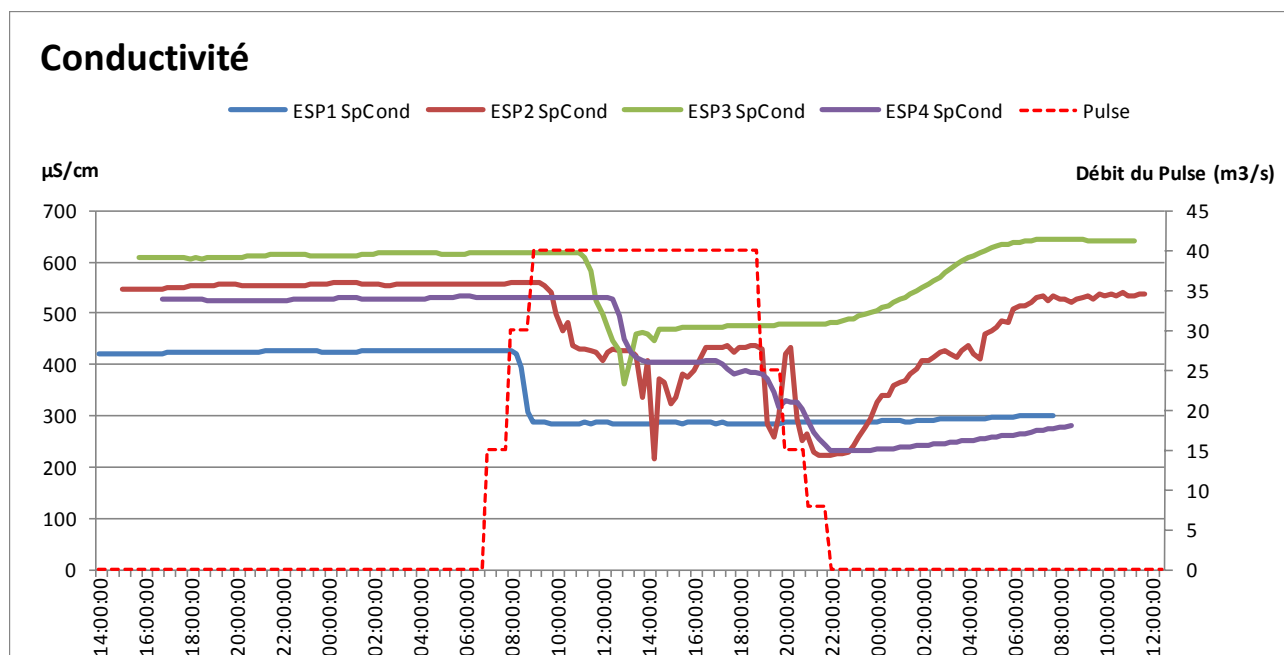


Figure 17 : Evolution de la conductivité de l'eau sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m^3/s a été surimposé

Avant le pulse, l'eau délivrée par le barrage d'Espinasses a une conductivité proche de 420 $\mu\text{S/cm}$ (Figure 17). Ce paramètre est modifié et fluctue d'une station à une autre sous l'effet des apports intermédiaires. La conductivité atteint d'ailleurs 610 $\mu\text{S/cm}$ au niveau de la station ESP3.

Lors du pulse, la conductivité de l'eau est modifiée sur toutes les stations. Pour autant, l'effet des apports intermédiaires reste visible. Les plus fortes baisses enregistrées concernent les stations ESP2 et ESP4.

Après le pulse Les stations ESP1 et ESP4 ne reviennent pas à la conductivité de départ sans que nous ayons d'éléments particuliers d'explications. La grande sensibilité des sondes de conductivité au colmatage induit de nombreux artéfacts. La baisse irréversible de la conductivité sur la station ESP1 en est vraisemblablement un puisque ce phénomène n'était pas observé en 2014.

Le pulse d'Espinasses induit une baisse de conductivité de l'eau sur l'ensemble des stations du tronçon. Un doute est toutefois présent sur la baisse observée au niveau de la station 1 puisque en 2014, la conductivité était inchangée. Néanmoins, cette fluctuation reste faible, de l'ordre de 100 $\mu\text{S/cm}$.

V.1.2.c Oxygène dissous

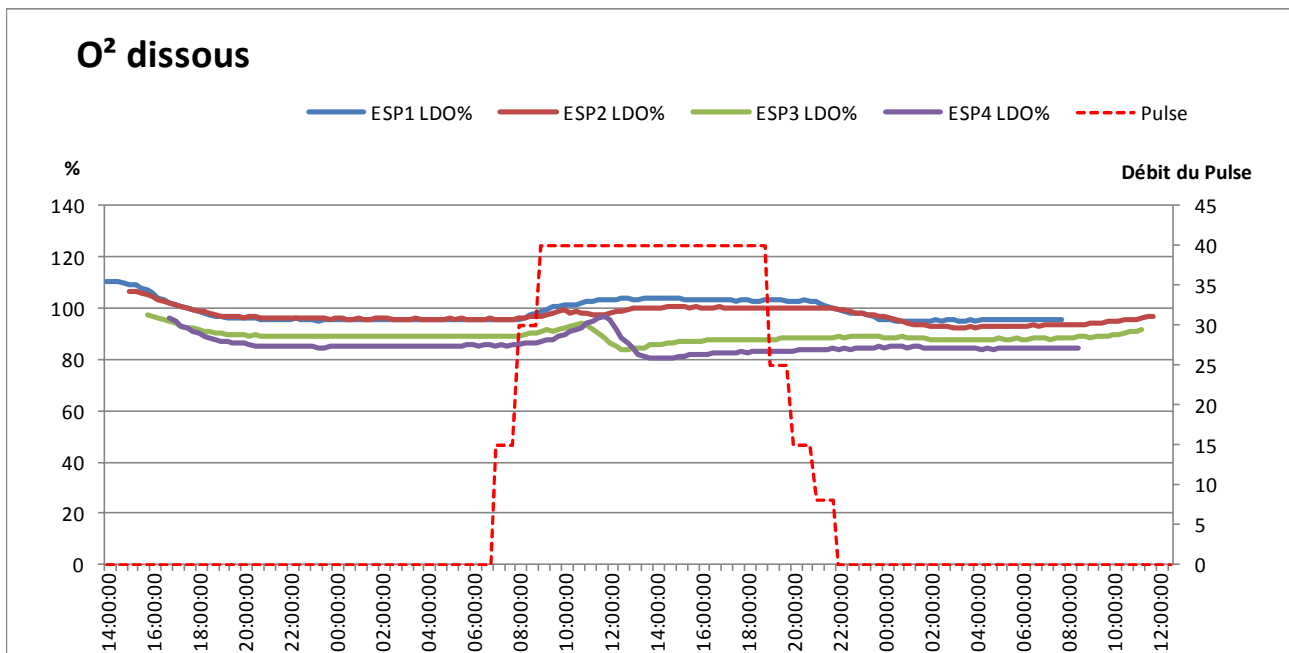


Figure 18: Evolution de la saturation de l'eau en oxygène sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé

L'oxygène dissous présente des valeurs proches de la saturation sur toutes les stations (Figure 18). Les deux premières stations du tronçon semblent réagir différemment que les deux suivantes (augmentation du taux d'oxygène sur une longue période avant retour à la normale).

La remise en suspension de sédiments pendant le pulse n'induit pas de mécanismes tropholytiques (consommateurs de matières organiques) suffisamment rapides pour perturber ce paramètre.

V.1.3 EFFET DU PULSE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

V.1.3.a Taux de MES sur les stations

L'application de la courbe de corrélation turbidité/matières en suspensions (MES) aux résultats du suivi de la turbidité (Cf. Méthodologie) permet d'obtenir les courbes d'évolutions des matières en suspensions sur les différentes stations (Figure 19).

L'objet du pulse étant le décolmatage du tronçon court-circuité, ce transport solide peut être considéré comme un indicateur pertinent et objectif d'efficacité de l'opération.

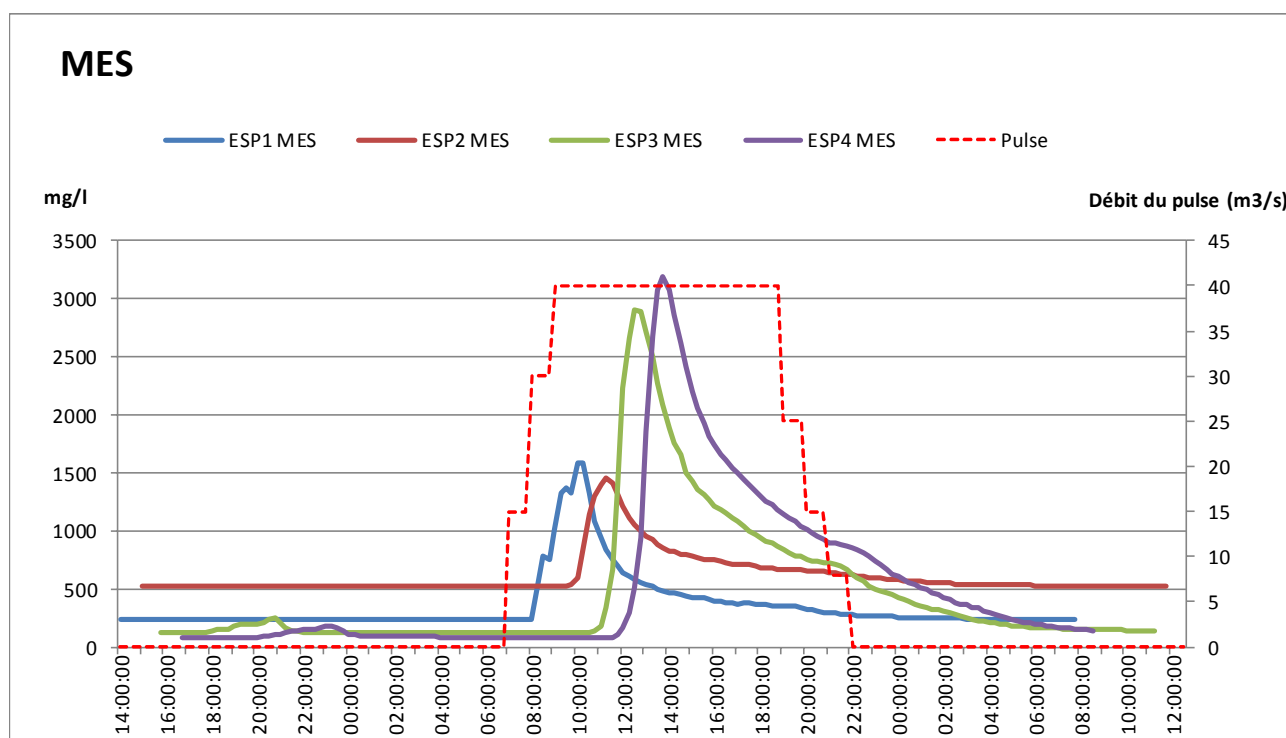


Figure 19 : Evolution du taux de matières en suspension sur les différentes stations au passage du pulse ; le pulse en m3/s a été surimposé

Le pulse génère des pics de turbidité variant entre 1460 à 3190 mg/l de matières en suspension, selon les stations, pendant une très brève période (2 heures) alors que le débit maximum du pulse a lui été maintenu pendant 10 heures (Figure 19).

Ces valeurs sont beaucoup plus fortes qu'en 2014 puisque le niveau maximum atteint n'était que de 2000 mg/l en ESP4, et entre 800 et 1000 mg/l sur les trois autres stations.

Globalement le pic de matières en suspensions présente des valeurs plus importantes sur les deux stations aval ce qui met en évidence un mécanisme d'érosion progressif des particules fines le long du tronçon court-circuité d'Espinasses. Il y a une différence très importante sur le tronçon ESP2 → ESP3 puisque le taux de MES est doublé par rapport à la station précédente ce qui témoigne d'un mécanisme amplifié sur ce tronçon.

A noter qu'un problème de paramétrage (calibrage pour les faibles valeurs) de la sonde ESP2 conduit à un plus fort taux de base des MES (500 mg/l sur cette station alors qu'il ne dépasse pas 100 mg/l sur les autres). Cet artéfact ne remet pas en cause la valeur du pic de MES, puisque le calibrage de la sonde a été effectué pour les valeurs élevées (entre 450 et 1000 NTU) mais cette station n'a toutefois pas été prise en compte pour le calcul du transit sédimentaire présenté ci-après.

En conclusions sur ces résultats, les concentrations en MES observées sont beaucoup plus fortes en 2015 qu'en 2014. Les caractéristiques hydrauliques du pulse étant les mêmes, c'est vraisemblablement la quantité de matériaux fin érodables dans le tronçon court-circuité qui était supérieure en 2015.

Par mise en relation de ces données avec les temps de transit évalués en 2014, il apparaît que l'augmentation de la vitesse de transit sur les tronçons aval concorde avec les fortes valeurs de MES sur ces mêmes tronçons. En 2014 toutefois, seules les concentrations en MES de la station ESP4 étaient très significativement différentes de celles obtenues sur les trois autres stations alors qu'en 2015, les deux stations aval, ESP3 et SP4 sont concernées.

Cette augmentation importante de MES dès la station ESP3 peut également être liée à une quantité plus importante de matériaux solides potentiellement mobilisables sur le tronçon amont (ESP2 → ESP3).

V.1.3.b Volumes de matériaux exportés par le pulse

L'estimation de la quantité totale de matières en suspension en transit pendant le pulse a été réalisée sur trois stations (Figure 20). Comme indiqué en §V.1.3.a, la station ESP2 a été sortie du jeu de données en raison d'une trop grande incertitude.

L'observation des valeurs obtenues montre que la quantité de matières solides exportée pendant le pulse est croissante d'amont vers l'aval. Le pulse d'eau se charge en matières en suspension au fur et à mesure de son transit.

La quantité de 2439 T de matières peut être retenue comme la quantité finale exportée du tronçon. Cette valeur est sans doute sous-évaluée si l'on ajoute à cela une part de sable déplacée par charriage.

Cette quantité apparaît significative à l'échelle du linéaire concerné (environ 27,2 km en prenant en compte la sinuosité du lit). En moyenne 9,0 Tonnes de matières ont été exportées pour 100 m de cours d'eau.

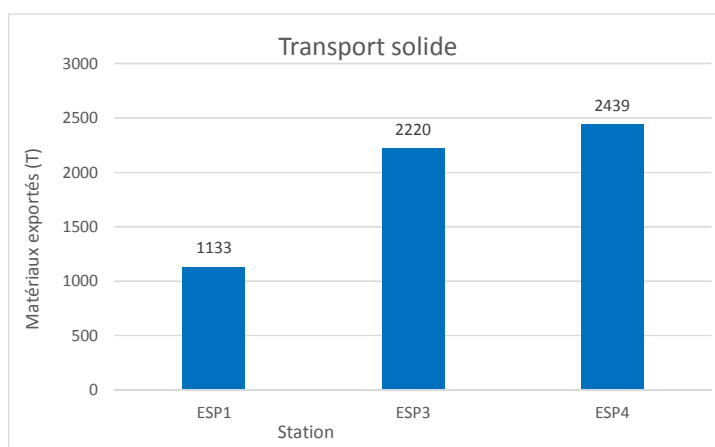


Figure 20 : Estimation de la quantité de matières solide en suspension transitant sur les quatre stations pendant le pulse d'Espinasses 2015

A noter toutefois que les flux annuels de matériaux à Sisteron sont estimés à 800 000-900 000 T/an (Source EDF, évaluation valable pour 2013 et 2014). Bien qu'il y est d'autres sources d'apport à ce niveau de la Durance (Buëch, autres affluents, tronçon de la Saulce, épisodes de crue, etc.), ces chiffres permettent de relativiser les quantités de matériaux exportés par le pulse.

Le pulse 2015 d'Espinasses a permis d'évacuer environ 2439 T de sédiments sur les 27,2 km linéaires du tronçon court-circuité.

Devenir des matériaux - décantation

Concernant le devenir de ces matériaux, un flux d'environ 300-400 Tonnes a été observé à Sisteron Bas Quartiers (amont Saint-Lazare) le 18/11/2015 (Données EDF). Cette valeur correspond plus à un ordre de grandeur qu'à une donnée exacte (imprécision sur les débits). Le pic de MES a été atteint à 15 heures et s'élève à 100 mg/l

A ces débits, compte tenu des vitesses assez limitées, la décantation (dépôt des fines) est proche de 85 % entre la station aval (ESP4) du tronçon d'Espinasses et la station de mesures à Saint-Lazare.

V.1.3.c MES et hauteur d'eau sur les stations

Le croisement de l'évolution du taux de MES et de la hauteur d'eau lors du passage du pulse sur chaque station apporte quelques observations complémentaires sur les mécanismes en œuvre (Figure 21).

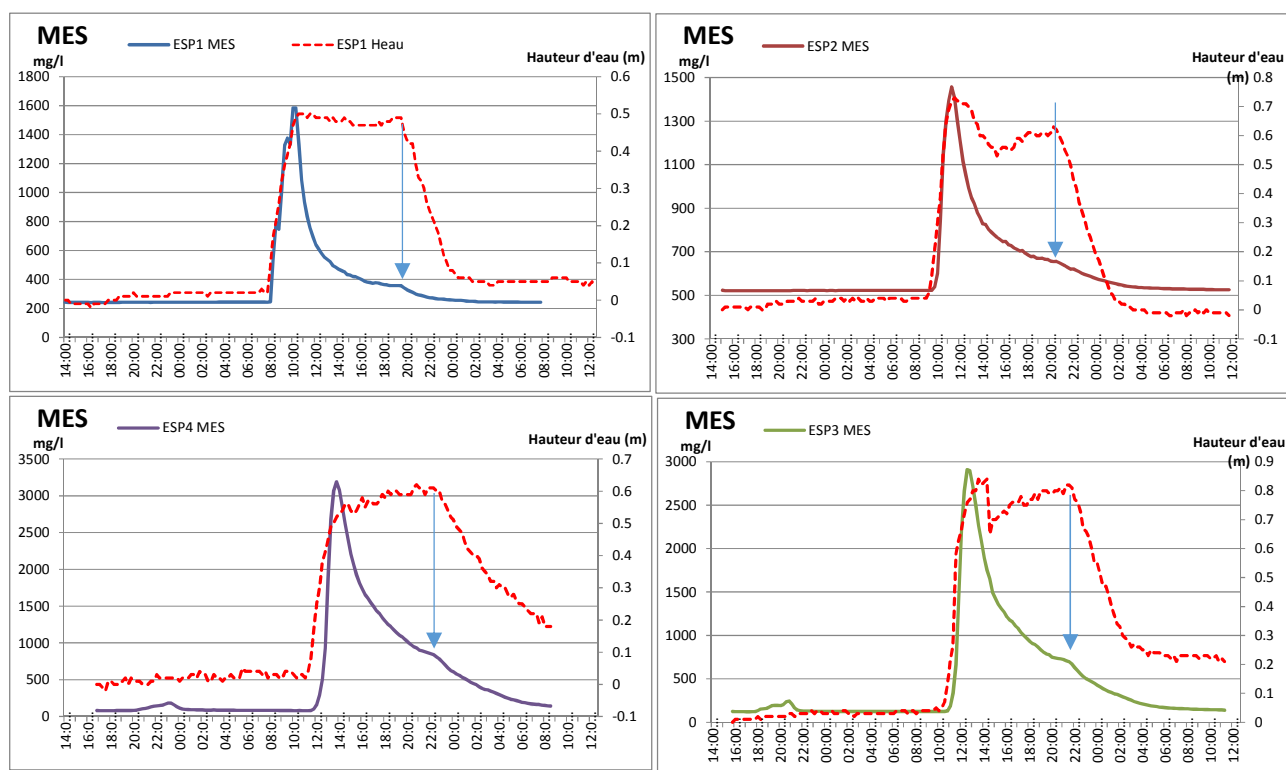


Figure 21 : Courbes d'évolutions des taux de matières en suspensions, cumulées aux hauteurs d'eau sur les quatre stations du tronçon d'Espinasses (2015) ; la flèche matérialise l'effet de la fin du pulse sur le taux de MES

- ✓ Le maximum de matières en suspension est atteint très rapidement en début de pulse, avant ou en tout début d'atteinte du maximum de hauteur d'eau.
- ✓ Pendant le pulse, les concentrations en matières en suspension diminuent fortement, de l'ordre de 70%¹, alors que l'hydrologie reste similaire. Le volume concerné de matières en suspension est vraisemblablement évacué en totalité du tronçon court-circuité.
- ✓ En fin de pulse, une concentration en MES, de l'ordre de 30% de la valeur maximum atteinte, subsiste lorsque la cote commence à baisser. Il est probable qu'une partie de ces MES re-sédimentent dans le tronçon néanmoins, le retour au débit réservé ne semble pas provoquer de sédimentation brutale.
- ✓

Des hypothèses contradictoires peuvent être émises concernant le dimensionnement du pulse.

D'une part, si l'on examine les données de l'ensemble des stations il semble possible de corréliser les taux de MES, beaucoup plus forts en ESP4, à une énergie supérieure du pulse sur le tronçon ESP3 → ESP4. Ce qui laisse penser qu'un pulse plus énergétique, et donc plus puissant, pourrait également augmenter significativement les quantités de limons exportés sur les tronçons amonts.

D'autre part, l'observation des courbes individuelles semble montrer que le maximum de MES est atteint légèrement avant le maximum de débit, ce qui pourrait laisser penser que l'effet s'amortit. Une discussion sur ce point est disponible dans le §V.1.3.d.

La durée du pulse est suffisante puisqu'un abattement de la turbidité de l'ordre de 70% est déjà obtenu avant diminution du débit.

¹ ES¹ : 78%, ESP2 : 55%, ESP3 : 76%, ESP4 : 75%

V.1.3.d Relation entre l'énergie du pulse et le taux de MES

Un focus est réalisé sur l'évolution du taux de MES sur la station ESP1 (Figure 22) qui montre une évolution particulière.

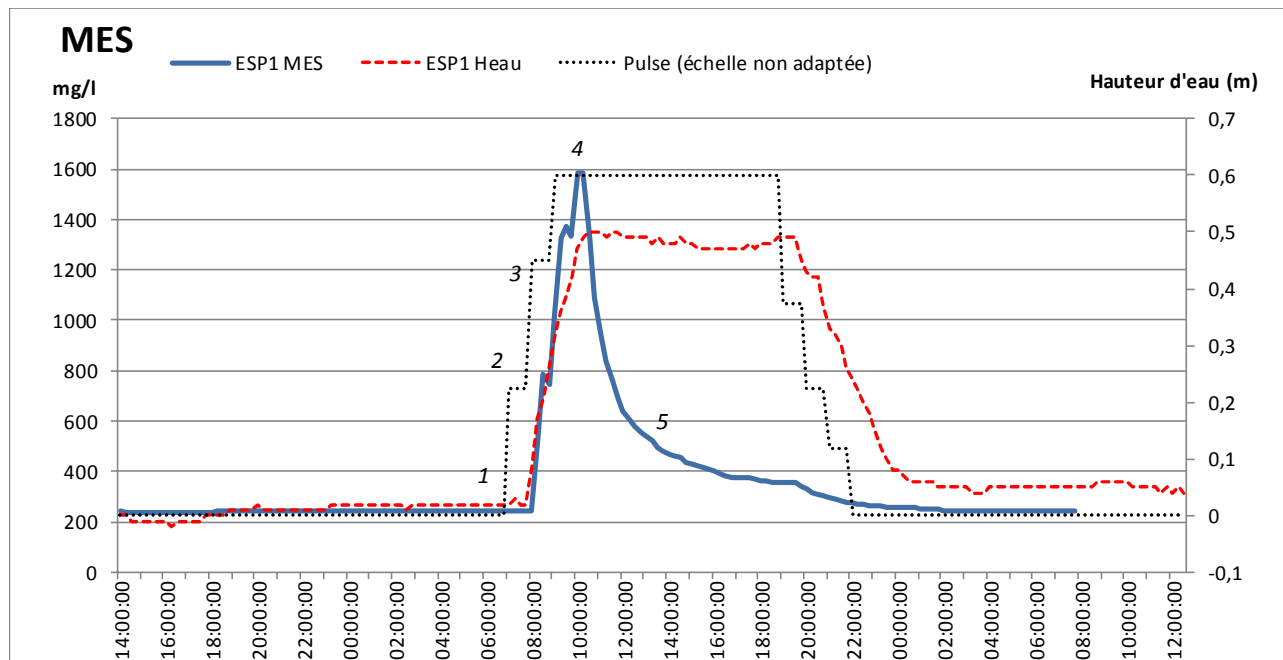


Figure 22 : Evolution du taux de MES sur la station ESP1 en fonction des modalités de mise en œuvre du pulse

L'examen de la Figure 22 appelle les commentaires suivants :

- la courbe de MES montre des pics successifs courts dans sa phase ascendante,
- ces pics ne sont pas observables sur la courbe de la cote d'eau. Un léger amortissement de la montée d'eau est toutefois observé en même temps que ces pics.
- Ils sont en revanche synchronisés, si l'on prend en compte le temps de transit, avec les paliers successifs de restitution du pulse au niveau de l'usine.

Ainsi, si l'effet hydraulique des paliers est presque estompé au niveau de la station ESCA1, celui sur le taux de MES reste perceptible.

La chronologie du taux de MES peut être interprétée comme suit :

- (1) Le déversement de 15m³/s au barrage d'Espinasses induit une forte augmentation du taux de MES sur la station ESP1. Le taux de MES croît fortement pendant 30 minutes avant d'atteindre un premier pic (788 mg/l).
- (2) Le taux de MES diminue ensuite pendant quelques minutes.
- (3) L'augmentation du lâcher d'eau à 30 m³/s induit une nouvelle augmentation du taux de MES. Un nouveau pic intermédiaire est visible sur le graphique (1375 mg/l) suivi d'une diminution de la concentration en MES.
- (4) L'atteinte du débit maximum (40 m³/s) conduit à dernier pic (1584 mg/l).
- (5) Malgré le maintien d'un débit de 40m³/s, le taux de MES enregistré à la station ESP1 chute fortement.

L'augmentation successive des débits permet d'accroître la mise en suspension de fines sur le premier tronçon. Deux mécanismes sont concernés :

- l'augmentation de la hauteur d'eau à chaque élévation de palier, induisant un accroissement de la surface mouillée conduisant à la mise en eau de particules fines mobilisables,
- l'augmentation de l'énergie du pulse et donc l'augmentation de la capacité de mise en suspension des fines.

Il est ainsi possible d'imaginer l'effet du pulse pour différents scénario de débit, correspondant aux paliers appliqués. La Figure 23 évalue ces perspectives.

La relation entre le débit et le taux de MES est presque linéaire, avec seulement un début d'inflexion pour le palier maximum. On peut donc penser que l'effet maximum n'est pas atteint sur cette station.

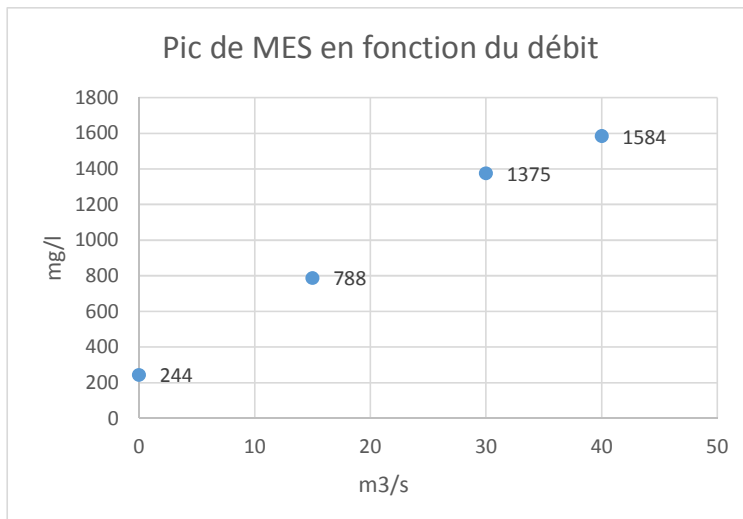


Figure 23: Relation entre le débit et le pic de MES sur la station ESP1

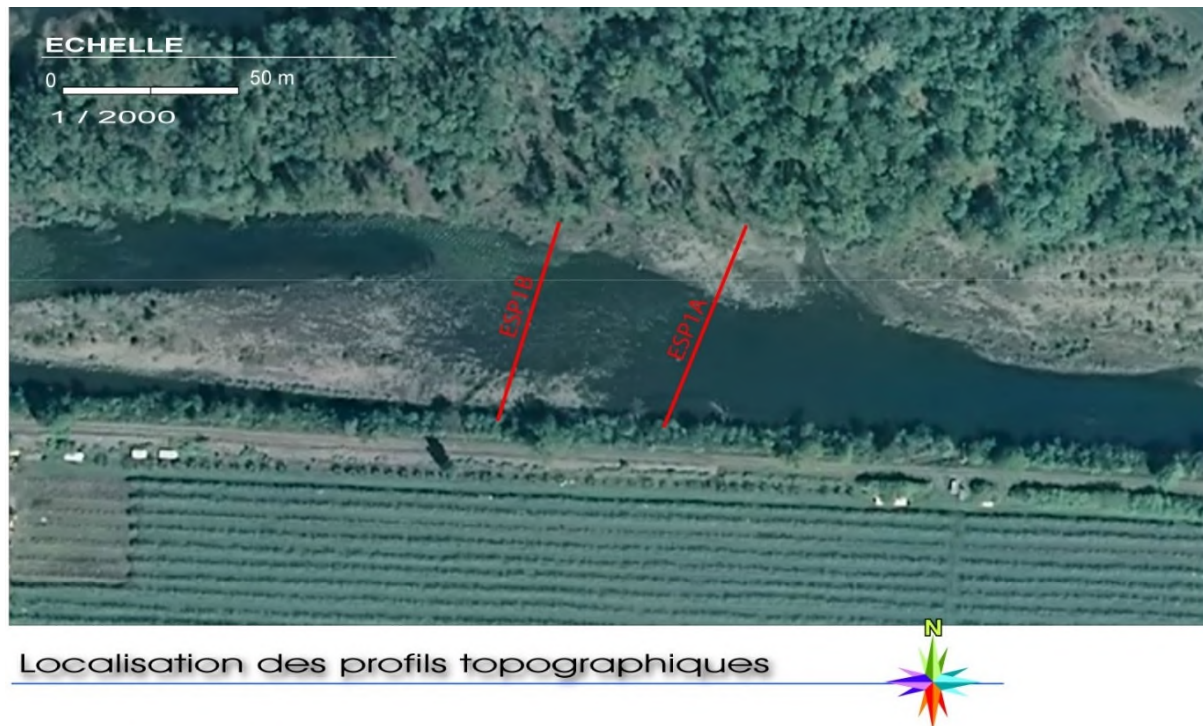
Cette démarche a plusieurs limites qu'il convient de prendre en compte :

- Elle considère que la valeur maximum du pic de MES est un indicateur pertinent du volume de matériaux extraits. C'est sans doute le cas mais il faudrait agréger un plus grand nombre de données pour affermir ce postulat.
- Elle n'est valable ici que pour le tronçon délimité entre le barrage et la station 1, ce qui n'est peut-être pas représentatif de tout le tronçon court-circuité d'Espinasse.

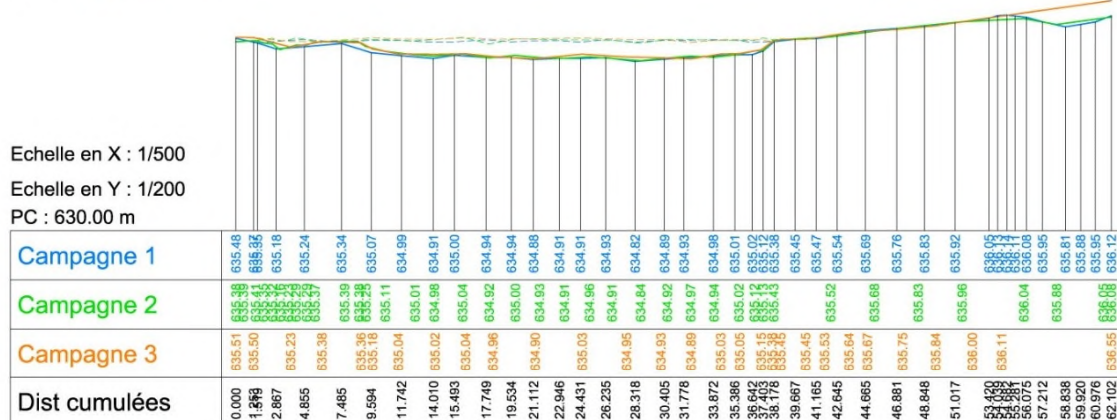
Elle ouvre en revanche des perspectives expérimentales qui permettraient de maximiser le retour d'expérience pouvant être acquis lors d'un pulse. En effet, en allongeant très sensiblement les paliers, il serait sans doute possible de séquencer lors d'une seule opération l'effet hydraulique du pulse par tranche de débit, sur le tronçon complet.

V.2 SUIVI TOPOGRAPHIQUE DU PROFIL

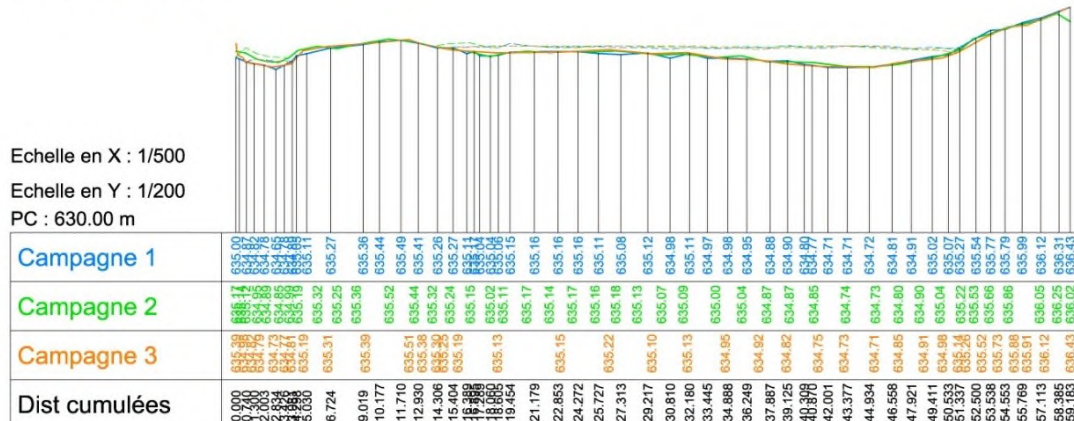
Les planches suivantes présentent les profils topographiques réalisés sur les différentes stations ainsi que leur localisation sur photo aérienne.

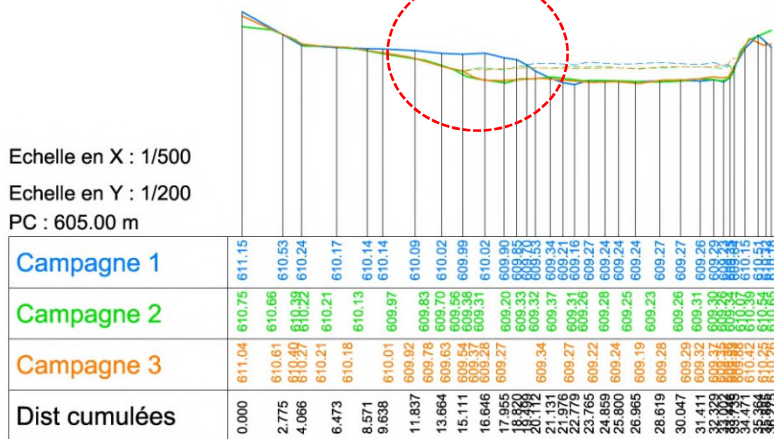


Station **ESP1A**-2015

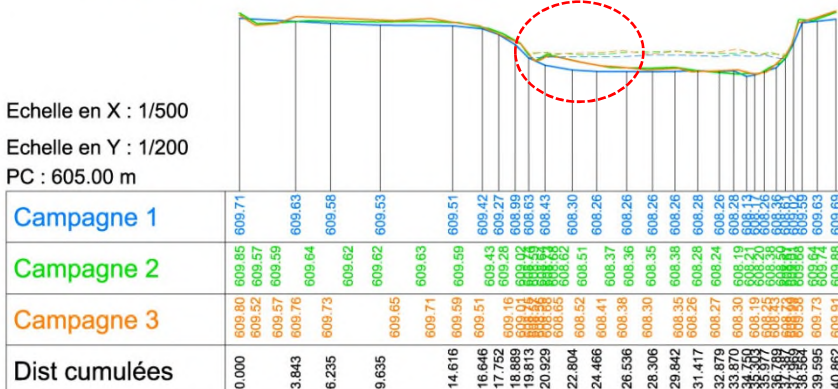


Station **ESP1B**-2015





PC : 605.00 m



PC : 605.00 m

Distance	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Dist cumulée
0.000	593.59	593.59	593.56	0.000
3.132	593.32	593.53	593.50	3.132
4.076	593.34	593.47	593.37	4.076
5.399	592.50	593.30	593.00	5.399
7.809	592.46	592.48	592.86	7.809
9.681	592.51	592.45	592.49	9.681
11.104	592.44	592.50	592.50	11.104
12.653	592.35	592.24	592.36	12.653
14.019	592.36	592.27	592.26	14.019
15.382	592.30	592.27	592.23	15.382
17.494	592.30	592.26	592.29	17.494
19.386	592.37	592.44	592.29	19.386
21.264	592.47	592.61	592.54	21.264
22.985	592.47	592.48	592.48	22.985
24.783	592.50	592.51	592.48	24.783
26.465	592.53	592.49	592.56	26.465
27.725	592.50	592.52	592.52	27.725
29.087	592.57	592.64	592.59	29.087
30.998	592.65	592.70	592.68	30.998
32.157	592.67	592.49	592.68	32.157
33.152	592.73	593.23	593.42	33.152
33.376	593.44	593.46	593.46	33.376
35.176	593.51	593.54	593.51	35.176
37.453	593.60	593.68	593.72	37.453
40.139	593.62	593.59	593.59	40.139
44.247	593.43	593.46	593.46	44.247
48.023	593.51	593.43	593.43	48.023
52.434	593.54	593.45	593.45	52.434
55.639	593.40	593.56	593.48	55.639
60.841	593.35	593.56	593.48	60.841

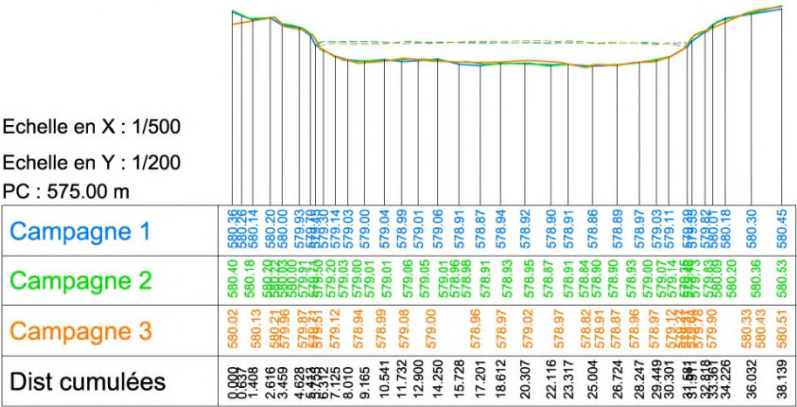
[illegible]



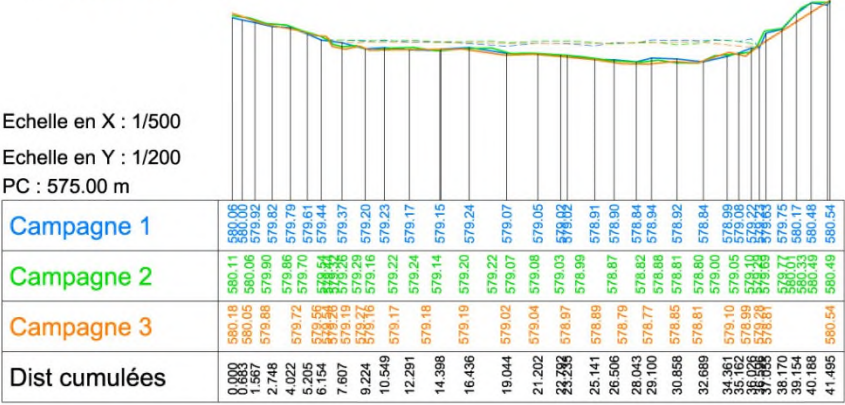
Localisation des profils topographiques



Station **ESP4A** 2015



Station **ESP4B** 2015



ESP1

Aucune modification sensible des profils en travers n'est intervenue lors des trois campagnes de suivi sur la station ESP1. L'évolution du profil amont en rive droite sur la campagne 3 est simplement un artefact lié à l'absence de donnée précise.

ESP2

La morphologie du lit a sensiblement évolué suite au pulse de décolmatage de 2015. Les modifications concernent principalement la rive gauche de la Durance.

En ce qui concerne le profil topographique amont (*ESP2A*), le cône alluvial mis en place par le Breiche a été repris (Photo 11). Le lit s'est abaissé de plus de 70 cm sur ce secteur provoquant alors une augmentation de la largeur du lit mouillé et une diminution de la hauteur d'eau sur ce secteur (par comparaison au profil topographique aval).



Photo 11: Reprise du cône alluvial suite au pulse d'Espinasses 2015 sur le profil amont (*ESP2A*) de la station ESP2 –
Le lit s'est enfoncé de 70 cm

Sur le profil aval (*ESP2B*), on observe un dépôt de matériaux en rive gauche, très certainement issu du cône alluvial. Il y a un rehaussement du fond du lit de 22 cm.

ESP3

Le profil aval (*ESP3B*) est réalisé en oblique sur une tête de radier. Aucun changement significatif n'est observé au passage du pulse.

ESP4

Le profil aval (*ESP4B*) est réalisé sur une tête de radier. Aucun changement n'est visible. S'agissant du profil amont (*ESP4A*), une légère rehausse est observable au milieu du lit sans pour autant être significative.

Excepté sur la station ESP2, où le pulse a conduit à une reprise d'un cône alluvial, il n'a pas eu d'effet hydromorphologique majeur sur les stations suivies en 2015.

V.3 SUIVI GRANULOMETRIQUE ET COLMATAGE SUPERFICIEL

V.3.1 EVOLUTION GRANULOMETRIQUE GLOBALE

L'évolution granulométrique, évaluée à partir du substrat dominant des placettes étudiées, est présentée dans le tableau ci-après (Tableau 9).

Granulométrie	ESP1			ESP2		
	1	2	3	1	2	3
rocher / dalle						
bloc	3	3	3			
pierre grossière	22	21	16	10	7	5
pierre fine	2	3	8	10	13	14
cailloux grossier				4	4	4
cailloux fin	1	1	1	3	5	6
gravier grossier					1	1
gravier fin						
sable grossier						
sable fin				1		
limons	2	2	2	2		
argile						

Granulométrie	ESP3			ESP4		
	1	2	3	1	2	3
rocher / dalle						
bloc						
pierre grossière	3	4	3	8	9	10
pierre fine	22	23	25	21	21	17
cailloux grossier	1			1		3
cailloux fin	1	1	1			
gravier grossier						
gravier fin						
sable grossier						
sable fin	2	2	1			
limons	1					
argile						

Tableau 9 : Evolution granulométrique du substrat dominant sur les 30 placettes étudiées, entre les trois campagnes ; le trait pointillés rouge matérialise le pulse

L'évolution granulométrique globale entre les campagnes 1 (pré-pulse) et 2 (pulse) est peu marquée.

ESP1

S'agissant de la station ESP1, aucune évolution de la granulométrie ne s'est produit au passage du pulse. Les substrats dominants sont restés inchangés pour la quasi-totalité des placettes.

Entre les campagnes 2 (pulse) et 3 (post-pulse), les résultats ne sont pas significativement différents. On observe néanmoins une diminution du nombre de placettes occupées par des « pierres grossières » au profit de « pierres fines » sur la station ESP1.

ESP2

Sur cette station et d'après le tableau ci-dessus, le pulse a induit une faible évolution de la granulométrie. Cette synthèse masque des effets locaux marqués, liés à l'évolution topographique identifiée précédemment. A l'échelle des faciès, les évolutions suivantes sont observées.

- ✓ Au niveau du chenal lotique, les limons ont totalement disparu. On observe également une forte augmentation du nombre de placettes occupées par des « cailloux fins ». De même, il y a un dépôt de « graviers grossiers » (en tant que substrat secondaire) non observé jusque-là.
- ✓ Dans le rapide, le constat est identique, après pulse, toutes les placettes initialement dominées par des « pierres grossières » se retrouve avec des « pierres fines ». On observe également un dépôt de « cailloux grossiers » alors que ce substrat n'avait pas été observé lors de la première campagne.
- ✓ La granulométrie du radier et de la tête de radier sont peu modifiée après passage du pulse.
- ✓ Au niveau du plat courant, des modifications apparaissent, pour autant, il s'agit principalement d'une évolution des proportions entre les substrats dominants et secondaires. Un dépôt de graviers est néanmoins observé en bordure ainsi qu'un départ des sables en milieu de lit.

ESP3

Aucune évolution significative de la granulométrie n'est visible (Tableau 9). Les seuls changements observables sont liés au passage de substrats secondaires en dominants et inversement après le passage du pulse.

ESP4

Le pulse semble avoir eu peu d'effet sur la granulométrie des faciès de la station ESP4 (Tableau 9).

Les modifications de la granulométrie ne sont pas susceptibles d'influencer les autres indicateurs suivis pour les stations SAU1, SAU3 et SAU4. Seule la station SAU2 montre une évolution sensible, notamment sur les faciès de rapide et de chenal lotique. Les substrats fins (limons, sables) ont été emportés par le pulse et un dépôt de cailloux s'est produit. Cette évolution granulométrique recoupe l'évolution de la topographie du fond observée précédemment.

V.3.2 EVOLUTION DU COLMATAGE ET DE L'ENCHASSEMENT

V.3.2.a Description et interprétation à l'échelle stationnelle

Les effets du pulse hydraulique sur le niveau de colmatage superficiel (dépôt de limons) et l'enchâssement du substrat sont présentés dans les pages qui suivent par station et selon la logique : dépôt de limons puis enchâssement du substrat.

- **Station ESP1**

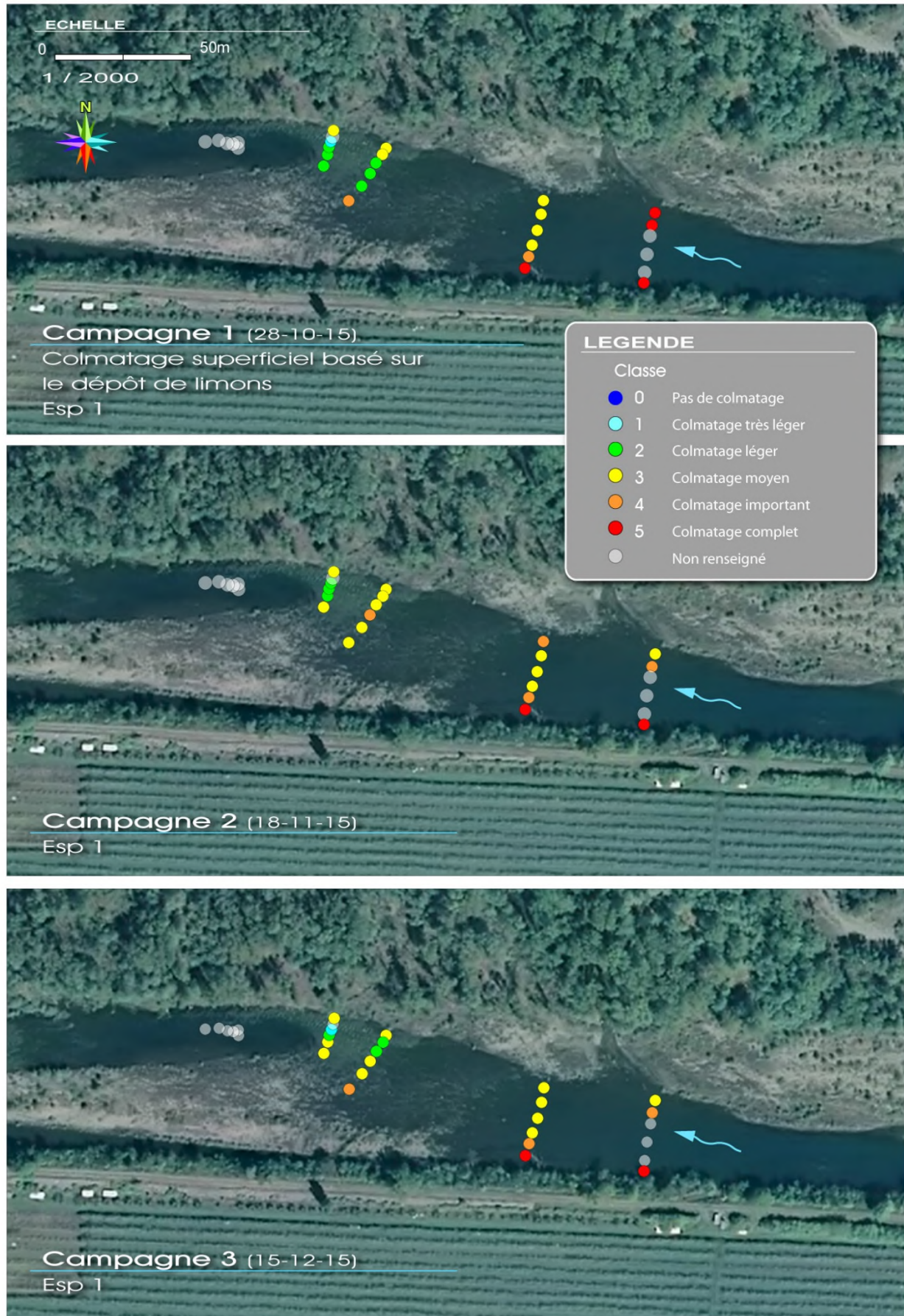


Figure 24 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP1 ; fond de carte 2015

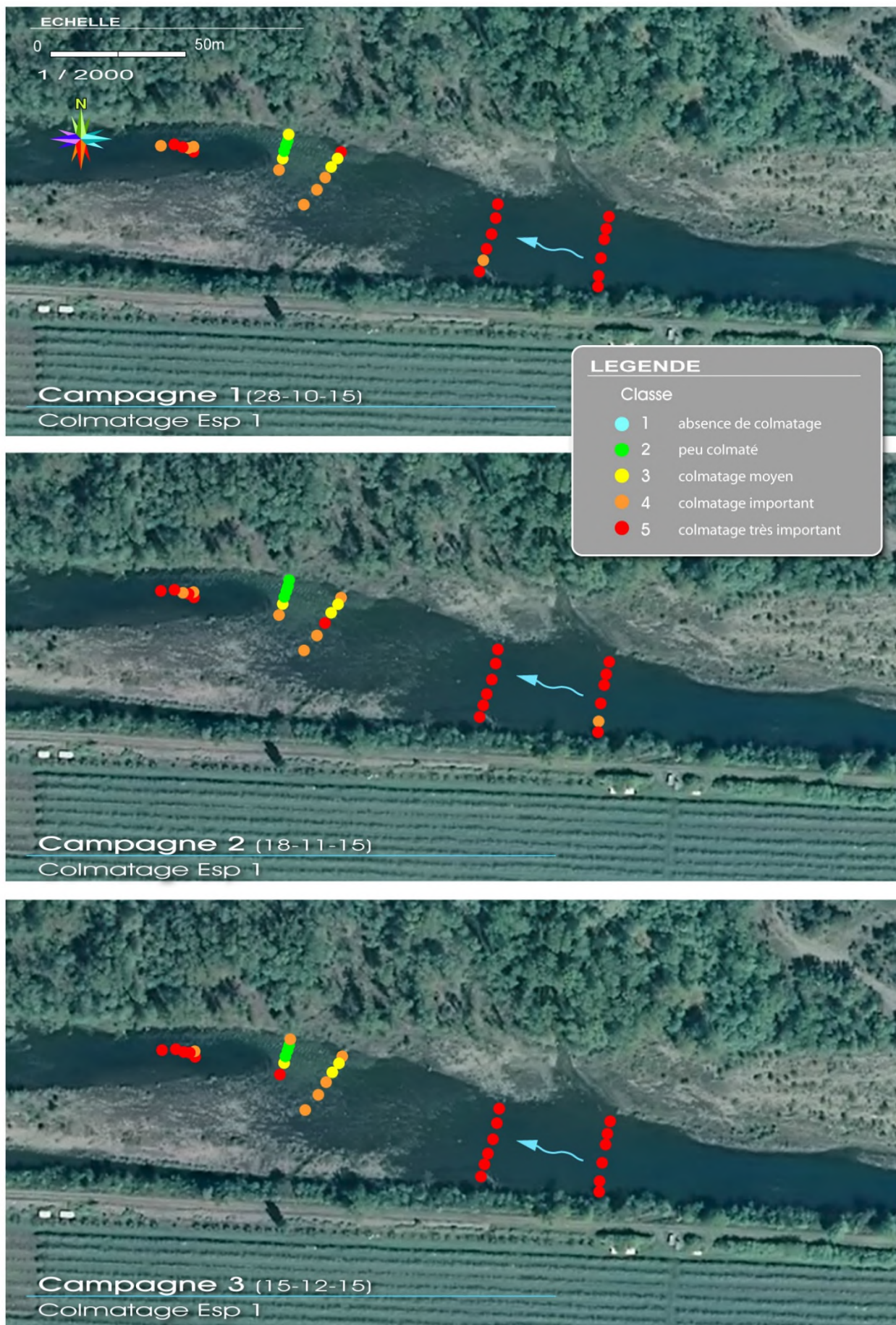


Figure 25 : Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP1 ; fond de carte 2015

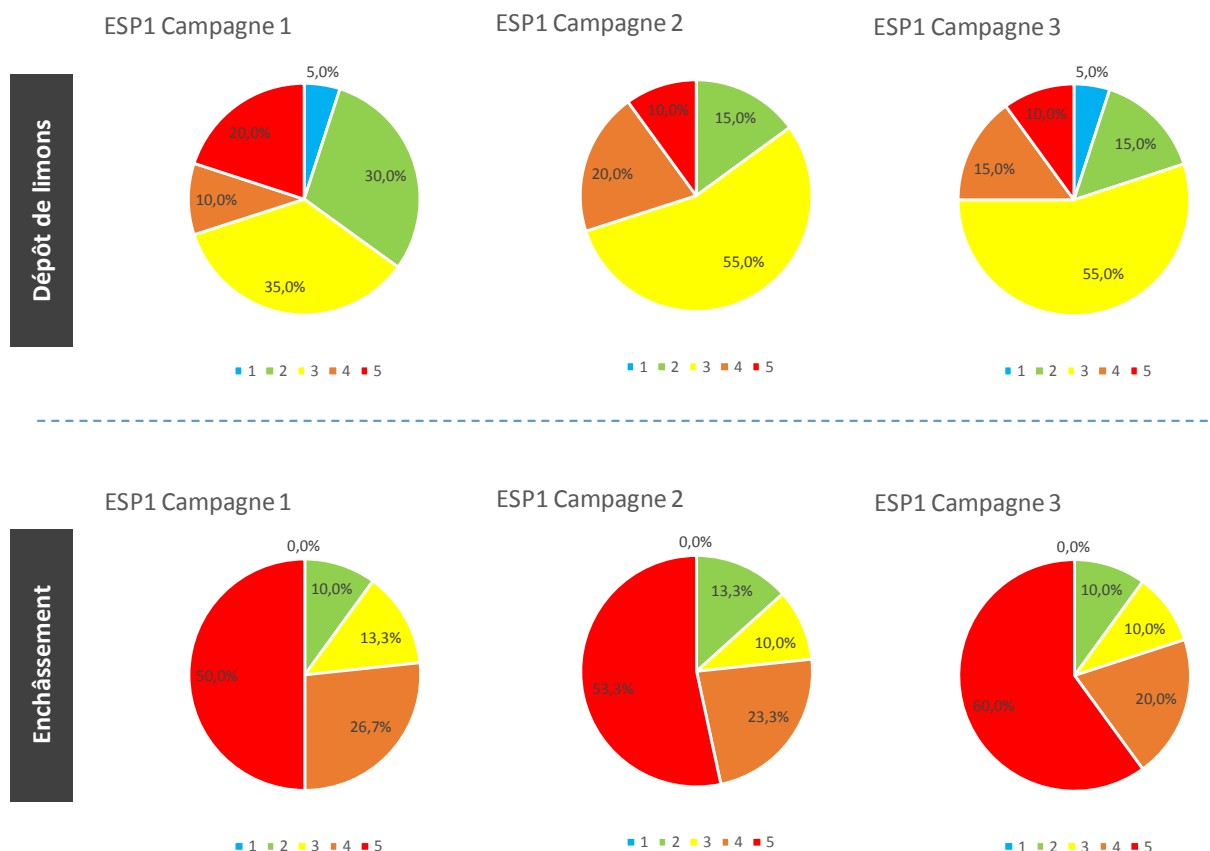


Figure 26 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP1

✓ Limons

La couche de limons a légèrement évolué au passage du pulse sur cette station (Figure 24 & Figure 26). La principale modification concerne un départ des limons en bordure du plat courant (secteur amont). Parallèlement, un léger dépôt se produit au niveau des radiers. La campagne 3 montre très peu d'évolution sur ce paramètre.

✓ Enchâssement

S'agissant de l'enchâssement du substrat, cette station présente globalement un niveau très important (Figure 25 & Figure 26). La classe de colmatage Archambaud maximum, correspondant à un substrat totalement enchâssé, représente entre 50 et 60 % des points de mesures pour le substrat dominant.

Ce pourcentage est croissant au cours des trois campagnes. Ce même constat avait déjà été établi lors du pulse réalisé en 2014.

D'après la présentation cartographique, le niveau d'enchâssement des substrats reste globalement stable entre les campagnes 1 et 2 (Figure 25). En période post-pulse, il y a une augmentation peu sensible du colmatage (campagnes 2 et 3). L'augmentation la plus fréquente est d'une classe et concerne indifféremment le chenal, le radier et les bordures.

- Station ESP2



Figure 27 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP2 ; fond de carte 2015

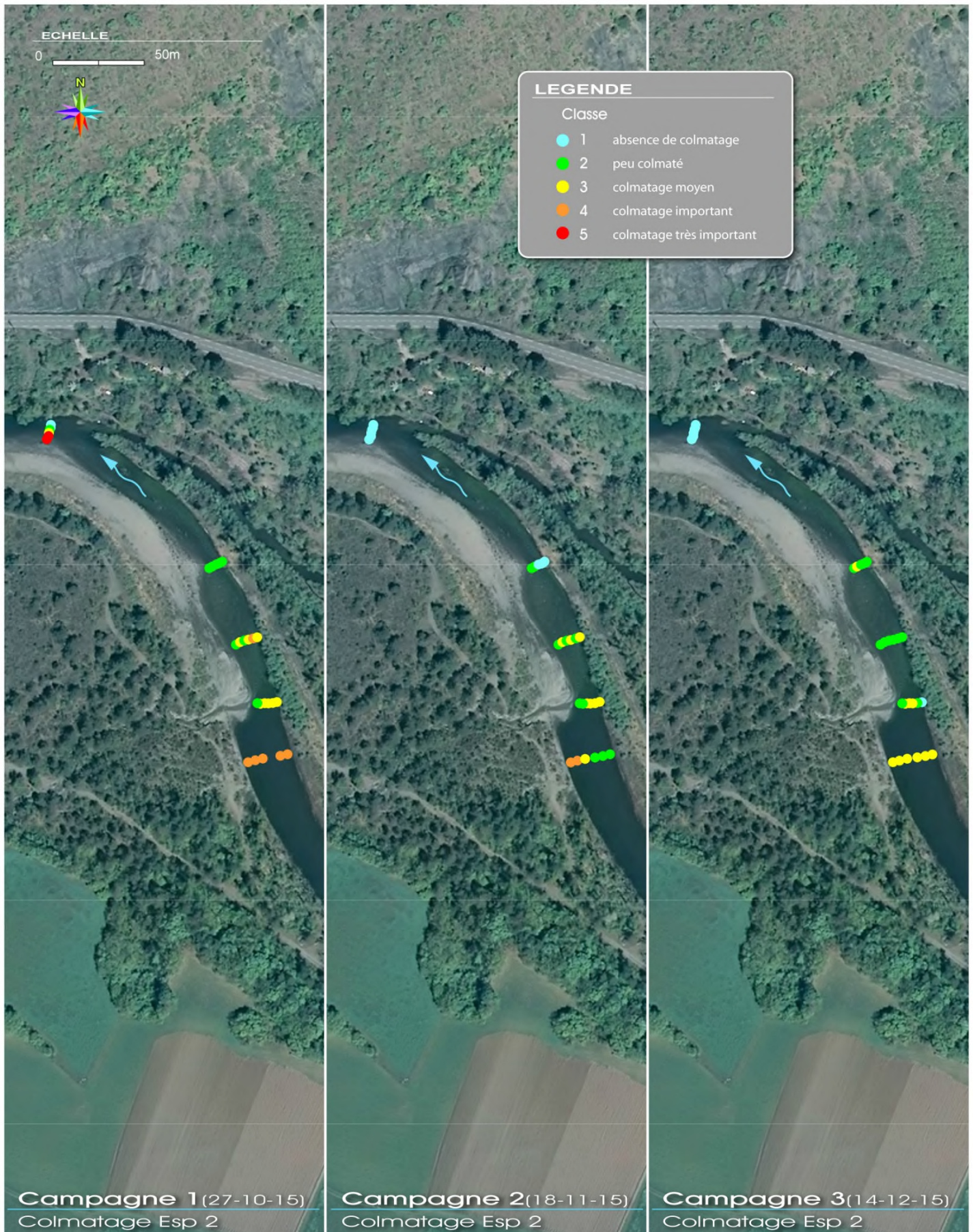


Figure 28: Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP2 ; fond de carte 2015

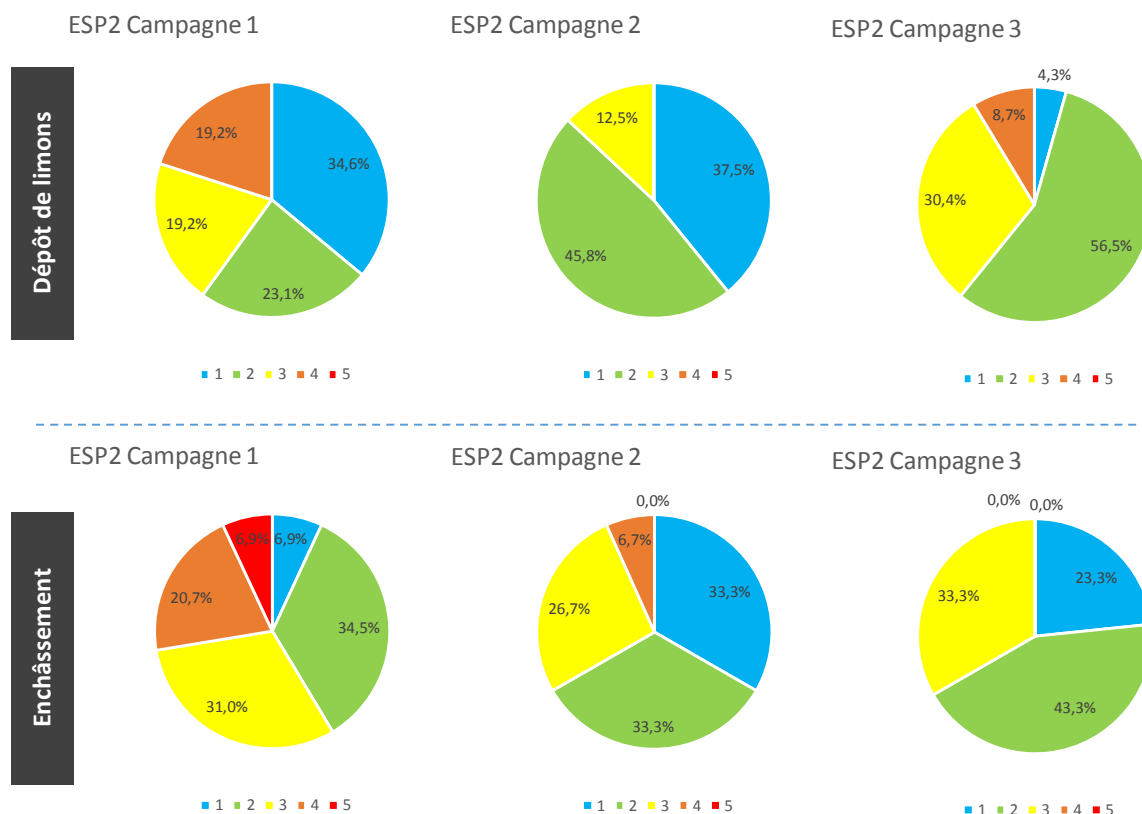


Figure 29 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP2

✓ Limons

La Figure 29 met en évidence une nette amélioration après pulse (augmentation des placettes de classes 2, régression des de la classe 3 et disparition de la classe 1). Les principales améliorations concernent le transect amont (plat courant) et dans une moindre mesure le transect suivant (tête de radier). Ces améliorations sont néanmoins temporaires puisque le dépôt de limons augmente à nouveau lors de la 3ème campagne.

✓ Enchâssement :

Lors de la première campagne, les substrats sur cette station sont globalement nettement moins enchâssés que sur le secteur précédent (Figure 29). Un tiers des placettes évaluées apparaît comme non enchâssées (classe 1) et une même fraction présente un faible enchâssement (classe 2).

Entre les deux premières campagnes l'évolution est bien marquée (Figure 28 & Figure 29):

- ✓ Il n'y a plus de placettes totalement enchâssées pour le substrat dominant ;
- ✓ Le nombre de placettes fortement enchâssées chute considérablement laissant apparaître une forte proportion de placettes non enchâssées (valable pour tous les substrats) ;
- ✓ D'après les représentations cartographiques, l'amélioration du niveau d'enchâssement concerne principalement les deux transect avals (chenal lotique et rapide) et dans une moindre mesure, le transect amont (plat courant).

Lors de la campagne 3, quelques placettes complémentaires évoluent de la classe 2 à la classe 3, principalement en tête de station pour autant, l'évolution est globalement très faible.

Comme en 2014, le pulse a eu un effet positif significatif sur le colmatage superficiel et l'enchâssement des substrats de la station ESP2. Cette amélioration est fortement liée à la modification de la granulométrie puisque les placettes qui apparaissent après pulse comme non colmatées sont celles situées dans le chenal lotique et le rapide dans lesquelles des changements de substrat ont eu lieu.

- **Station ESP3**

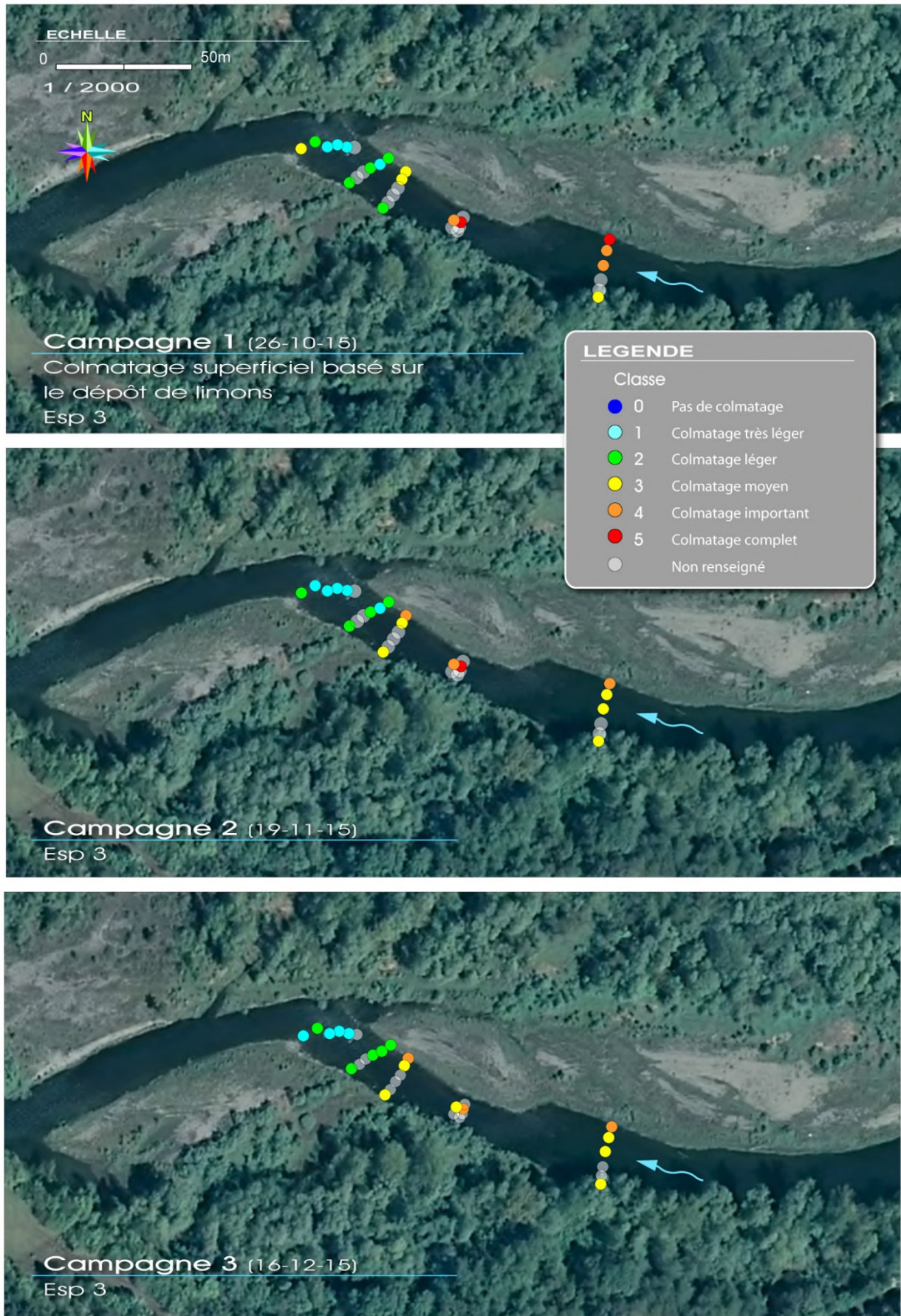


Figure 30 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP3 ; fond de carte 2015

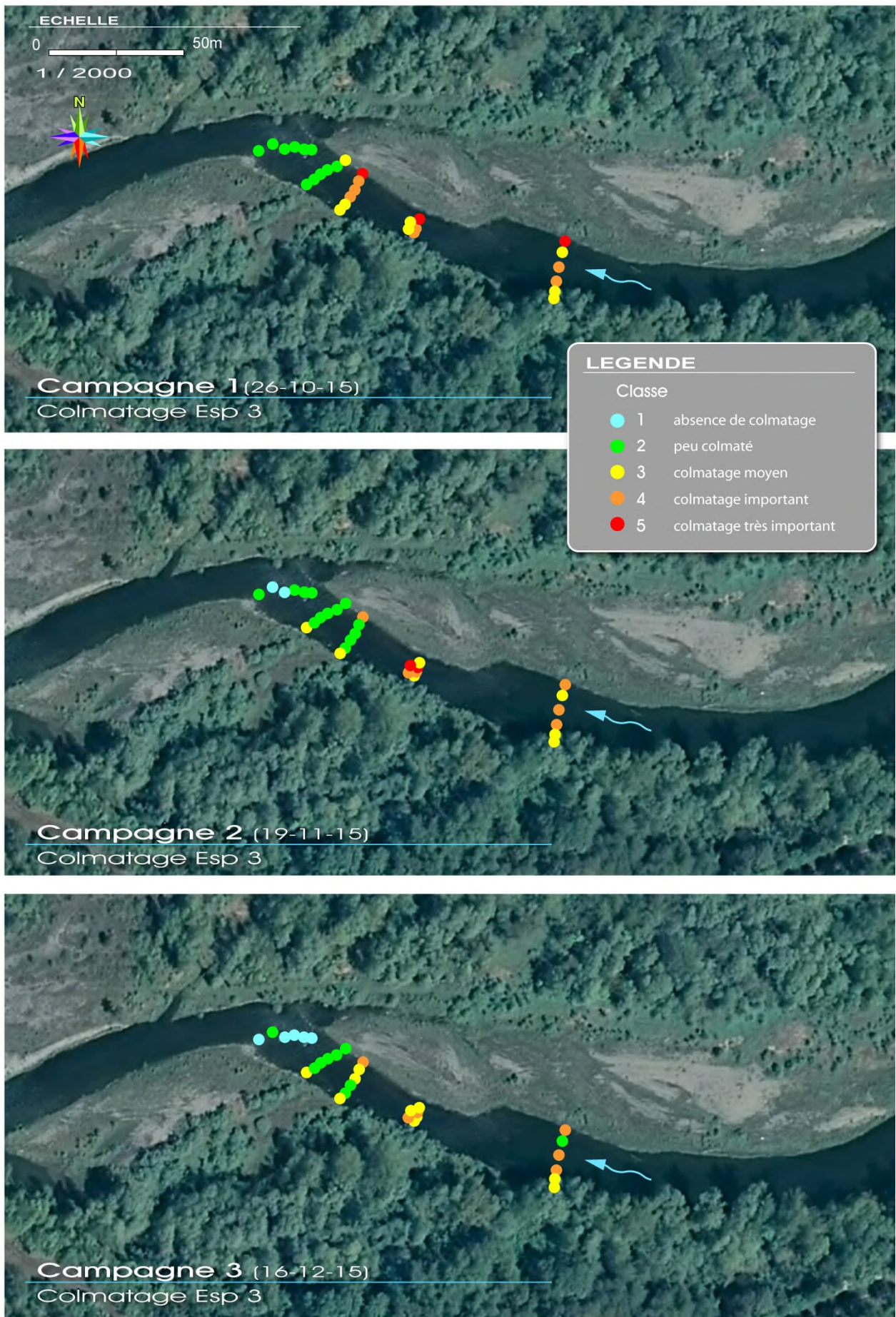


Figure 31 : Résultat du suivi du colmatage Archambaud (Enchâssement) sur la station ESP3 ; fond de carte 2015

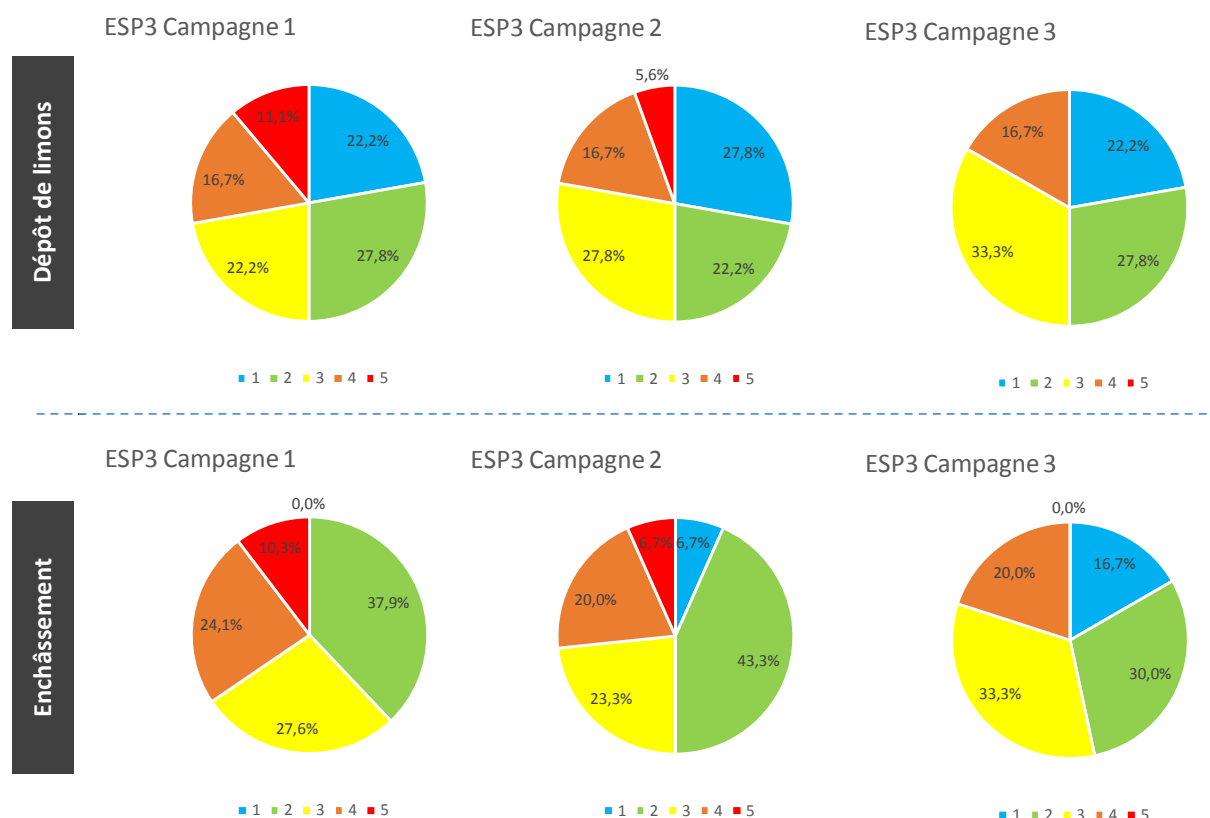


Figure 32: Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et de l'enchâssement sur la station ESP3

✓ **Limons :**

Les résultats à l'échelle stationnelle (Figure 27) mettent en évidence une légère amélioration après pulse qui se traduit essentiellement par une réduction du nombre de placettes très colmatées. Cette évolution se poursuit lors de la troisième campagne puisque la classe maximum disparaît.

L'observation de la carte met en évidence que les principales modifications concernent le transect amont (plat courant), comme pour les trois stations précédentes.

✓ **Enchâssement :**

Cette station présente avant pulse un niveau d'enchâssement moyen, un tiers des placettes étant en classe 2 (Figure 32).

L'évolution entre les campagnes 1 et 2 est positive (Figure 31) :

- ✓ Le nombre de placettes fortement à totalement enchâssé diminue de 7% ;
- ✓ Quelques placettes non enchâssées apparaissent ;

Une amélioration est également visible entre les campagnes 2 et 3, notamment au niveau des rapides où plusieurs placettes deviennent non enchâssées.

Le pulse d'Espinasses 2015 a un léger effet positif sur le colmatage superficiel (dépôt de limons) et l'enchâssement des substrats présent au niveau de la station ESP3.

- **Station ESP4**



Figure 33 : Résultat du suivi du colmatage superficiel (dépôt de limons) sur la station ESP4 ; fond de carte 2015



Figure 34 : Résultat du suivi du colmatage Archimbaud (Enchâssement) sur la station ESP4 ; fond de carte 2015

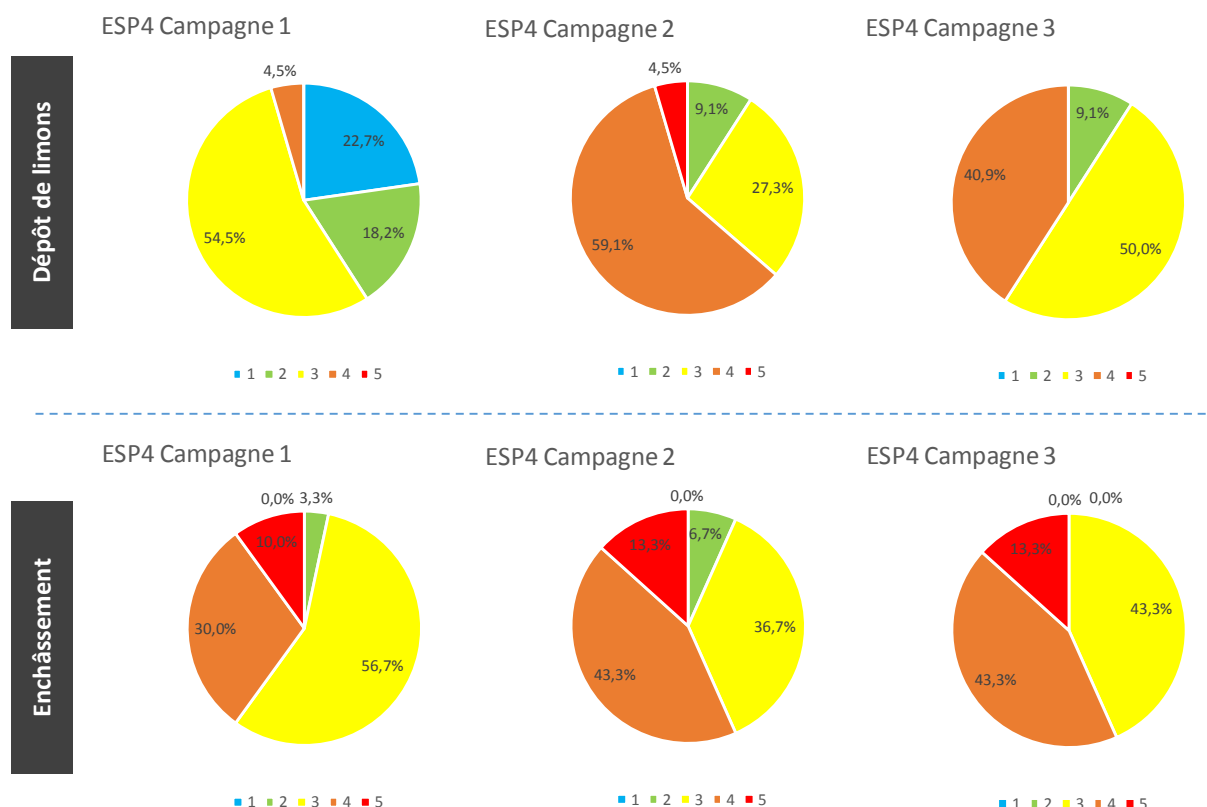


Figure 35 : Diagrammes de comparaison des résultats du suivi du colmatage superficiel et d'enchâssement sur la station ESP4

✓ Limons

Le pulse a un effet négatif sur le colmatage par les limons. Cet effet s'observe sur toutes les placettes et ce quel que soit le type de faciès (Figure 33 & Figure 35).

En moyenne le dépôt de limons augmente d'une à deux classes entre la campagne 1 et 2. Ce nouveau dépôt semble être temporaire puisqu'il y a une amélioration de la couche de limons lors de la campagne 3.

Néanmoins, les niveaux de colmatage superficiel restent plus élevés lors de la campagne 3 que sur la campagne pré-pulse.

✓ Enchâssement

Lors de la campagne initiale, les placettes présentent un substrat enchâssé (absence de classe 1) (Figure 34 & Figure 35).

Après le passage du pulse, l'enchâssement est nettement plus fort puisqu'il atteint une proportion de 56% (classes 4 et 5) aux campagnes 2 et 3 contre 40% lors de la campagne 1.

Lors de la 3^{ème} campagne, le niveau d'enchâssement se détériore un peu plus puisqu'il y a disparition de la classe 2 au profit de la classe 3.

Cette évolution du colmatage est difficile à expliquer, elle pourrait être liée au décapage des substrats les plus mobiles sous l'effet du courant. Ce phénomène a d'ailleurs été observé sur le terrain sur plusieurs stations de la Saulce.

L'effet du pulse sur la station ESP4 est négatif, pour les limons comme pour l'enchâssement.

V.3.2.b Analyse à l'échelle du tronçon

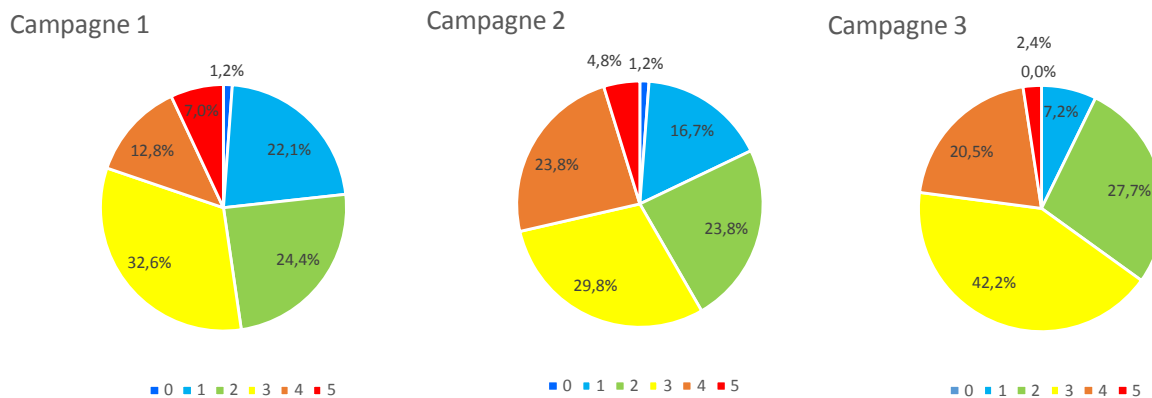
✓ **Limons**

Figure 36 : Résumé du niveau de colmatage superficiel observé sur le tronçon d'Espinasses entre les trois campagnes

En apparence, le pulse semble avoir peu d'effet sur les dépôts de limons à l'échelle des 4 stations (Figure 36). Pour autant, ce graphique cache des disparités. En effet, comme il a été montré précédemment, les effets positifs du pulse sur les trois stations amont sont nettement contrebalancés par le mauvais bilan sur la station 4. Sur celle-ci, bien qu'il y ait une diminution du dépôt de limons lors de la dernière campagne, les effets non recherchés semblent persister et on ne retrouve jamais les classes de dépôt d'avant pulse.

On peut donc penser que les pics de MES enregistrés sur les stations ESP3 et ESP4 engendrent des dépôts importants de fines sur le tronçon aval d'Espinasses.

Enfin, les plats courants sont les types de faciès qui bénéficient le plus des effets du pulse (Cf. cartographies précédentes).

✓ **Enchâssement des substrats**

Les résultats obtenus sur les différentes stations apparaissent variables et difficiles à expliquer. La figure ci-dessous tente de présenter les résultats sous formes transversales.

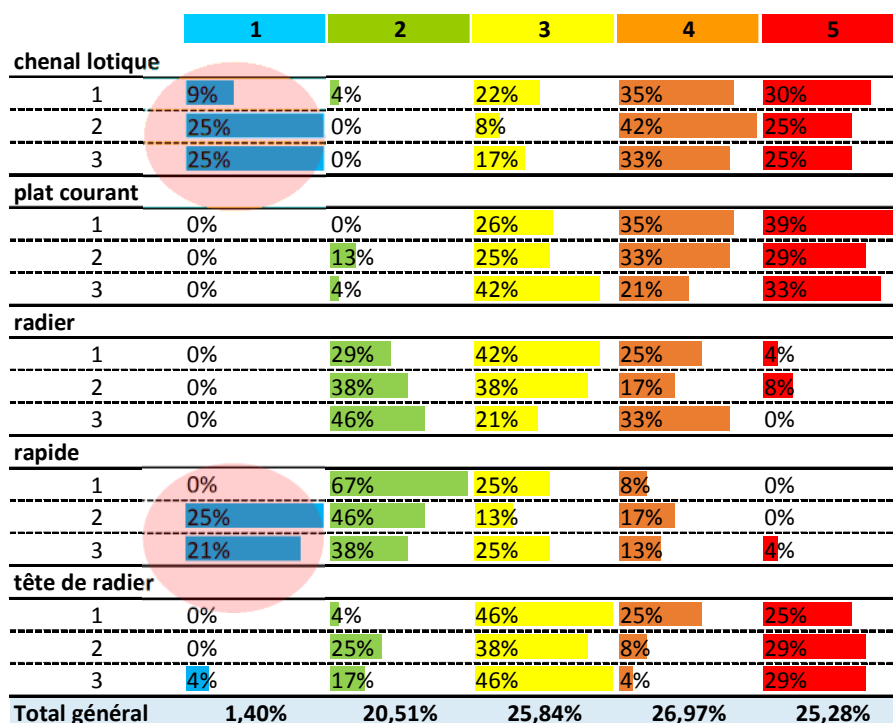


Tableau 10 : Résumé de l'intensité d'enchâssement du substrat observée sur le tronçon d'Espinasses ; en colonne les classes d'enchâssement, et en ligne les résultats pas faciès et par campagnes

L'observation de la répartition des classes d'enchâssement par faciès montre quelques points intéressants (Tableau 10):

- ✓ Le faciès plat courant est celui qui présente le plus fort taux de substrat totalement enchâssé suivi par la tête de radier et le chenal lotique
- ✓ Le rapide et le chenal lotique sont les deux faciès qui présentent le plus de placettes dont les substrats sont totalement libres ;
- ✓ Le décolmatage lié au pulse semble le plus efficace sur le chenal lotique et le rapide ;
- ✓ Le pulse ne semble pas avoir d'effets sur les substrats totalement enchâssés et ce quel que soit le type de faciès. A noter également que le pourcentage de substrats totalement enchâssés augmente même sur le radier et la tête de radier.

Il est donc possible d'imaginer qu'il existe des secteurs où les matériaux sont arrachés, et où les substrats qui restent en place sont les plus enchâssés (cas des radiers), et des secteurs où ils se déposent, avec des conséquences positives sur les indicateurs poursuivis. Le résultat au sein d'une station pourrait apparaître aléatoirement amélioré ou dégradé, sans qu'il soit possible d'en tirer une tendance.

A noter également que la force de décolmatage générée par le pulse n'est pas suffisante pour « casser » la couche d'armure présente sur certaines placettes dont le substrat est totalement enchâssé et colmaté. Pour autant, le dépôt de nouveaux matériaux par-dessus ces substrats (qui induisent de fait une plus faible classe de colmatage) apporte uniquement une amélioration temporaire et faible.

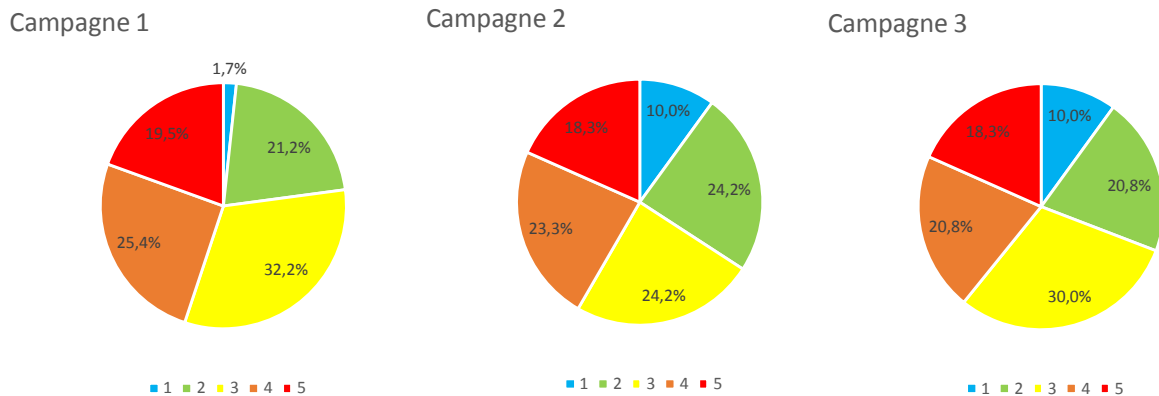


Figure 37 : Résumé du niveau d'enchâssement du substrat observé sur le tronçon d'Espinasses entre les trois campagnes

Les évolutions hétérogènes observées par station sont lissées à l'échelle du tronçon (Figure 37).

Les stations de mesures des tronçons d'Espinasses présentent globalement un taux élevé de placettes enchâssées (classe 4 + 5 > 40%) sur lesquelles un effet du pulse semble peu probable.

Le niveau d'enchâssement est légèrement modifié au passage du pulse. Une amélioration est observée sur les placettes faiblement à moyennement enchâssées (classes 1 à 3) qui augmentent. Cette situation est sans doute à corrélérer à la remobilisation d'une partie du substrat.

V.4 SUIVI DU COLMATAGE INTERSTITIEL

La conductivité hydraulique traduit la capacité du substrat à l'infiltration de l'eau. Il n'existe pas à ce jour de référentiel par manque de données concernant la connectivité hydraulique. Elle est utilisée ici en relatif, c'est-à-dire par comparaison entre les campagnes et les stations, dans l'attente d'accumuler les données et de les comparer à l'échelle des stations de suivi de la Durance.

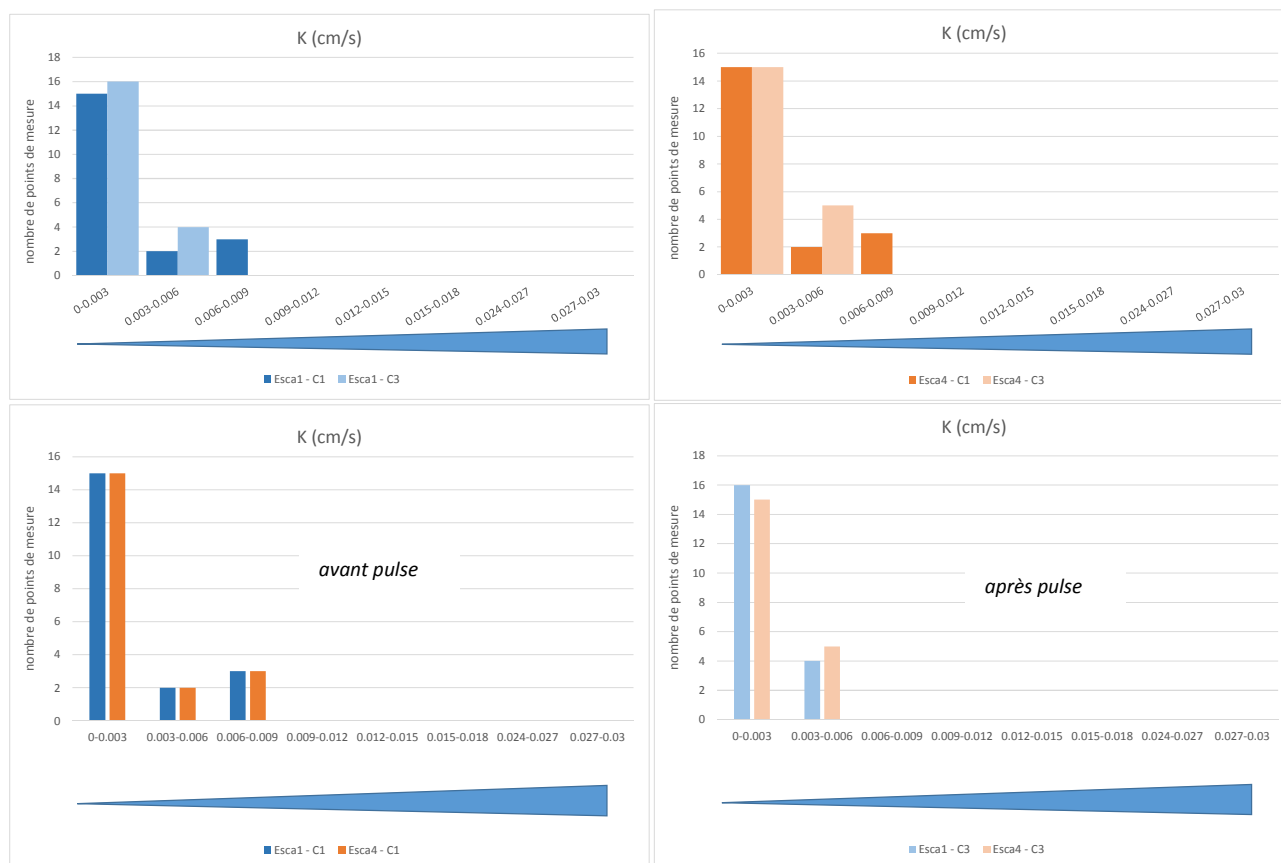


Figure 38 : Histogramme de répartition des valeurs de conductivité hydraulique sur les stations ESP1 et ESP3 entre les campagnes 1 et 3 ; Les résultats du haut sont comparées par station et les résultats du bas par campagne.

Les valeurs s'échelonnent entre 0 et 0,0090 cm/s (Figure 38). L'échelle a été calibrée sur la gamme de valeurs rencontrées jusque-là pour cette méthode dans le cadre du suivi des pulses.

Relativement à ce qui est observé sur d'autres sites, et notamment sur la Saulce, les résultats s'échelonnent sur des valeurs basses puisqu'aucune valeur ne dépasse la troisième classe. Les histogrammes présentés par campagne sont étonnamment similaires entre SAU1 et SAU3, que ce soit sur la campagne avant pulse, comme pour celle après pulse. L'évolution entre ces deux campagnes est faible mais identique. Il n'est pas possible de conclure sur la significativité de ces variations, notamment parce que la station n'est peut-être pas l'unité statistique pertinente pour traiter ces résultats mais une évolution semble exister. Un travail sera fait dans ce sens pour permettre l'exploitation des données.

Il est toutefois possible de dire qu'il n'y a pas d'amélioration globale de la conductivité sur les stations ESP1 et ESP3 suite au passage du pulse.

L'examen du taux d'infiltration sur les stations fournit les résultats suivants (Tableau 11) :

	Campagne 1 (avant pulse)		Campagne 3 (après pulse)	
	ESP1	ESP3	ESP1	ESP3
Taux d'infiltration (%)	100	90	100	100

Tableau 11 : Taux d'infiltration sur les stations ESP1 et ESP3 avant et après pulse

Le taux d'infiltration est de 100% sur la station ESP1 que ce soit avant ou après pulse. Il évolue de 90 à 100% sur la station ESP3 après le lâcher de décolmatage.

Selon Thivin (2012), ces données correspondent à des stations « non colmatées ». L'évolution entre les campagnes montre une diminution du nombre de points sans infiltration sur la station ESP3.

V.5 SUIVI INVERTEBRES

Dans le cadre du suivi du pulse, une analyse des indicateurs standard est réalisée ici. Elle est résumée dans la Figure 39.

	Campagne Date	ESP1		ESP2		ESP3		ESP4	
		C1 28/10/2015	C3 15/12/2015	C1 29/10/2015	C3 14/12/2015	C1 27/10/2015	C3 15/12/2015	C1 26/10/2015	C3 14/12/2015
Niveau IBGN	Variété taxonomique (IBGN)	34	31	37	28	34	32	28	26
	Classe de variété (IBGN)	10	9	11	8	10	9	8	8
	Taxon indicateur (IBGN)	Perlidae	Perlidae	Perlidae	Taeniopt.	Perlidae	Taeniopt.	Taeniopt.	Glossoso.
	Groupe indicateur (IBGN)	9	9	9	9	9	9	9	7
	IBGN-DCE	18	17	19	16	18	17	16	14
	Robustesse	16	16	19	14	18	15	14	12
	Taxon indicateur (Robust.)	Glossoso.	Odonto.	Perlodidae	Glossoso.	Taeniopt.	Glossoso.	Glossoso.	Heptagen.
	Groupe indicateur (Robust.)	7	8	9	7	9	7	7	5
Niveau RCS	effectifs	3547	3092	1537	3447	5242	6235	7193	3324
	Diversité RCS	44	44	47	40	46	44	38	38
	Indice de Shannon-Weaver (1963)	3.18	3.53	3.74	2.62	2.50	2.83	1.89	3.34
	Equitabilité de Shannon	0.58	0.65	0.67	0.49	0.45	0.52	0.36	0.64
Niveau RCS	Taxons maintenus	37		32		34		31	
	Taxons apparus	8		9		11		8	
	Taxons disparus	8		16		13		8	

Figure 39 : principaux indicateurs d'analyse des peuplements d'invertébrés.

L'ensemble des stations obtient un indice élevé du fait d'un groupe indicateur maximal lors de la première campagne. Lors de la campagne après pulse, ce groupe indicateur se maintiens, sauf sur la station 3 où il perd 2 points. Pourtant l'indice IBGN diminue légèrement, de un à trois points, sur toutes les stations en raison d'une légère baisse de la diversité.

Les taxons que l'on ne retrouve plus après pulses sont différentes sur chaque station et appartiennent à la pluparts des groupes taxonomiques. Leur point commun est d'être présent à moins de 10 individus lors de la première campagne.

L'observation de l'équitabilité montre des résultats hétérogènes :

- Sur les stations ESP1 et ESP4, l'équitabilité augmente significativement sous l'effet de la baisse des effectifs de gammares, cumulés au hydropsyches en ESP4.
- Sur la station ESP3 l'équitable reste moyenne et elle baisse nettement sur la station ESP2. Un fort développement de simuliidae, observables sur les stations ESP2, ESP3 et ESP4 en est la cause.

Un effet pulse est difficile à discerner dans ces évolution. Une légère érosion du peuplement est possible sous l'effet de l'évènement hydraulique mais il se cumule avec des évolutions temporelles variables selon les stations.

V.6 SUIVI DES FRAYÈRES POTENTIELLES

V.6.1 SECTEUR ROCHEBRUNE

• Surface de frayères disponible

La Figure 40 compare les surfaces potentielles de reproduction avant et après pulse. Celles-ci sont cartographiées dans la Figure 42.

La surface potentielle de reproduction a diminué de 213 m², soit environ 13 %, après le pulse. La cartographie des SFR (Figure 42) ne met pas en évidence de grosses modifications dans la répartition des frayères potentielles. Les principaux changements sont :

- Une légère modification dans la morphologie des trois plus grosses frayères (Roch10, Roch7 et Roche5),
- Une disparition des sites potentiels à l'amont (Roch11, Roch12 et Roche13),
- Une apparition de frayères potentielles sur l'aval (Roch14, Roch15 et Roch16).

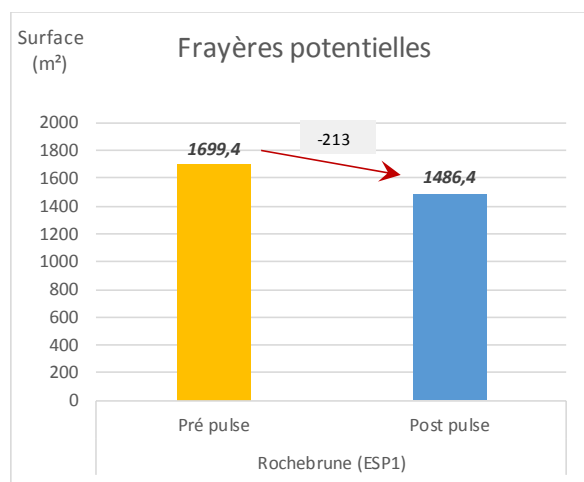


Figure 40 : Evolution des surfaces potentielles de reproduction sur le secteur de Rochebrune

Ces modifications mettent en évidence des déplacements de matériaux pendant le pulse. Sur ce site les matériaux fins potentiellement utilisés pour la reproduction de la truite fario, sont issus du cône de déjection du Torrent de Bréziers en rive gauche. Sous l'effet du pulse hydraulique, ces matériaux ont été entraînés vers l'aval. La Figure 41 illustre un dépôt important de matériaux qui a conduit à l'exondation d'une SFR¹.

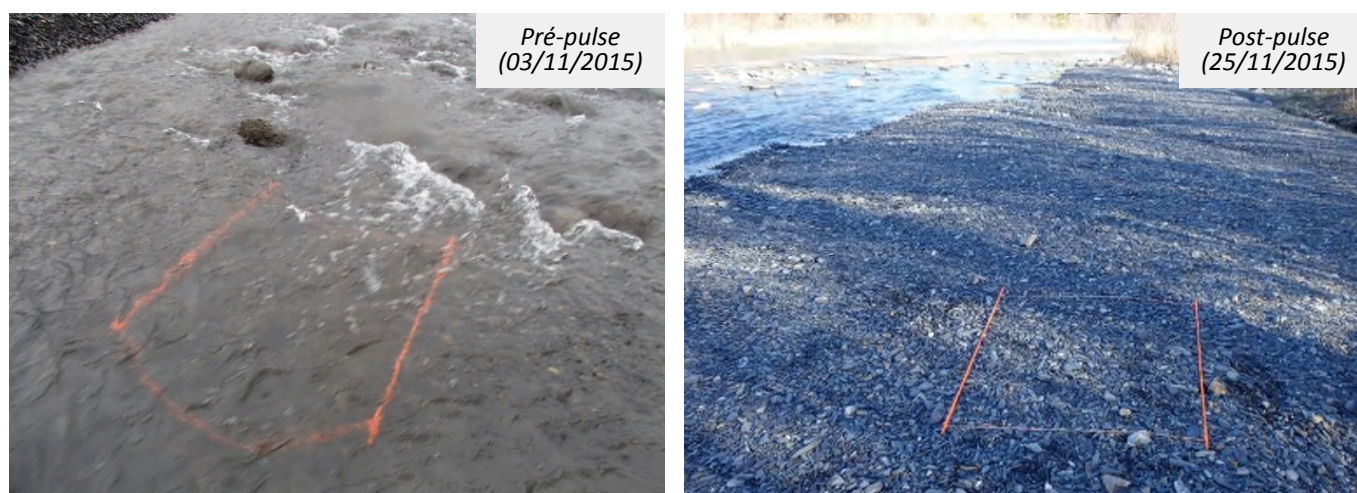


Figure 41 : Rehaussement des fonds suite au pulse 2015 sur le secteur de Rochebrune (SFR : Roch 4) – Le quadra orange a la même position sur la photo de gauche (pré-pulse) que celle de droite (post pulse) soulignant le rehaussement des fonds

¹ Rappel : les SFR sont des surfaces potentielles de reproduction et non des frayères actives. L'exondation d'un secteur potentiel n'implique pas de risque d'exondation de frayères puisque le pulse a lieu avant la période de reproduction.



Surfaces potentielles de reproduction Secteur Rochebrune

Figure 42 : localisation des SFR et des placettes de mesure avant et après pulse sur le site de Rochebrune

- **Colmatage et enchâssement des frayères**

Les effets du pulse de décolmatage sur les dépôts de limons et l'enchâssement des substrats est présenté dans les paragraphes qui suivent.

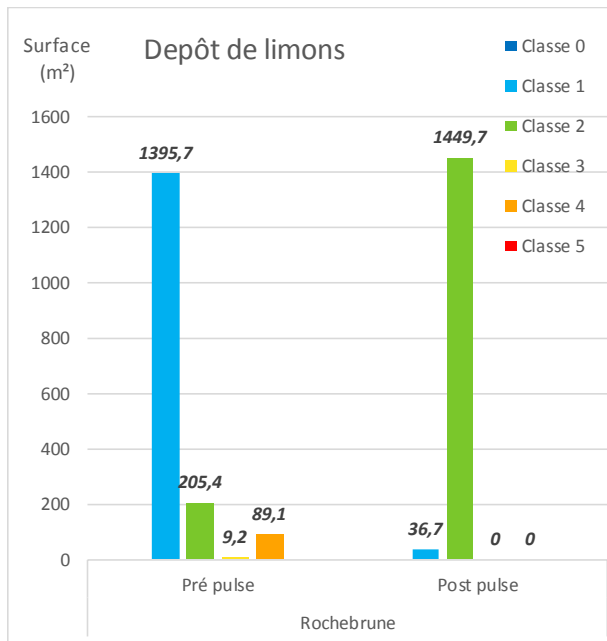


Figure 43 : intensité du dépôt de limons sur les SFR du secteur de Rochebrune avant et après pulse

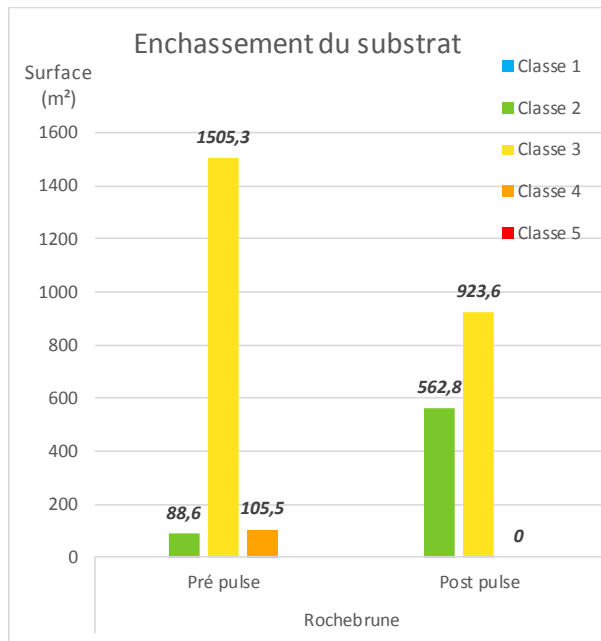


Figure 44 : enchâssement sur les SFR du secteur de Rochebrune avant et après pulse

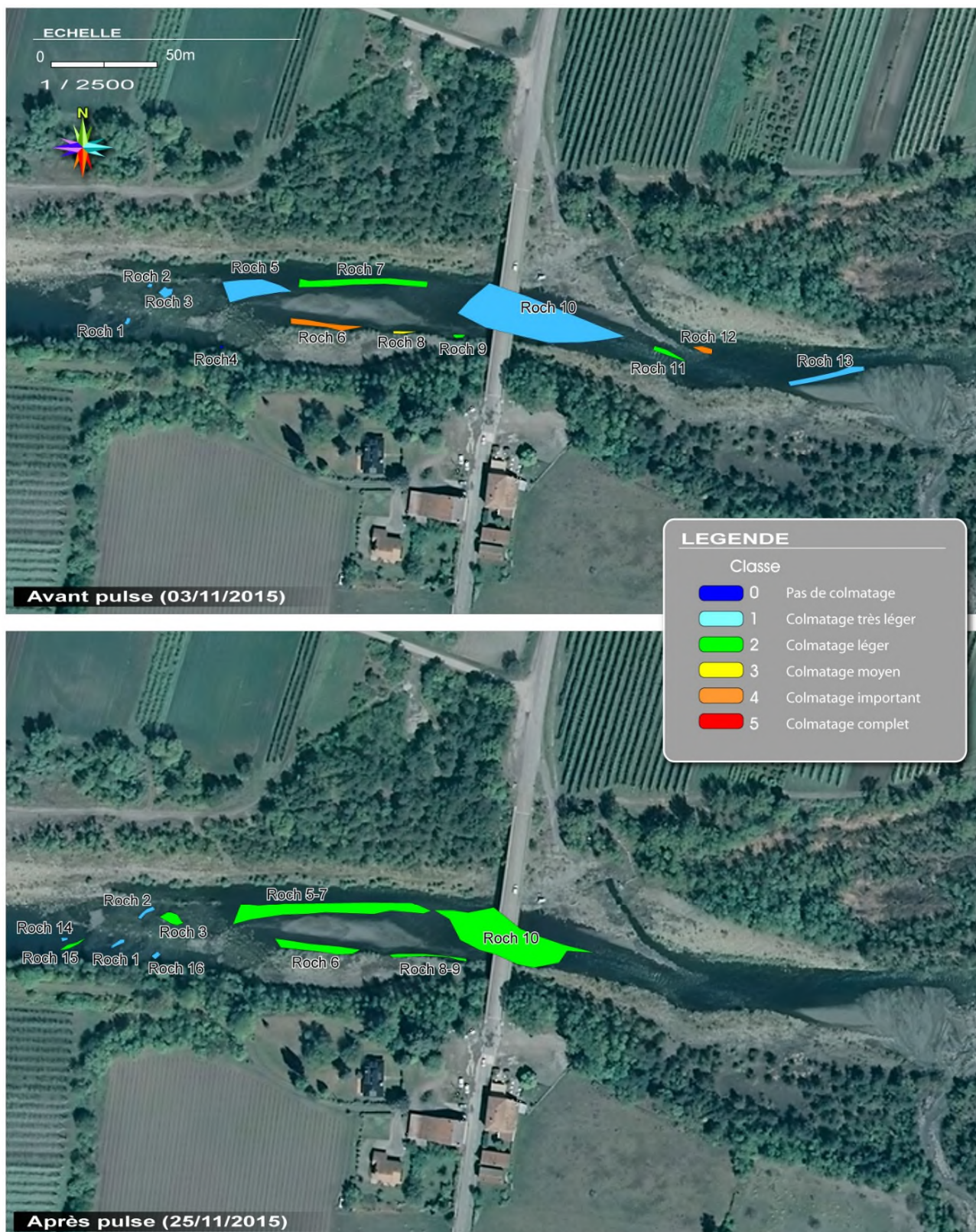
Concernant le dépôt de limon, la Figure 43 et la Figure 45 mettent en évidence :

- Une forte diminution de limon sur les frayères les plus colmatées,
- Un léger dépôt de limon généralisé sur l'ensemble des SFR. La classe de colmatage 1, qui prédominait avant pulse laisse la place à la classe 2.

Le niveau d'enchâssement ou de « colmatage Archambaud » du substrat dominant diminue fortement sur une grande majorité des surfaces potentielles de reproduction (76 %, Cf. Figure 44 et Figure 46). En moyenne, ce paramètre diminue d'une à deux classes par frayère potentielle. Après le lâcher d'eau, on ne retrouve plus de frayère potentielle présentant un niveau d'enchâssement de classe 4, soulignant l'effet positif du pulse. A l'inverse, on observe une forte augmentation de la classe 2, qui, on le rappelle, correspond à un faible niveau d'enchâssement et de colmatage.

Le pulse semble avoir eu dans un premier temps un effet de désenchâssement et de délimonement du substrat. Dans un second temps, un léger dépôt de limon s'est redéposé sur l'ensemble du site. Ce dépôt de limon peut être intervenue en fin de pulse, ou ultérieurement, avant la campagne de suivi.

A noter que l'enchâssement est un mécanisme plus profond que le dépôt de limons et aussi probablement bien plus pénalisant pour la reproduction de la truite. Aussi l'effet globale du pulse peut être considéré comme nettement positif sur ces indicateurs.

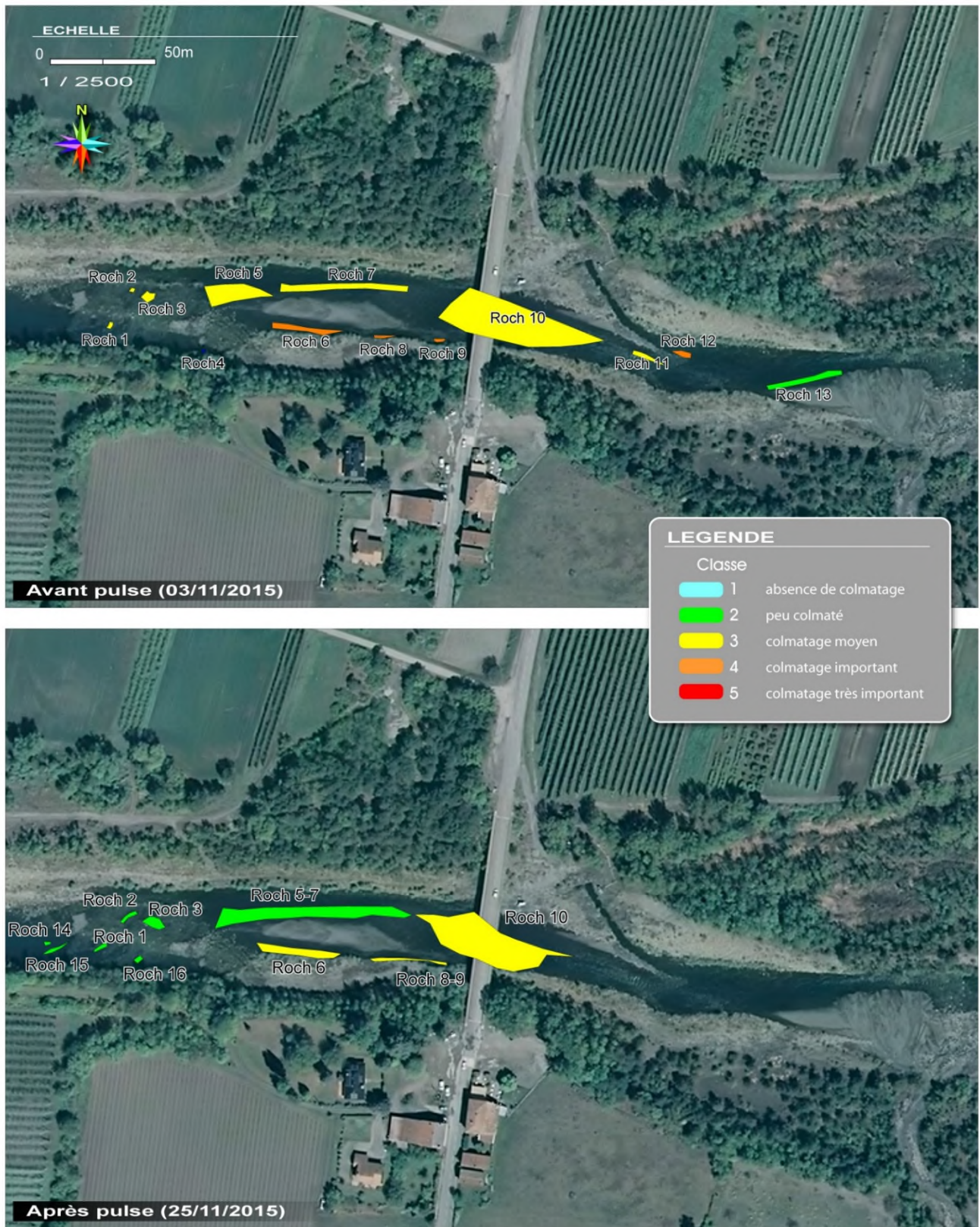


Surfaces potentielles de reproduction

Dépôt de limons

Secteur Rochebrune

Figure 45 : dépôts de limons sur les SFR avant et après pulse sur le site de Rochebrune



Surfaces potentielles de reproduction Enchâssement Secteur Rochebrune

Figure 46: enchassements sur les SFR avant et après pulse sur le site de Rochebrune

V.6.2 SECTEUR ARCHIDIACRE

- **Surface de frayères disponible**

La Figure 47 compare les surfaces potentielles de reproduction avant et après pulse. Celles-ci sont cartographiées dans la Figure 49.

Sur ce secteur, la surface potentielle totale de reproduction est beaucoup plus faible que sur le précédent.

Suite au pulse hydraulique, on observe une forte augmentation de la SFR. Cette augmentation reste toutefois inférieure à la diminution observée sur le site de Rochebrune (213 m²).

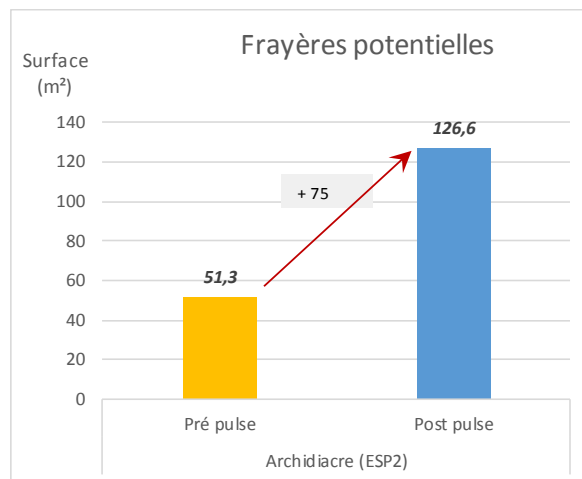


Figure 47 : Evolution des surfaces potentielles de reproduction sur le secteur d'Archidiacre

Comme sur le site de Rochebrune, ce site de reproduction de la truite est dépendant d'apport de matériaux d'un cône sédimentaire localisé juste en amont (La Breiche). La pulse à ici aussi permis la redistribution des matériaux ce qui a eu pour conséquences :

- La disparition d'une SFR localisée sur le cône sédimentaire. La granulométrie restée en place a été jugée trop grossière (Cf. Figure 48),
- L'apparition de frayères potentielles plus en aval.

Le bilan en termes de surface est positif.

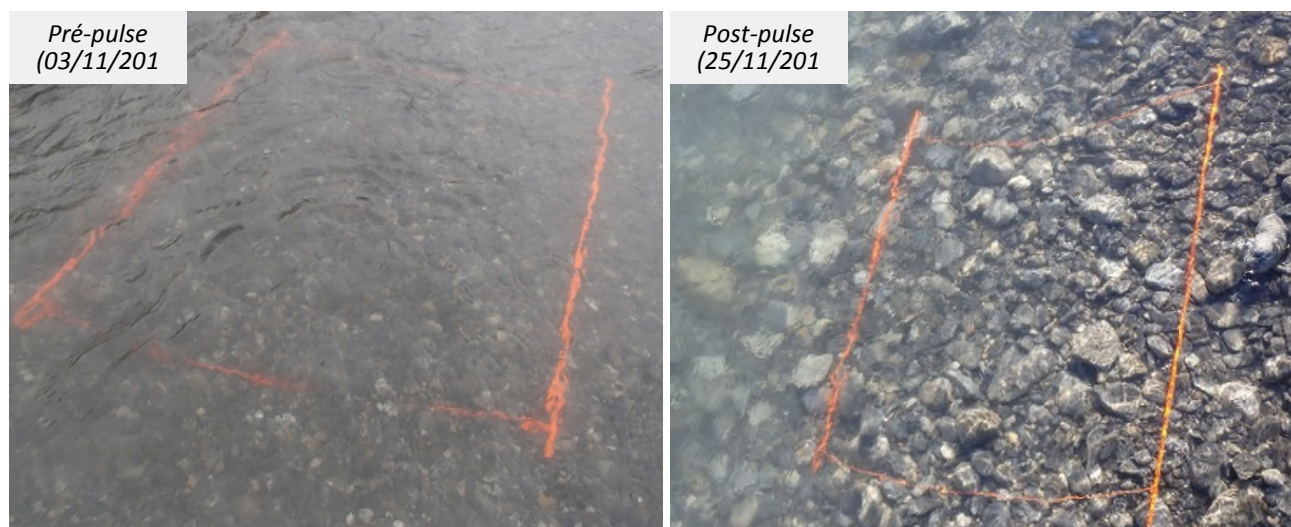


Figure 48 : Modification granulométrique sur le secteur d'Archidiacre après le pulse (SFR : Archi 4) – Les « graviers grossiers » visibles sur la photo de gauche (pré pulse) disparaissent au profit des « cailloux grossiers »



Surfaces potentielles de reproduction Secteur Archidiacre

Figure 49 : localisation des SFR et des placettes de mesure avant et après pulse sur le site d'Archidiacre

- Colmatage et enchâssement des frayères

Les effets du pulse de décolmatage sur les dépôts de limons et l'enchâssement des substrats est présenté dans les paragraphes qui suivent.

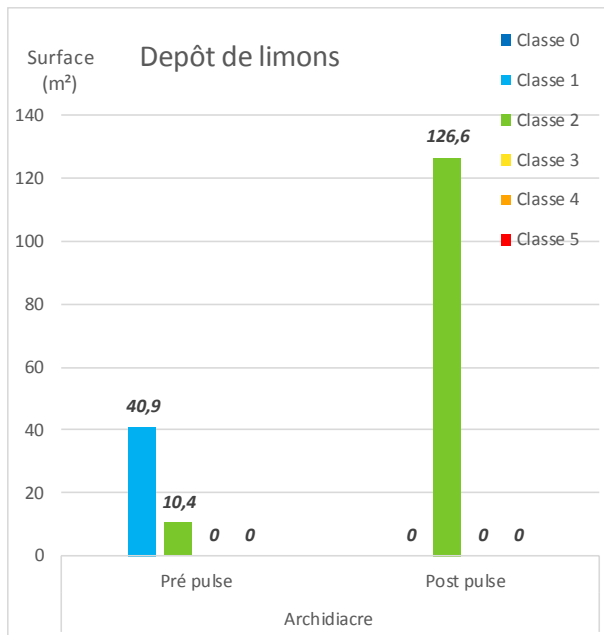


Figure 50 : intensité du dépôt de limons sur les SFR du secteur d'Archidiacre avant et après pulse

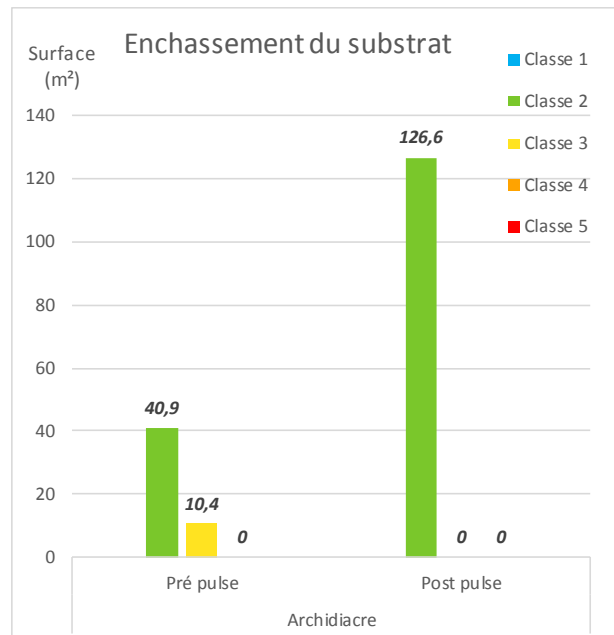


Figure 51 : enchâssement sur les SFR du secteur d'Archidiacre avant et après pulse

Concernant le dépôt de limon, les effets observés sur le secteur précédant restent d'actualité pour cette station, à savoir, une augmentation de faible intensité du niveau de colmatage superficiel (dépôt de fines) sur plusieurs frayères potentielles

Concernant le niveau d'enchâssement, Le pulse d'Espinasses n'a pas induit de forte modification au niveau du secteur d'Archidiacre si ce n'est une disparition de la classe 3 au profit d'un faible niveau d'enchâssement (classe 2).

Les mécanismes en œuvre sur les deux stations sont similaires.



Surfaces potentielles de reproduction Dépôt de limons Secteur Archidiacre

V.6.3 CONCLUSIONS SUR L'EFFET DU PULSE SUR LES FRAYERES

Les deux sites de frayères suivis ont pour point commun d'être localisés en aval d'un cône de déjections de deux petits affluents de la Durance. Ces cônes de déjections constituent une source de matériaux qui sont utilisés par les truites fario pour leur reproduction. Le pulse conduit à un remaniement et à une redistribution de ces matériaux ce qui a pour conséquence :

- un effet variable concernant la surface finale de matériaux disponibles. Le bilan est négatif sur Rochebrune mais positif sur Archidiacre. Le bilan final est une perte de surface de 7% à l'échelle de ces deux stations,
- un effet ambivalent sur les dépôts de limons. Les plus fortes classes de colmatage ne s'observent plus mais la classe de dépôt dominante est dégradée d'une classe. Elle reste néanmoins qualifiée de « colmatage léger »,
- un effet nettement positif sur l'enchâssement puisque tous les indicateurs s'améliorent.

Ce dernier paramètre est sans doute l'élément le plus important concernant la fonctionnalité des frayères et à ce titre, l'état des frayères potentielles peut être considéré comme amélioré.

Il convient donc de retenir que le pulse d'Espinasses 2015 a certes, induit une légère diminution des surfaces de reproduction sur les sites suivis mais ceci au profit de frayères potentielles de « meilleures qualités » (niveau d'enchâssement plus faible et diminution des substrats fortement colmatés par des fines).

Ce résultat pointe également l'importance des cônes alluvionnaires pour la reproduction de la truite fario. Le tronçon d'Espinasses comprenant 13 affluents, il serait sans doute intéressant d'envisager d'étendre le diagnostic sur d'autres sites.

VI CONCLUSIONS ET RETOUR D'EXPERIENCE

VI.1 PREMIERS ELEMENTS DE CONCLUSION SUR L'EFFICACITE DU PULSE 2015 D'ESPINASSE

Contrairement à l'année 2014, aucun facteur extérieur (épisode pluvieux, crue, etc.) n'est venu interférer avec les expérimentations en cours ce qui permet d'être plus conclusif sur l'efficacité du pulse 2015.

- **Efficacité hydraulique :**

Les indicateurs physico-chimiques sont positifs :

- Les modifications de température et d'oxygène dissous, liées à la mise en œuvre du pulse ne sont susceptibles d'impacter la composante biologique du tronçon.
- Un volume important de fines a été mise en suspension et exporté hors du tronçon court-circuité. Le pulse 2015 d'Espinasses a permis d'évacuer environ 2439 T de sédiments sur les 27,2 km linéaires.

- **Paramètres hydro-morphologiques :**

Du point de vue morphologique et granulométrique, le pulse 2015 a comme l'année précédente eu très peu d'effets sur ces deux composantes. L'énergie fournie par le pulse est en effet insuffisante pour induire des modifications à cette échelle. Seules les limons, sables et les graviers ont pu être déplacés. A noter que le suivi de frayères potentielles a mis en évidence une redistribution locale de matériaux issus cônes de déjections.

Concernant les dépôts de particules fines, ce nouvel indicateur mis en œuvre pour la première fois sur ce suivi de pulse met en évidence un résultat contrasté.

- Pour les trois stations amont, le bilan est globalement positif. Les classes de colmatage les plus fortes sont fortement réduites ou disparaissent après le pulse.
- Sur la station aval en revanche le bilan s'inverse. Un net re-dépôt de matériaux s'opère. Le suivi réalisé plusieurs semaines après pulse ne met pas en évidence de retour à l'état initial. L'effet est donc contraire aux objectifs recherchés.

S'agissant du niveau d'enchâssement, les indicateurs mettent en évidence des résultats de faibles intensités et disparates selon les niveaux d'enchâssements et de colmatages initiaux. Des effets sont observés sur les substrats les moins enchâssés tandis que ceux présentant de fortes intensités avant pulse n'ont pas évolué.

Concernant les mesures de conductivités hydrauliques, les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en évidence d'amélioration ni de dégradation du colmatage interstitiel à l'échelle stationnelle. Néanmoins, les résultats apparaissent reproductibles et cohérents ce qui laisse penser qu'une analyse plus large et/ou plus approfondie des données pourrait fournir un résultat.

- **Paramètres biologiques**

Le suivi du peuplement d'invertébrés montre un effet du pulse difficile à discerner. Une légère érosion de la diversité semble se dessiner sous l'effet de l'événement hydraulique mais il se cumule avec des évolutions temporelles variables selon les stations.

Le suivi de deux sites témoins de frayères potentielles pour la truite fario, espèce cible du tronçon, met en évidence :

- une légère diminution des surfaces de reproduction (-7%)
- mais ceci au profit de frayères potentielles de « meilleures qualités » (niveau d'enchâssement plus faible et diminution des substrats fortement colmatés par des fines).

Ce constat est encourageant et devra être croisé avec les résultats des suivis piscicoles. De même, pour aller plus loin sur ce volet d'analyses, il serait intéressant de rechercher l'existence d'autres sites de frayères potentielles en aval des cônes alluvionnaires des autres affluents.

VI.2 RETOUR D'EXPERIENCE METHODOLOGIQUE

La méthodologie est désormais stabilisée et permet une mise en œuvre reproductible et efficace des investigations.

Sur ce pulse a été mis suivi pour la première fois deux indicateurs complémentaires, afin de mieux comprendre l'effet du pulse, vis-à-vis des objectifs poursuivis.

L'effet du pulse sur les frayères potentielles de truite fario, espèce cible du tronçon, a été recherché. Ce suivi a permis de mettre en évidence un effet positif concret sur la qualité du support.

Le suivi du colmatage superficiel, jusque-là principalement basé sur l'évaluation de l'enchâssement par la méthode d'Archambaud, a été complété par une quantification du dépôt de limon. L'indicateur suivi jusque-là était basé sur une grille dont les critères d'évaluations cumulent le niveau d'enchâssement et les quantités de limons en sous couche. Cette grille manquait de sensibilité, comme cela avait été abordé précédemment (rapport Saulce 2014/2015 et Espinasses 2014). Elle concernait néanmoins un phénomène dont l'importance biologique est importante. Le suivi du dépôt de limons, mis en œuvre cette année est plus sensible. Il met en évidence des mécanismes d'érosion de limons, mais aussi de re-dépôts sur certaines stations. Il concerne toutefois un phénomène d'importance moindre. Le cumul de ces deux indicateurs devrait permettre un meilleur diagnostic sur les prochains suivis.

Concernant les caractéristiques hydrauliques du pulse, la question du débit optimal persiste. Il va se révéler compliquer de comparer différentes hypothèse sur plusieurs années, tant les conditions initiales de colmatage paraissent variables. Le scénario expérimental abordé en V.1.3.d, consistant à segmenter le pulse en plusieurs paliers nettement différenciables, pourrait permettre d'isoler l'effet des différents débits sur la quantité de MES arrachée.

BIBLIOGRAPHIE

Braud et al ., 2013, Synthèse des connaissances – proposition d’une méthode d’évaluation de l’impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d’eau, DREAL Centre

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, ONEMA -CEMAGREF

Gayraud S., Hérouin E., Philippe M., 2001, Le colmatage minéral du lit des cours d’eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macro-invertébrés, Bull. Fr. Pêche Piscic. (2002) 365/366 : 339-355.

GA T90-733, 2012, Guide d’application de la norme expérimentale XP-90-333 :2009 (prélèvements des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes), mars 2012, p. 23.

RefMADI, 2013, Référentiel Milieux Aquatiques Documents d’Incidence, Dénombrement des frayères de Truites fario – Méthodes, ONEMA

SAGE-Environnement, 2014, suivi piscicole pluriannuel de la Durance 2014-2019, EDF-CIH, mars 2015.