GIS Draix
Étude de l'érosion en montagne

ORE Draix Bléone

Réunion du GIS Draix et de l'ORE Draix-Bléone
Grenoble, 14 janvier 2014

Quantification des flux particulaires dans le Rhône du Léman à la mer,

dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR)

J. Le Coz et M. Launay

Contributeurs principaux :

H. Angot, C. Antonelli, M. Coquery, F. Eyrolle-Boyer, G. Fantino, S. Gairoard, M. Lagouy, C. Le Bescond, J. Panay, O. Radakovitch, P. Raimbault, F. Thollet

irstea

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

cnrs

Aix*Marseille université

mio
Institut Méditerranéen d'Océanologie

Enjeux liés aux flux solides du Rhône

1er export du territoire français métropolitain vers les océans
1ère source d'apport fluvial à la Méditerranée

Territoires et forçages hydro-météorologiques contrastés (depuis le Léman jusqu'à la mer, des glaciers à la Camargue)

Un fleuve fortement aménagé : hydro-électricité, navigation, irrigation, eau potable

Nombreuses pressions polluantes : Industries chimie/nucléaire, axe de transport européen, agglomérations, agriculture, etc.

Crise des PCB

Contentieux autour des chasses de barrage

Convention de Barcelone sur les flux à la Méditerranée

Apports solides de la crue de septembre 2002 au Golfe du Lion

© J. Descloitre, MODIS Land Rapid Response Team, NASA/GSFC, nasaimages.org

Questions de recherche sur les flux de matière dans le Rhône

Quantifier

Stratégie d'observation → capturer la variabilité spatio-temporelle)
Analyse et réduction des incertitudes → métrologie, bancarisation
Reconstituer les flux passés → co-variables, estimations, modèles

Interpréter

Caractéristiques des particules → granulométrie, Carbone organique, contamination...
Identifier les sources → traceurs, hydrologie, analyse spatiale
Historique des contaminations → archives sédimentaires

Modéliser

Apports des bassins-versants → modélisation hydrologique distribuée
Routage des flux dans le réseau hydrographique → modélisation hydraulique

L'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR)

Programme de recherche finalisée :
partenaires scientifiques et gestionnaires

ZABR, OHM-VR et plan Rhône
Projets 2009, 2010-2013, 2014, 2015-2018

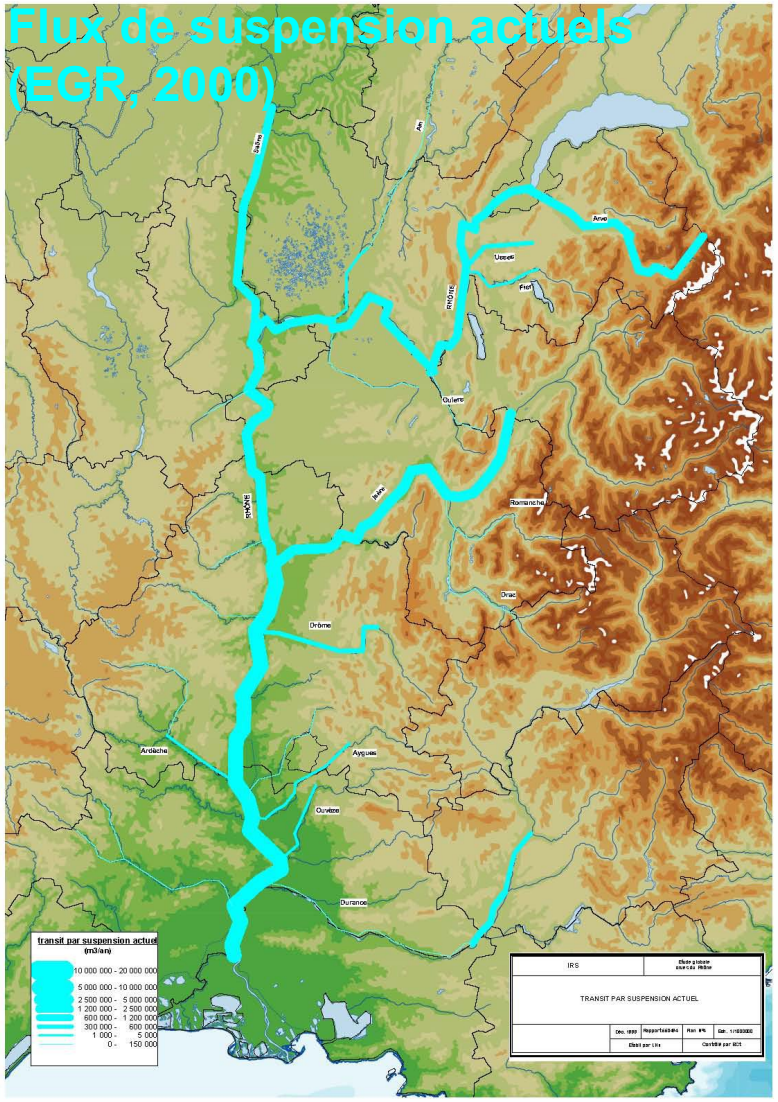
4 axes de recherche :

1- charge de fond et géométrie du chenal
2- sédimentation et morphologie du lit majeur
3- réseau de suivi des flux (MES et contaminants)
4- sources et devenir des contaminants

Analyse des échantillons de MES :

Métaux (Cerege)
Radio-éléments (IRSN)
Organiques et mercure (Irstea, Ifremer)

Connaissances pré-existantes à l'OSR et lacunes à surmonter



Des estimations incertaines et lacunaires des flux particulaires du Rhône

→ Étude Globale Rhône (EGR, 2000)
→ suivi Agence Eau&MES (1991-2009)
→ station-observatoire SORA et stations turbidimétriques éparses
→ suivi des sédiments et étude des archives sédimentaires (suivi sédiments Agence, carottes ENTPE, projet TSIP-PCB, etc.)

Des verrous méthodologiques liés à l'échantillonnage temporel discontinu

→ prélèvements manuels ou par centrifugation, avec peu de documentation des crues
→ peu de caractérisation des particules
→ méthodes de calcul des flux à partir de mesures discontinues : approche statistique par le projet Variflux

Disponibilité et variabilité des paramètres mesurés par les réseaux classiques

$$\Phi_c = \int_{t_1}^{t_2} Q(t)\ C_s(t) C_c(t)\ dt \longrightarrow \Phi_c = \sum_{i=1}^{N} \Phi_{c,i} = \sum_{i=1}^{N} Q_i\ C_{s,i}\ C_{c,i}\ T_i$$

Mesure : Continue Discontinue Rare ou absente

Variation	Intérêt	Débit (eau)	Concentration en MES	Teneur en contaminants dans les MES
Temporelle	Quantification des flux événementiels et moyens	1 → 100	1 → 10 000	??
Spatiale	Comparaison des contributions des affluents	1 → 1000	1 → 100	PCBs : 1 → 10 ? Hg : 1 → 10 ?

La variabilité temporelle des flux vient surtout de la concentration en MES.
La variabilité spatio-temporelle des teneurs est généralement mal documentée.

Stratégie d'observation des flux de l'OSR

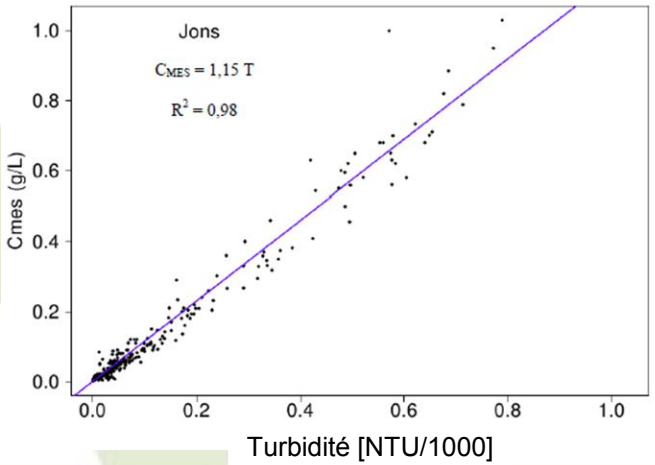
Des techniques de mesure et de prélèvement adaptés à :

un meilleur suivi temporel

→ turbidimètres étalonnés pour le suivi des MES
→ pièges à particules (prélèvement intégratif)
→ centrifugations bihebdomadaires à Arles et Jons
→ suivi renforcé des événements hydro-sédimentaires

une meilleure couverture spatiale

→ réseau structuré de stations permanentes
→ stations temporaires et documentation des affluents
→ collaboration entre équipes pour prélèvements et analyses



Le réseau de stations de mesure des flux MES

Bonne couverture du Haut-Rhône, de l'exutoire et des 4 affluents sédimentaires majeurs (Arve, Saône, Isère, Durance)

Deux stations-observatoires avec suivi intensif

- → Arles (SORA) opérationnelle depuis 2002, avec suivi récent de la granulométrie et de certains nouveaux éléments
- → Jons opérationnelle depuis septembre 2011 et avec centrifugeuse fixe depuis juin 2013

Stations de suivi en continu (Mes + contaminants)

Turbidimètres fixes : OSR

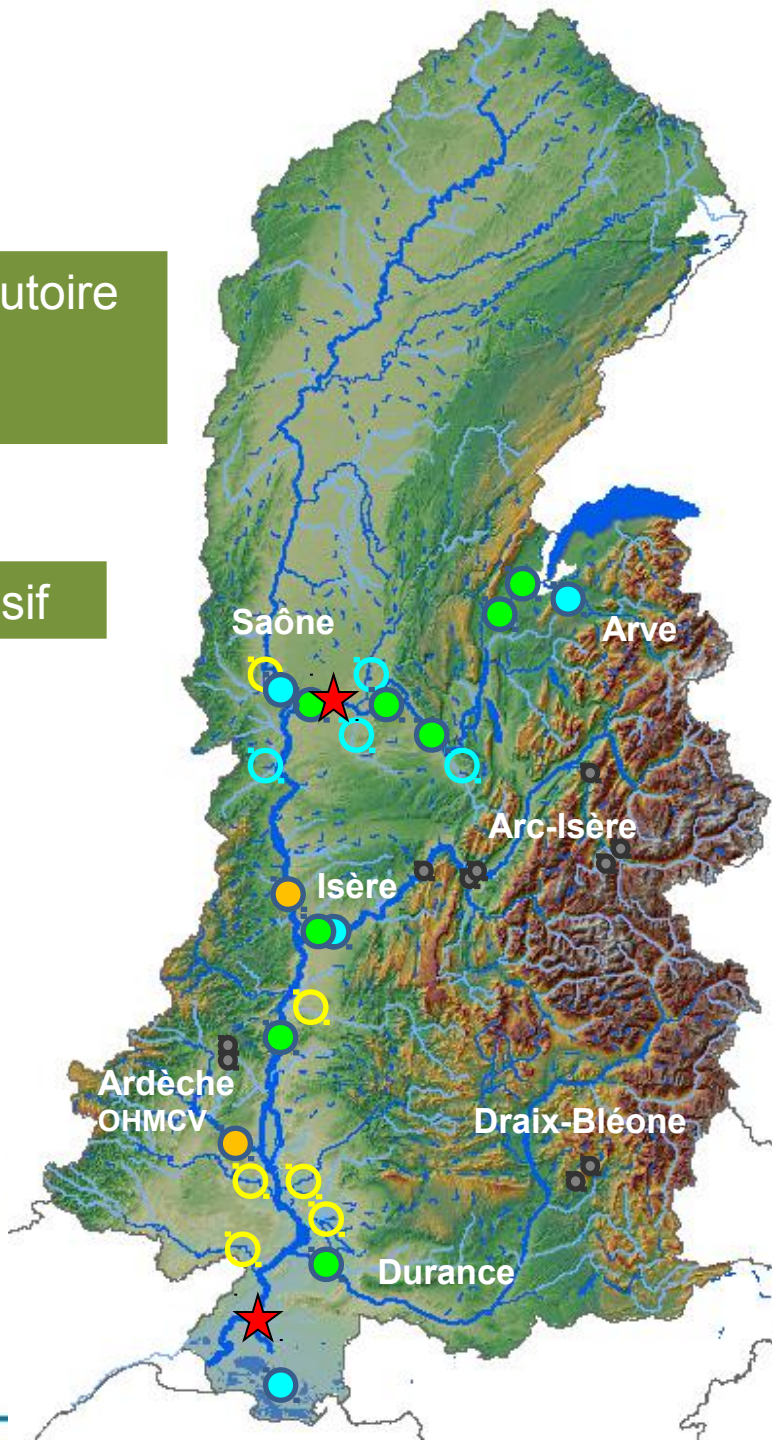
Partenaire

Turbidimètres mobiles :

Possible turbidimètres fixes :

Possible turbidimètres mobiles :

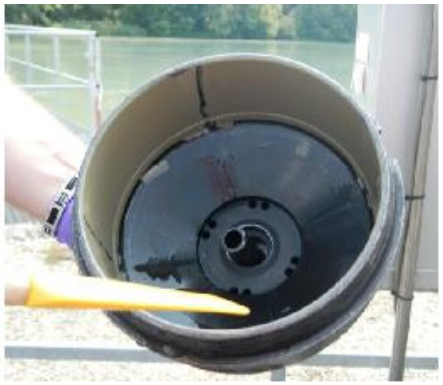
Autres points de mesure :

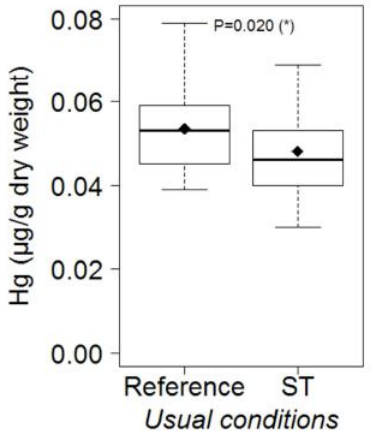


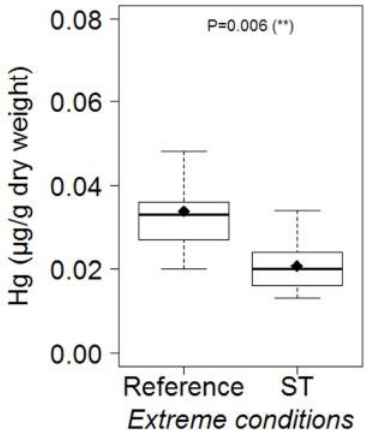
Les teneurs en contaminants dans les MES : méthodes de prélèvement et d'analyse

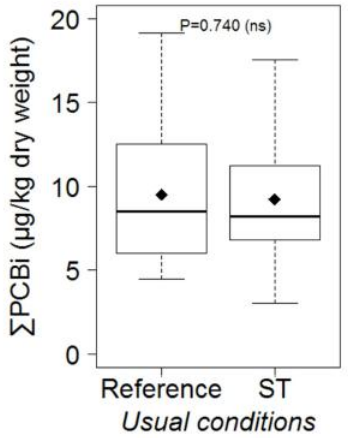
La caractérisation des particules en granulométrie et COP est souvent nécessaire pour corriger et normaliser les teneurs

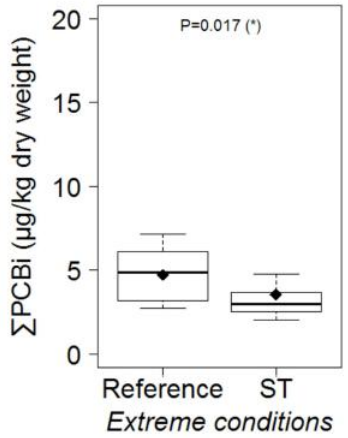
→ techniques de prélèvement complémentaires : centrifugation et pièges à particules (ou dépôts de crue)
→ développement d'une méthode de correction granulométrique pour les prélèvements potentiellement biaisés
→ documentation des protocoles de prélèvement et d'analyse : granulométrie, métaux, organiques (dont PCBi), mercure, radio-éléments



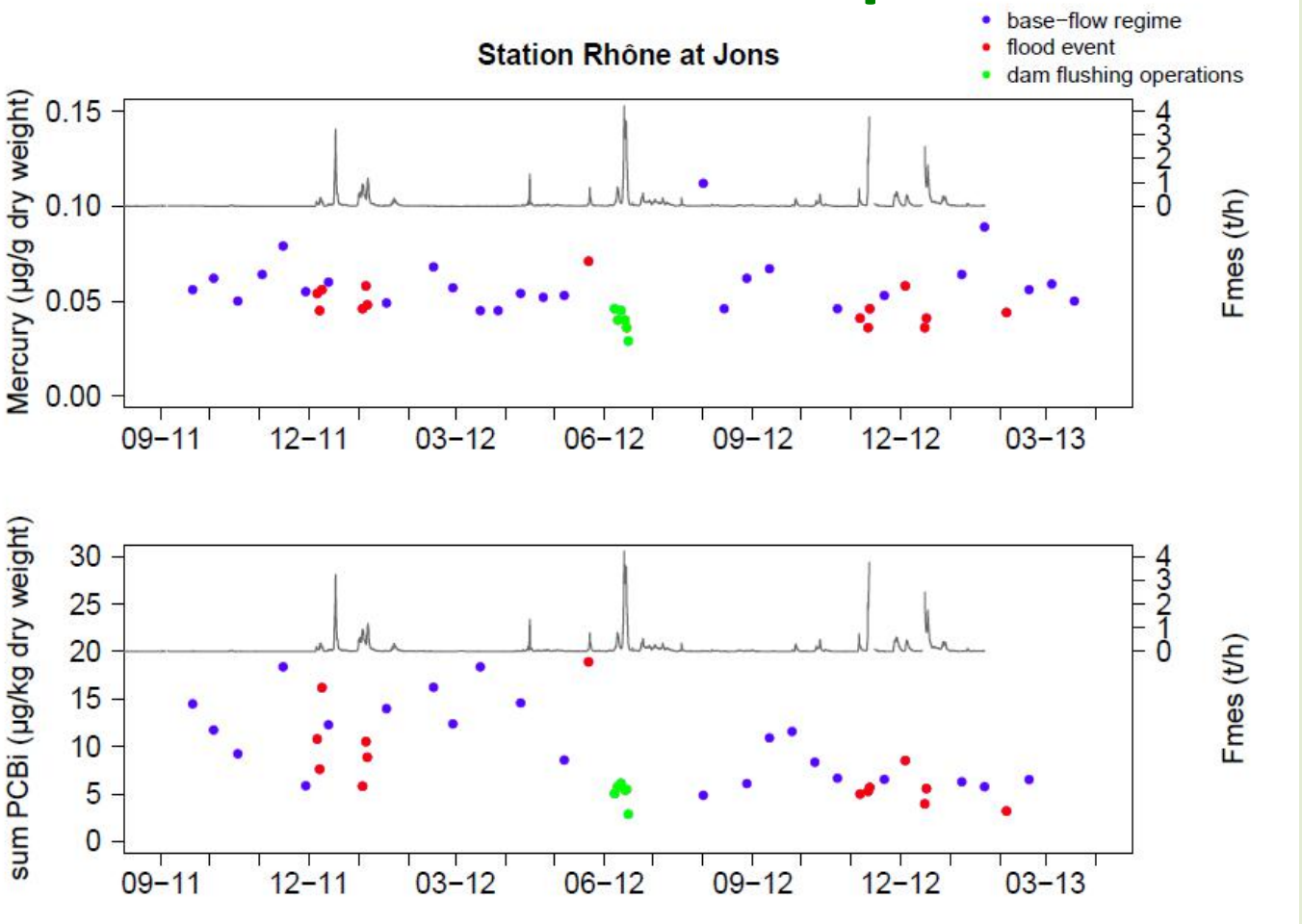








Les teneurs en contaminants dans les MES : variabilité temporelle



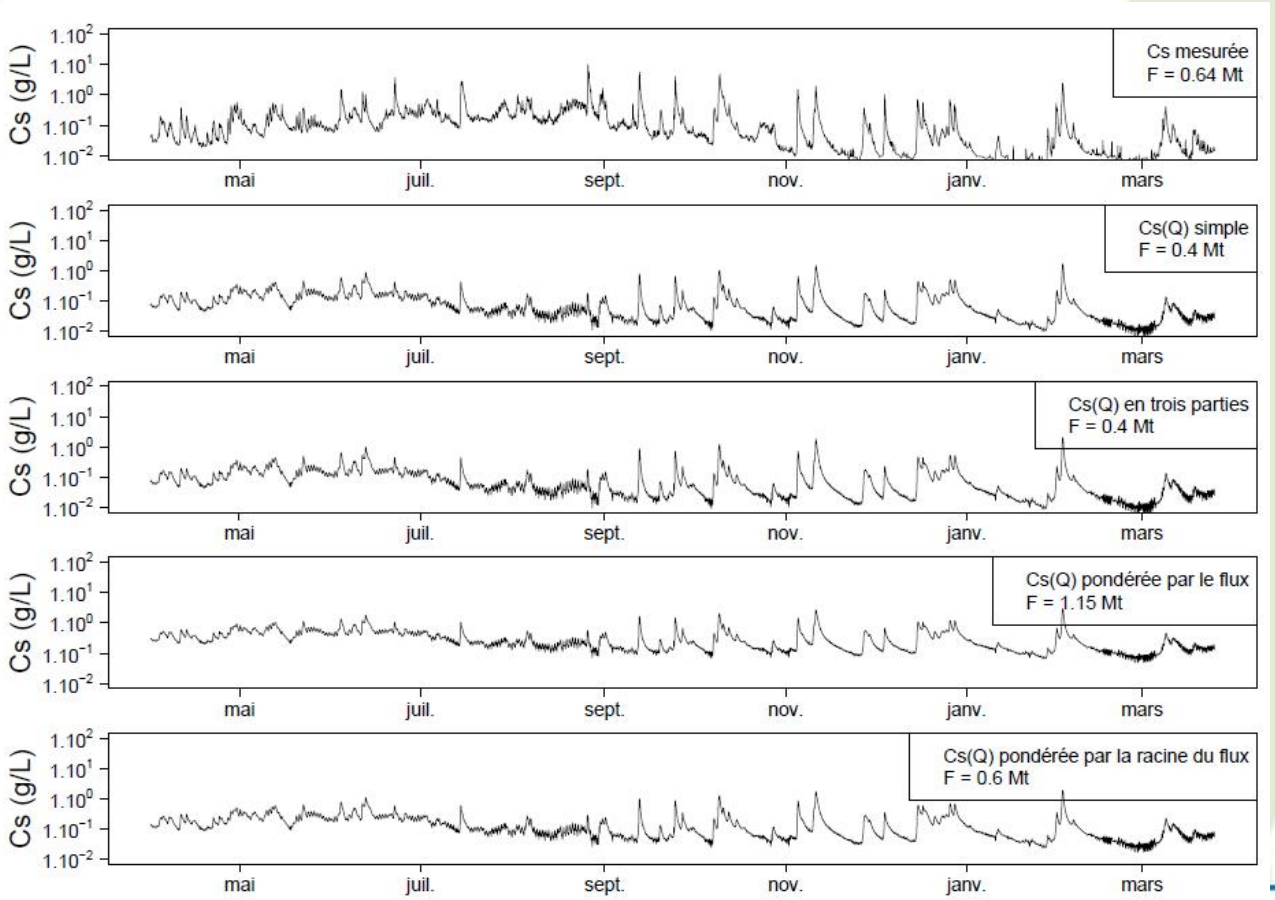
Variabilité des teneurs Hg/PCBi à Jons modérée mais corrélée aux événements et changements de nature des particules
→ à prendre en compte pour l'établissement des flux

Les méthodes de calcul des flux de MES

Une approche basée sur la mesure ou modélisation de chroniques continues

→ aucune méthode de calcul ne permet d'obtenir des incertitudes réduites sur les flux en l'absence d'un suivi continu des MES (ex : Arve 1965-2009)

→ le calage d'une relation débit-concentration ne permet d'estimer que l'ordre de grandeur des flux de MES, avec des incertitudes fortes



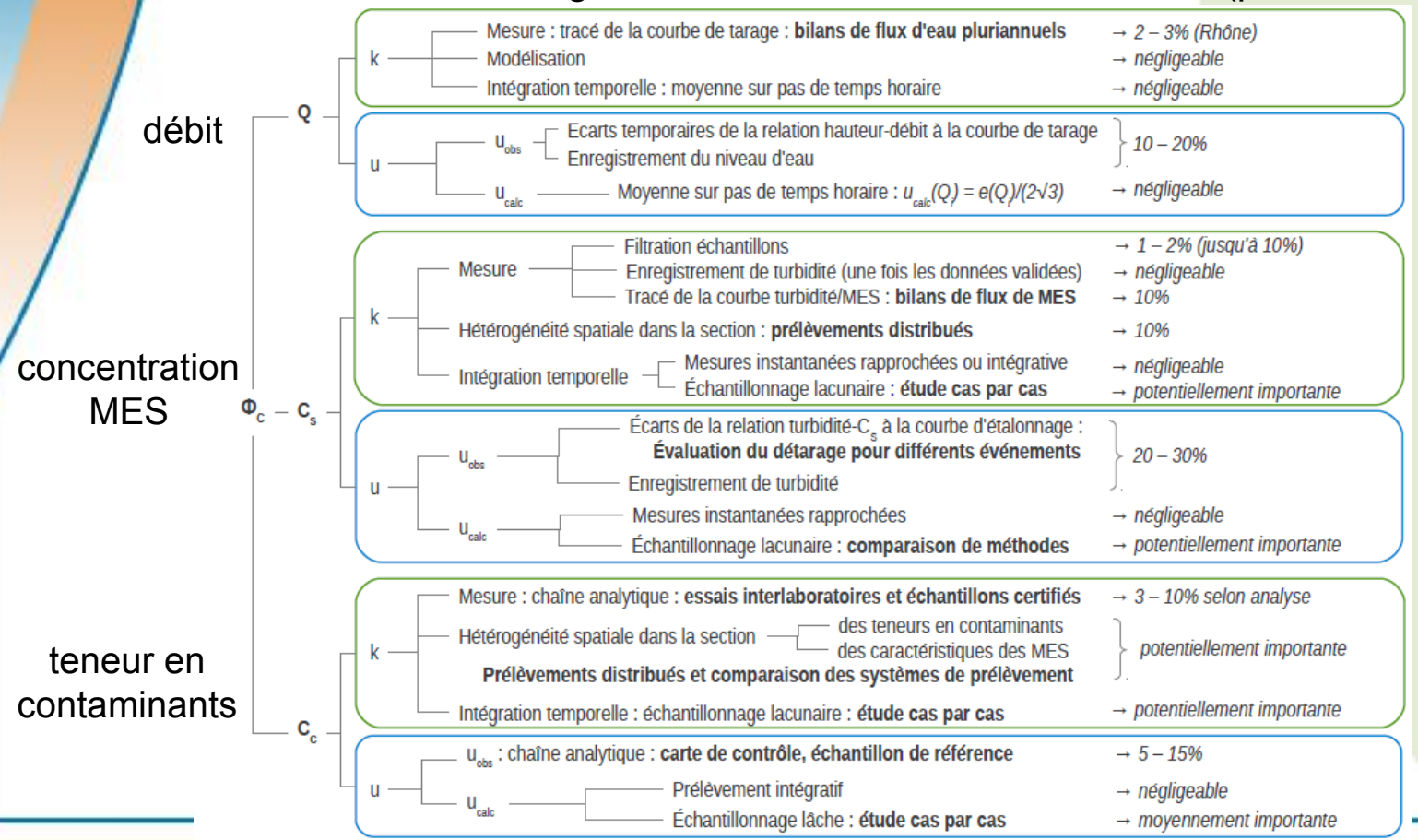
Evaluation de courbes de tarage sédimentaires sur l'Arve à Genève en 2012-2013

Difficile de reproduire à la fois la dynamique des concentrations et le bon flux moyen

Analyse des incertitudes sur les flux mesurés

Développement d'une méthode-cadre inspirée du GUM (JCGM, 2008)

→ mise en équation du modèle d'erreur
→ identification des sources d'incertitudes
→ hiérarchisation et quantification des composantes d'incertitude
→ estimation de marges d'incertitude sur les flux mesurés (pas reconstitués)



Effets systématiques

Effets aléatoires

Analyse des incertitudes sur les flux mesurés

Développement d'une méthode-cadre inspirée du GUM (JCGM, 2008)

→ mise en équation du modèle d'erreur
→ identification des sources d'incertitudes
→ hiérarchisation et quantification des composantes d'incertitude
→ estimation de marges d'incertitude sur les flux mesurés (pas reconstitués)

Mais le calcul n'est pas encore implémenté...

En attendant, des valeurs réalistes d'incertitude sont proposé à titre indicatif :

- **(-) : incertitude 20 à 30 %**
  → flux mesuré

- **(?) : incertitude ~50 %**
  → flux reconstitué à partir d'un nombre suffisant de données

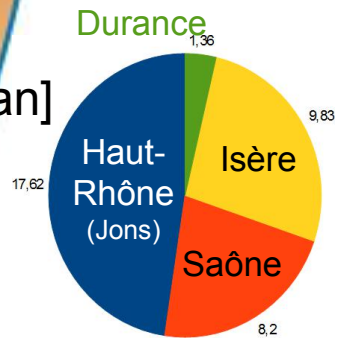
- **(? ?) : incertitude ~100 %**
  → flux reconstitué à partir d'un faible nombre de données

Les flux mesurés par l'OSR en 2011-2012

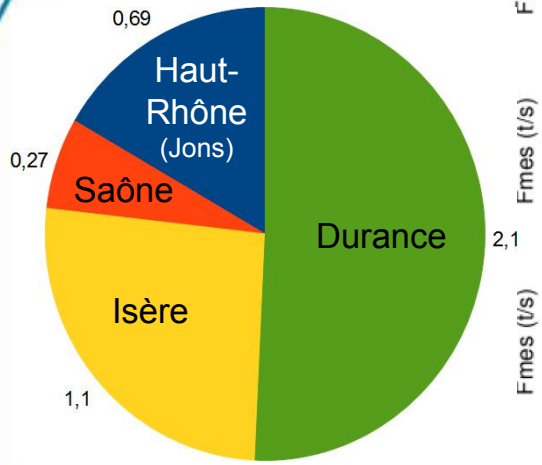
Des dynamiques et des intensités de flux de MES très contrastées

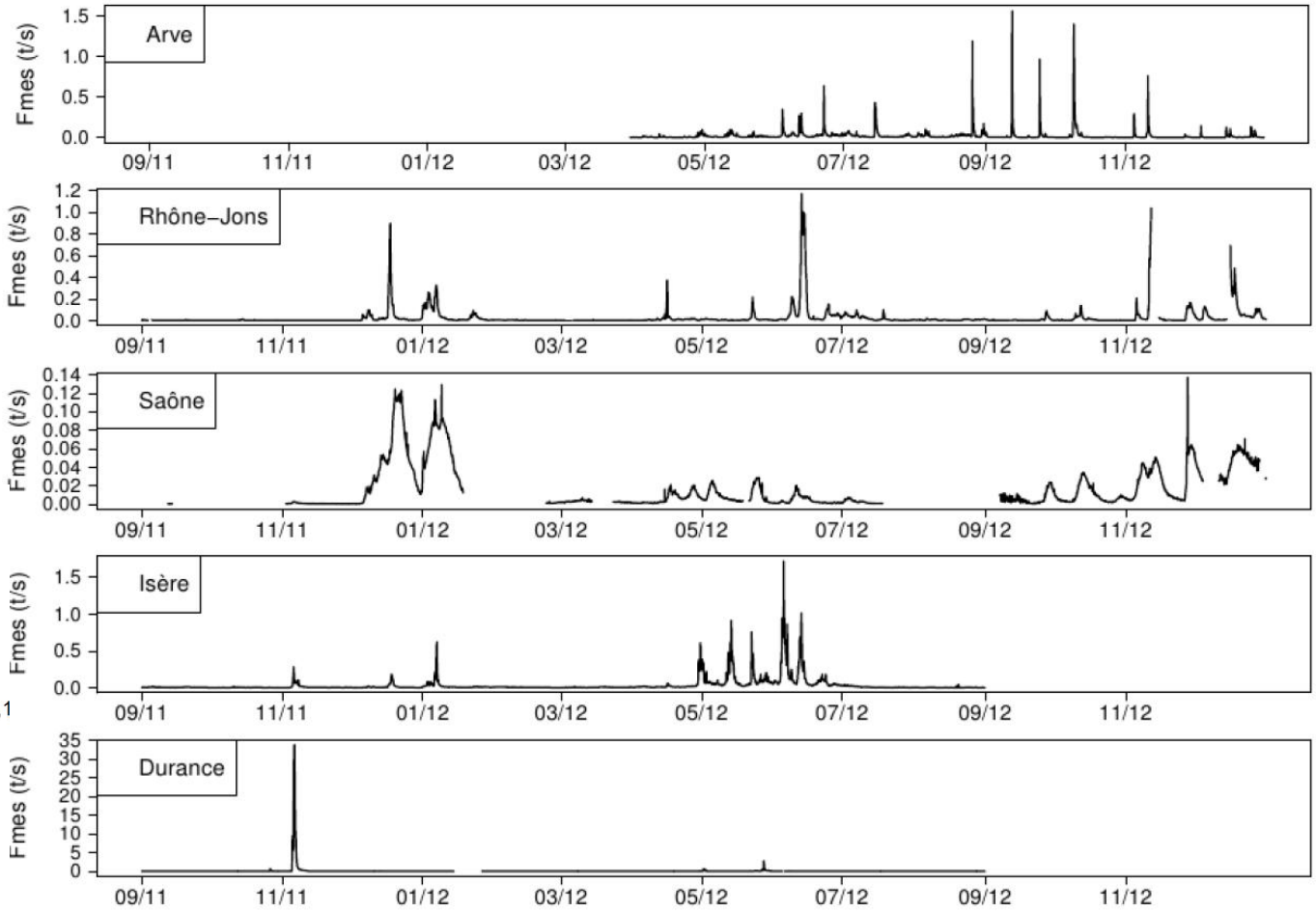
→ les cycles hydrologiques et sédimentaires se découpent mieux de septembre à août qu'en années civiles

Eau [km3/an]



MES [Mt/an]

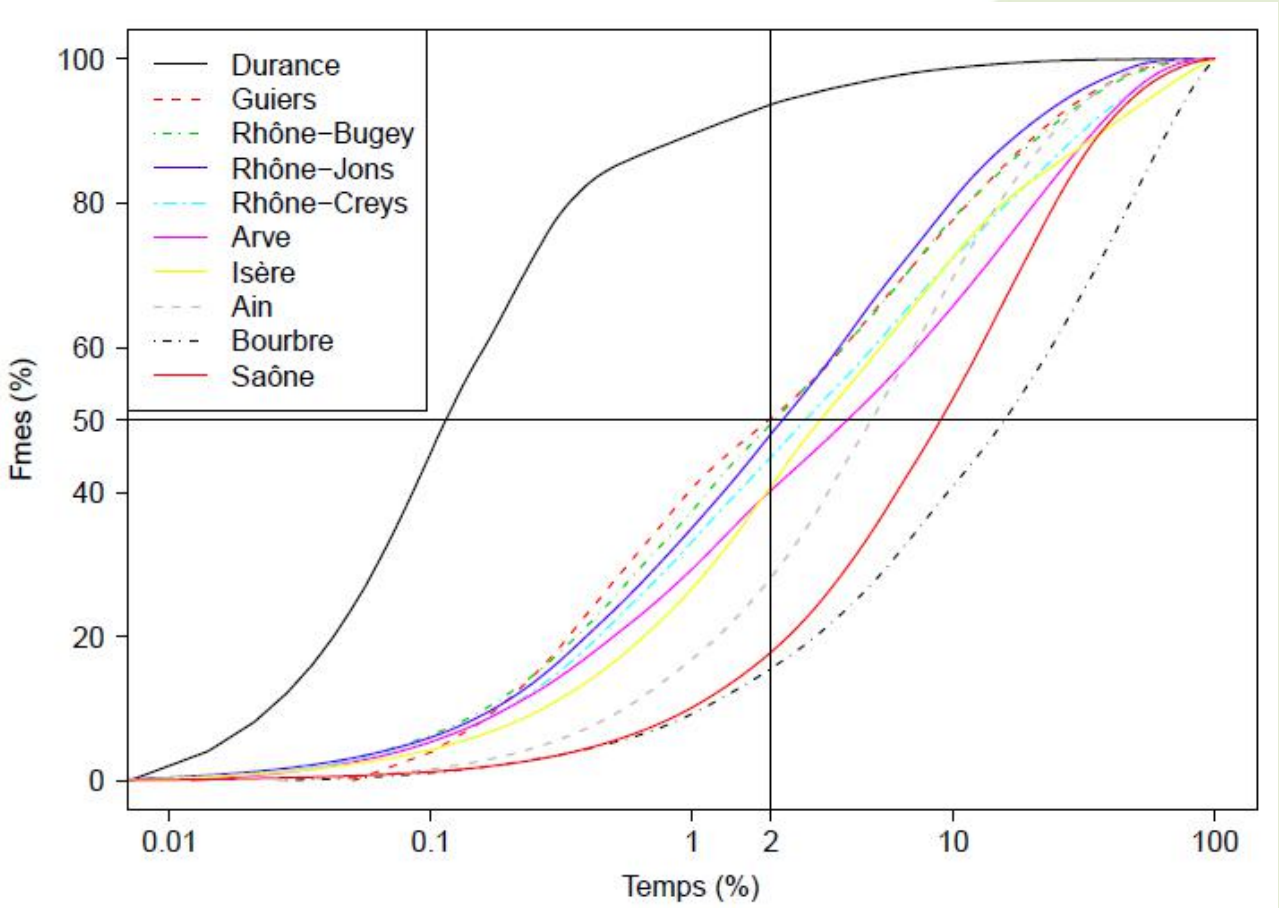




Les flux mesurés par l'OSR en 2011-2012

Des dynamiques et des intensités de flux de MES très contrastées

→ Importants écarts de l'indicateur Ms2 % (Variflux) de la Saône à la Durance



Flux cumulé de MES maximal transitant en fonction du temps cumulé (2011-2012)

Les flux mesurés par l'OSR en 2011-2012

Stations-observatoires : le Rhône à Arles et à Jons
Substances-cibles : métaux, Hg, PCB, radio-éléments

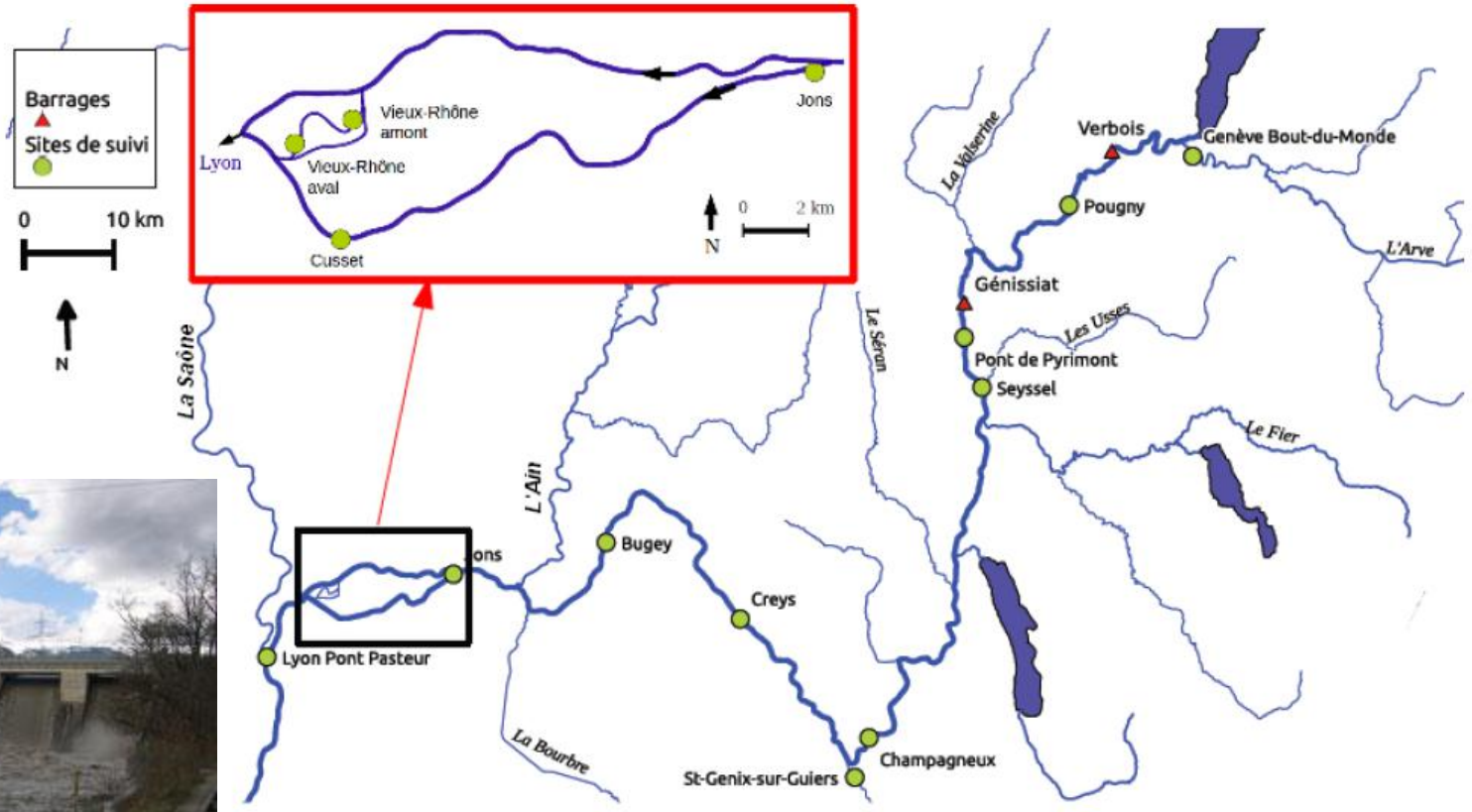
→ le suivi en continu doit se poursuivre sur plusieurs années, mais il apporte déjà un éclairage nouveau sur les flux
→ poids des événements suivis sur la période 2011-2012
→ intérêt d'une analyse des apports : affluents sources, caractéristiques des particules

	Flux de MES (Mt/an)		Flux de Hg (kg/an)		Flux de PCBi (kg/an)	
Station	**Arles**	**Jons**	**Arles**	**Jons**	**Arles**	**Jons**
Année 2011	2,7	0,21	300	13	30	1,4
Année 2012	5,6	0,89	610	47	80	6,2

→ importance des apports de MES entre Jons et Arles (facteur 6 à 12)
→ différences accrues pour Hg et PCBi : forte augmentation des teneurs à Arles
→ année 2011 plus contrastée entre Jons et Arles : année sèche avec crues méridionales en fin d'année

Chasses d'hydro-curage des retenues suisses et abaissement de Génissiat (juin 2012)

Objectif : compléter les suivis réglementaires pour mesurer finement la dynamique des flux de MES à l'échelle du Haut-Rhône



Barrage de Verbois pendant une crue d'Arve (SIG)

Chasses d'hydro-curage des retenues suisses et abaissement de Génissiat (juin 2012)

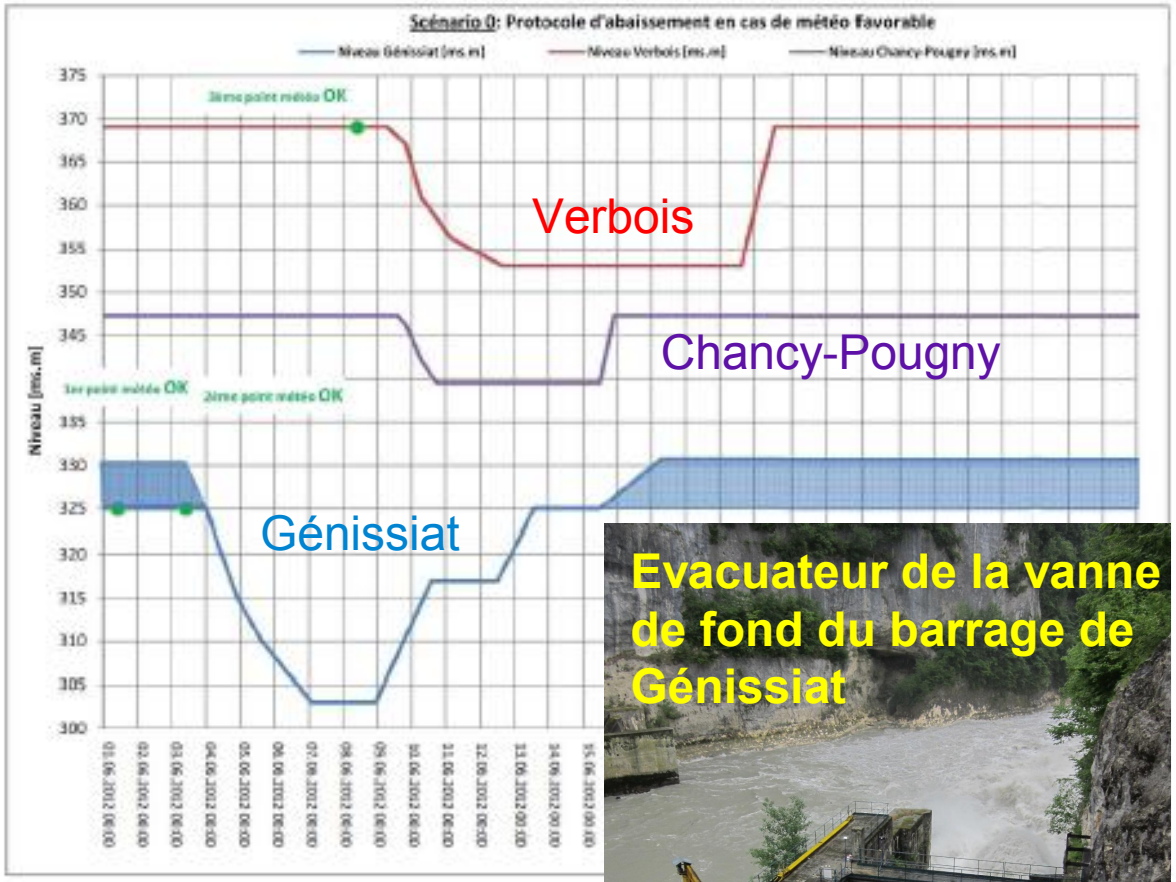
1ère semaine :
abaissement de Génissiat

2ème semaine :
chasse de Verbois

Régulation des concentrations en MES à l'aval de Génissiat :

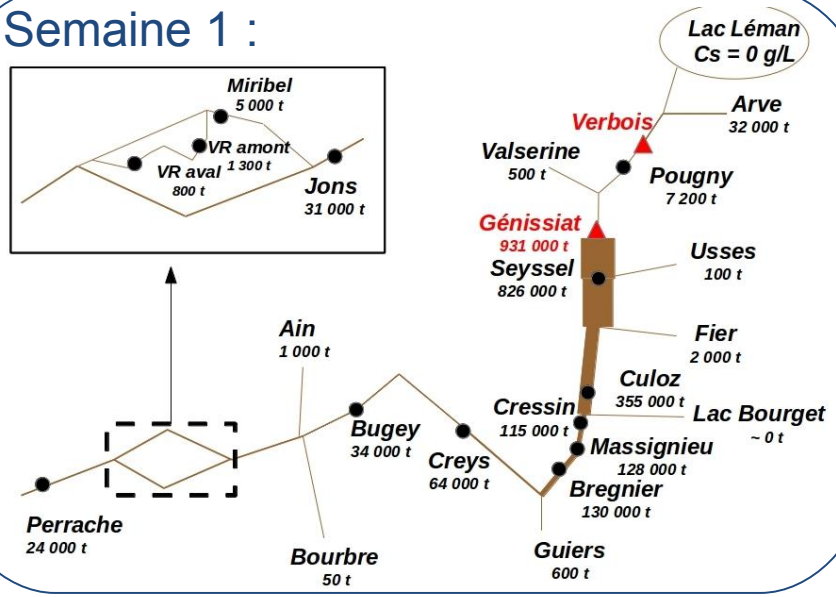
5 g/L max (moyenne)
10 g/L max (6 heures)
15 g/L max (15 min)

Prévision du volume de sédiment chassé de la retenue de Verbois :
1,7 million m³
soit ~2,2 Mt

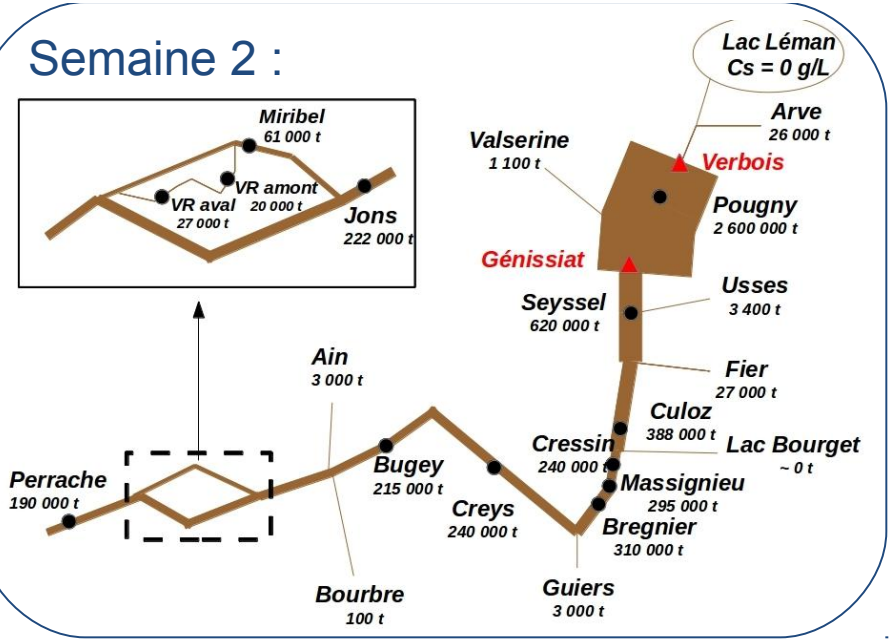


Impact des opérations de chasse 2012 sur les flux particulaires ?

Semaine 1 :



Semaine 2 :



Flux de MES quantifiés à Jons :

Semaine 1 : 0,03 Mt

Semaine 2 : 0,22 Mt

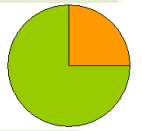
Total : 0,25 Mt

► près de 30% du flux annuel de MES 2012
~ crue

Flux de mercure quantifié à Jons : 10,8 kg

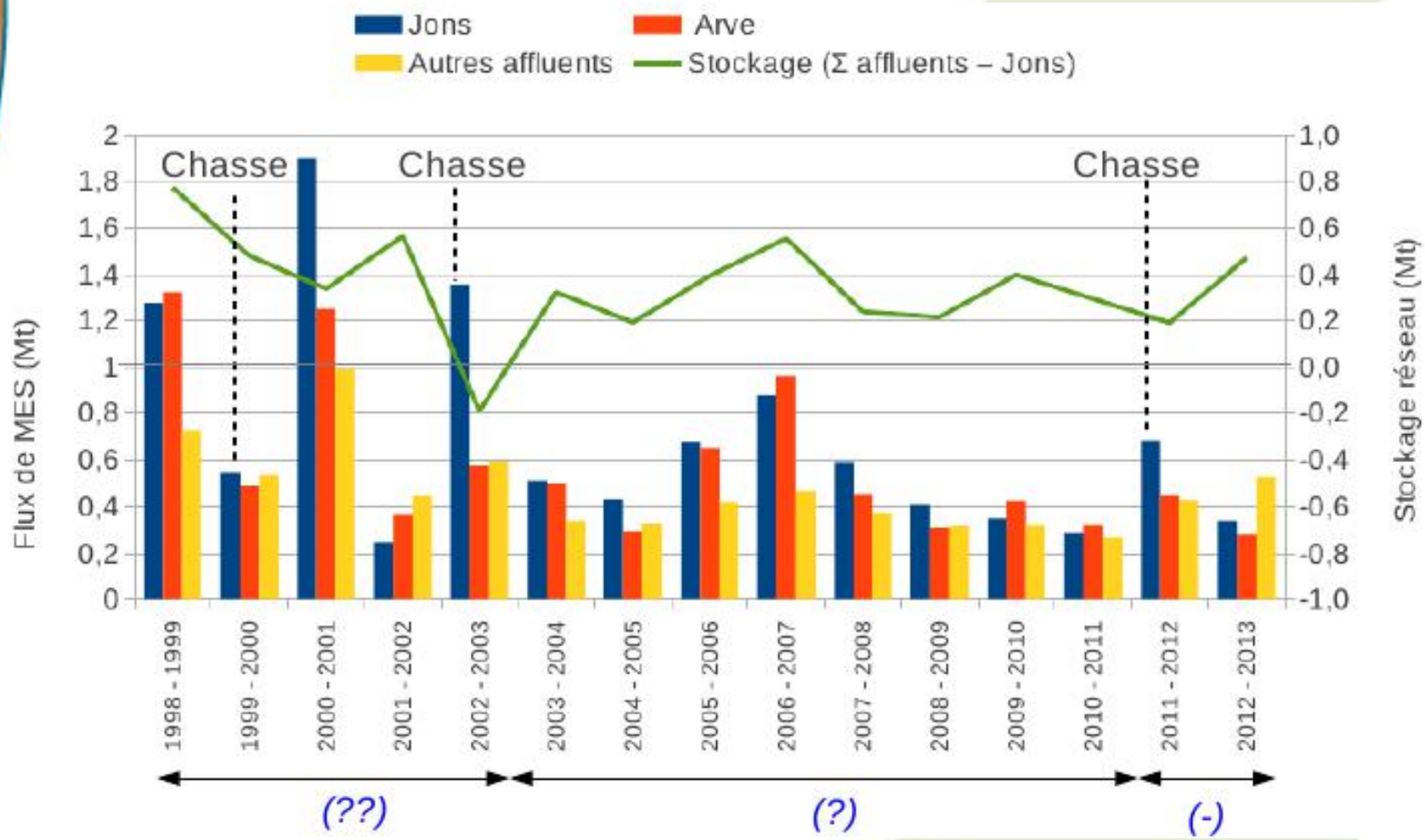
Flux de ∑PCBi quantifié à Jons : 1,5 kg

► près de 25% des flux annuels 2012
~ crue



→ Les flux de contaminants sont contrôlés par les flux de MES

Reconstitution des flux de MES cumulés du Haut-Rhône : Une estimation (incertaine) du stockage dans le réseau hydrographique (réservoirs, marges, annexes...)

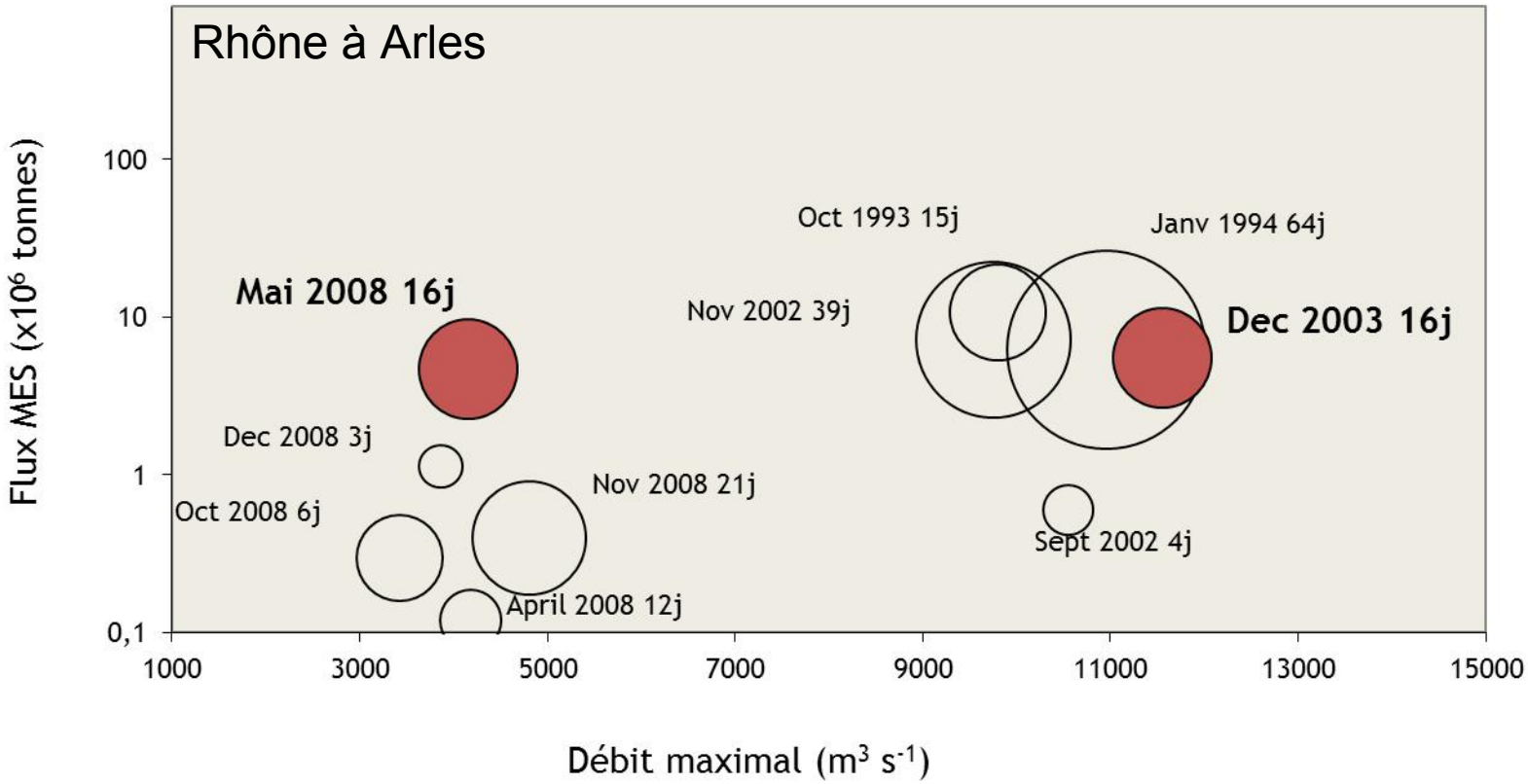


Fort impact des événements sur le flux annuel, lissé à l'échelle pluriannuelle

Estimation très incertaine des flux du Fier : surestimation du stockage ?

Crue semi-anthropique de mai-juin 2008

Objectif : reconstituer la dynamique des flux de MES l'échelle intra-événementielle et régionale



Eyrolle et al. (2012)

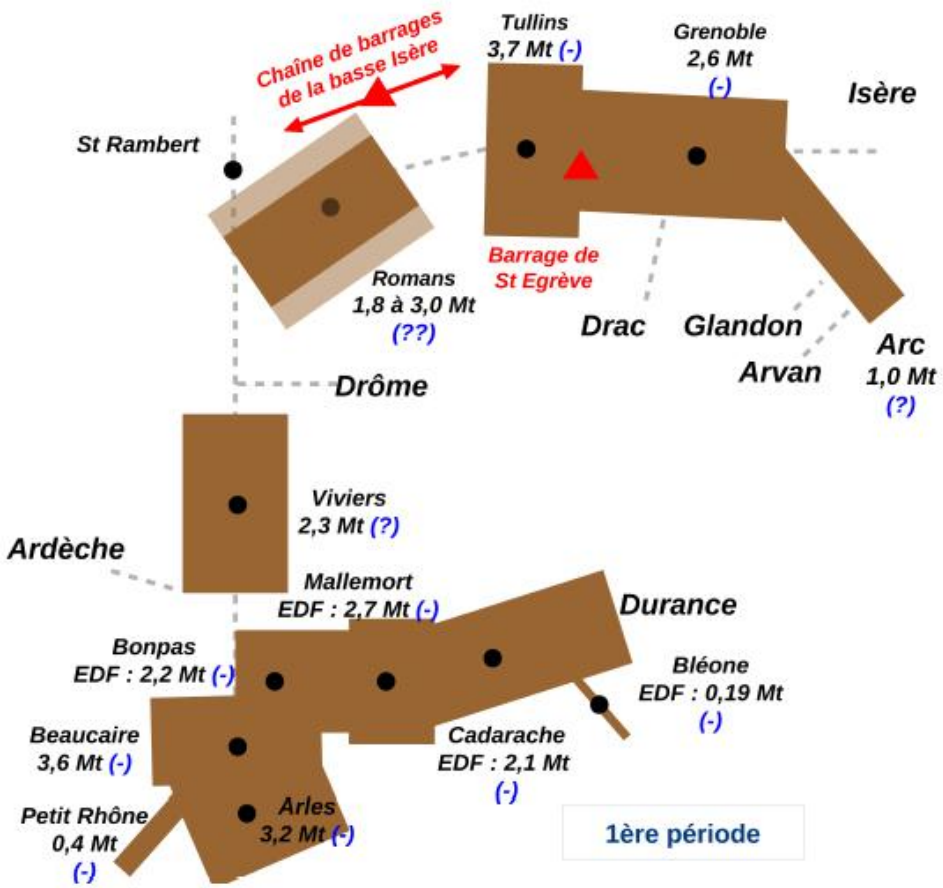
Reconstitution de l'événement de mai-juin 2008 et quantification des flux de MES cumulés

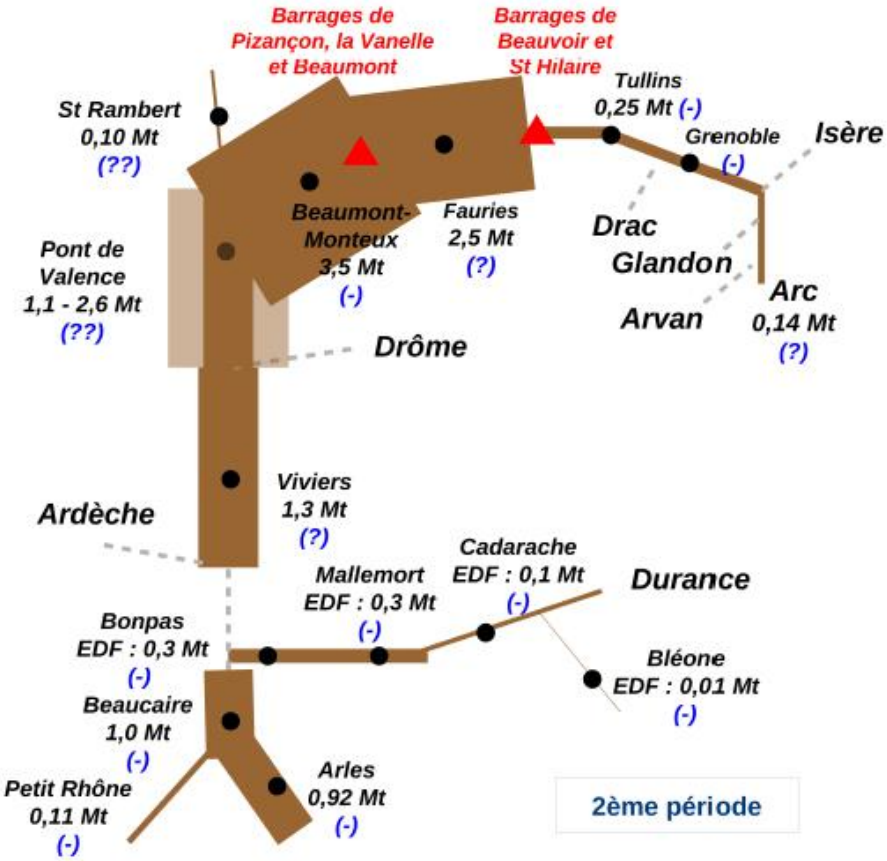
Flux de MES quantifiés à Beaucaire :

1ère période : 3,7 Mt

2ème période : 1,1 Mt

Origine des flux de MES :





La variabilité inter-annuelle des flux de MES

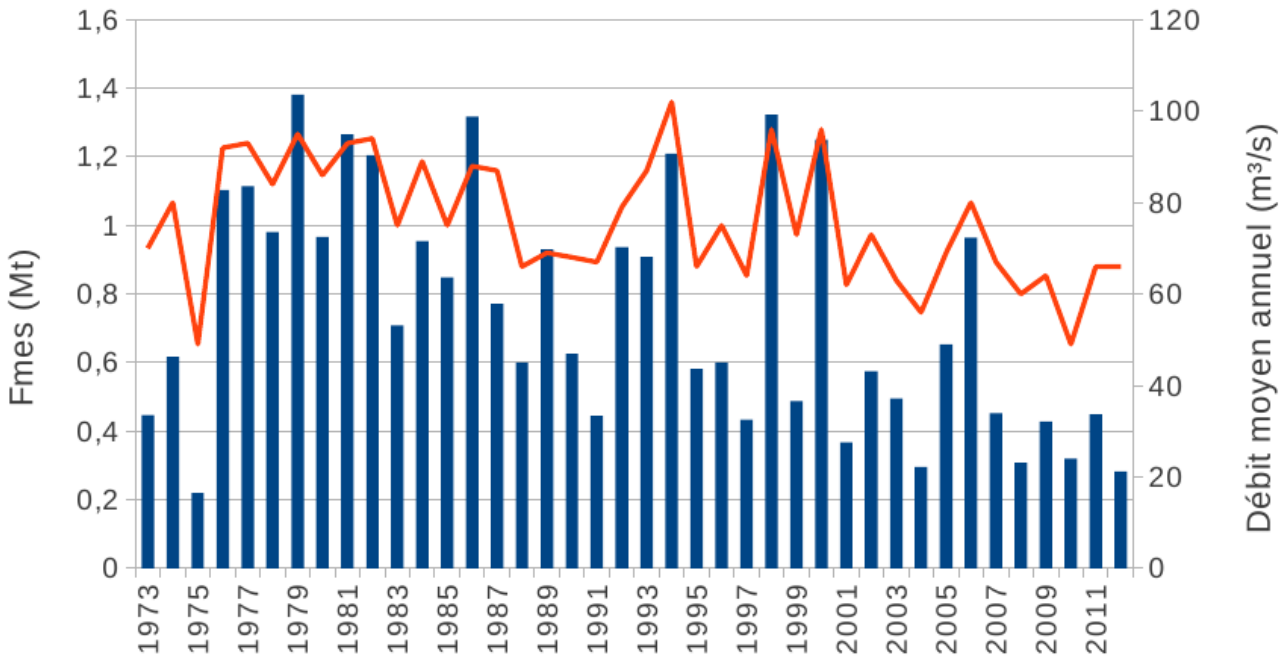
Souvent la première source d'incertitude sur le flux moyen inter-annuel

→ la variabilité inter-annuelle dépend fortement des crues (2003, 2008, 2011...)
→ mais aussi des impacts anthropiques : travaux dans le lit (Isère), chasses et manœuvres d'aménagements hydro-électriques (Haut-Rhône, Isère, Durance)
→ se pose aussi la question de tendances de long-terme, ou non-stationnarités

Arve (1974 – 2013, années hydrologiques)
Flux reconstitués à partir du suivi OFEV (Launay, 2014)

moyenne = 0,78 Mt,
entre 0,22 et 1,41 Mt.

tendance à la diminution
1974-1984 :
0,96±0,35 Mt/an
2002-2012 :
0,50±0,20 Mt/an



La variabilité inter-annuelle des flux de MES

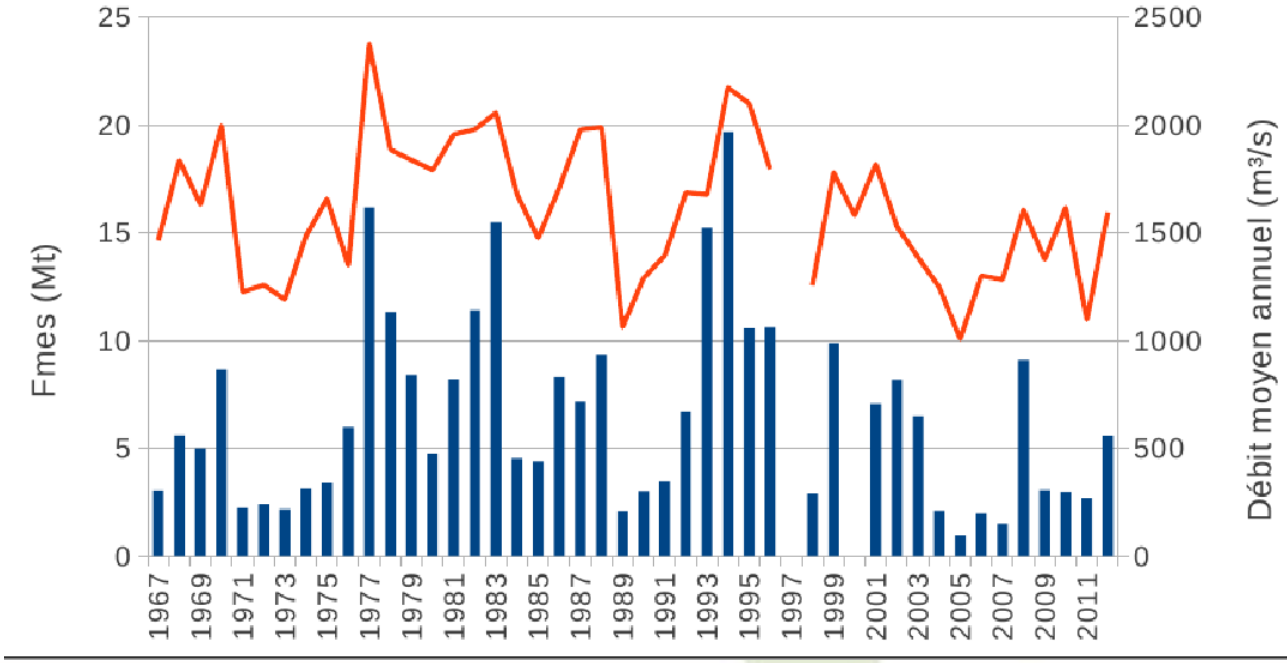
Souvent la première source d'incertitude sur le flux moyen inter-annuel

→ la variabilité inter-annuelle dépend fortement des crues (2003, 2008, 2011...)
→ mais aussi des impacts anthropiques : travaux dans le lit (Isère), chasses et manœuvres d'aménagements hydro-électriques (Haut-Rhône, Isère, Durance)
→ se pose aussi la question de tendances de long-terme, ou non-stationnarités

Rhône à Arles (1967-2005, années civiles)
Flux reconstitués selon Pont et al. (2002) et mesurés à la station SORA à partir de 2005 (Antonelli, 2013)

Moyenne = 6,7 Mt,
de 1,0 à 19,7 Mt/an.

Pas de tendance évidente



Une nouvelle image des flux particulaires moyens inter-annuels

Des valeurs revues à la baisse pour le Rhône et ses affluents majeurs

→ les flux de MES annoncés par l'EGR apparaissent fortement surestimés
→ les teneurs moyennes en contaminants obtenues avec des protocoles d'analyse documentés et sensibles permettent de préciser certaines valeurs pré-existantes

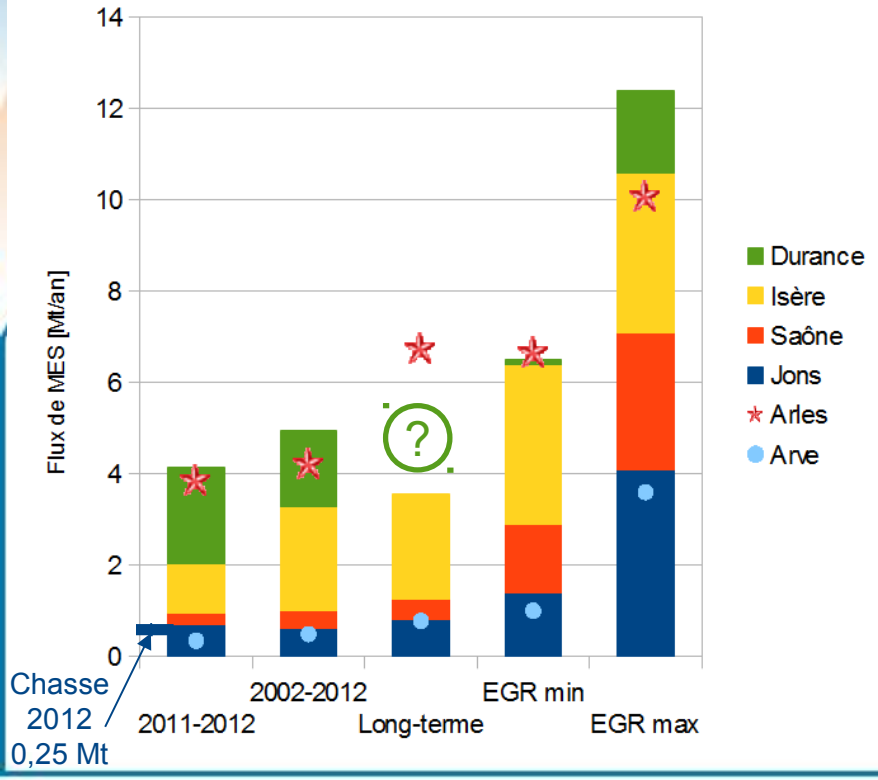
	Arve	Jons	Saône	Isère	Durance	Arles	J+S+I+D	bilan
Flux MES mesuré sur année hydrologique 2011-2012 [Mt/an]	Année 2011-2012 **0,35**	Année 2011-2012 **0,69**	Année 2011-2012 **0,27**	Année 2011-2012 **1,1**	Année 2011-2012 **2,1**	Année 2011-2012 **3,9**	**4,1**	**8%**
concentration mesurée [g/L]	*0,168*	*0,039*	*0,033*	*0,110*	*1,544*			
Flux MES moyen sur les 10 dernières années hydrologiques [Mt/an]	2002-2012 **0,49**	2002-2012 **0,61**	2002-2012 **0,39**	2002-2012 **2,3**	2002-2012 **1,65**	2002-2012 **4,2**	**4,9**	**18%**
Min – Max	***0,30 – 0,96***	***0,28 – 1,36***	***0,30 – 0,52***	***0,82 – 8,1***	***0,60 – 3,2***	***0,98 – 9,1***		
Écart-type interannuel	*41%*	*52%*	*17%*	*94%*	*56%*	*69%*		
Incertitude d'estimation de la moyenne	*26%*	*33%*	*11%*	*60%*	*35%*	*44%*		
Flux spécifique [t/an/km²]	248	30	13	400	116	35		
concentration moyenne [g/L]	*0,245*	*0,036*	*0,030*	*0,254*	*1,100*	*0,100*		
concentration mesurée [g/L]	*0,248*	*0,029*	*0,026*	*0,254*	*2,033*			
Flux MES moyen long-terme [Mt/an]	1974-2012 **0,78**	1993-2012 **0,80**	1982-2012 **0,45**	1995-2012 **2,3**	**?**	1967-2012 **6,7**	**3,6**	**-47%**
Min – Max	***0,22 – 1,4***	***0,25 – 2,0***	***0,07 – 1,1***	***0,82 – 8,1***		***0,98 – 20***		
concentration moyenne [g/L]	*0,390*	*0,047*	*0,035*	*0,256*		*0,160*		
Flux EGR min [Mt/an]	**1**	**1,4**	**1,5**	**3,5**	**0,1**	**6,7**	**6,5**	**-2%**
concentration moyenne [g/L]	*0,500*	*0,082*	*0,116*	*0,389*	*0,067*	*0,159*		
Flux EGR max [Mt/an]	**3,6**	**4,1**	**3**	**3,5**	**1,8**	**10**	**12**	**23%**
concentration moyenne [g/L]	*1,800*	*0,240*	*0,233*	*0,389*	*1,200*	*0,240*		

Notes. Pour l'Isère, les flux 10 ans et long-terme sont mesurés à Grenoble-Campus. Pour EGR flux Arles, on a considéré 90 % de Beaucaire. La moyenne 10 ans sur la Durance est établie à partir des années civiles 2002-2003-2008-2009-2011-2012 (données EDF).

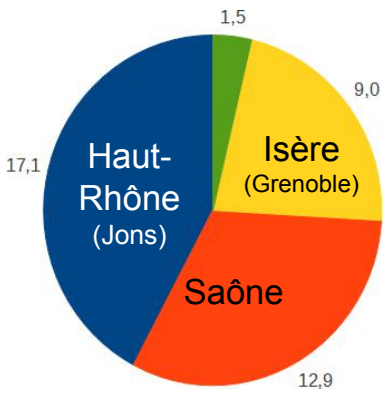
Une nouvelle image des flux particulaires moyens inter-annuels

Des valeurs revues à la baisse pour le Rhône et ses affluents majeurs

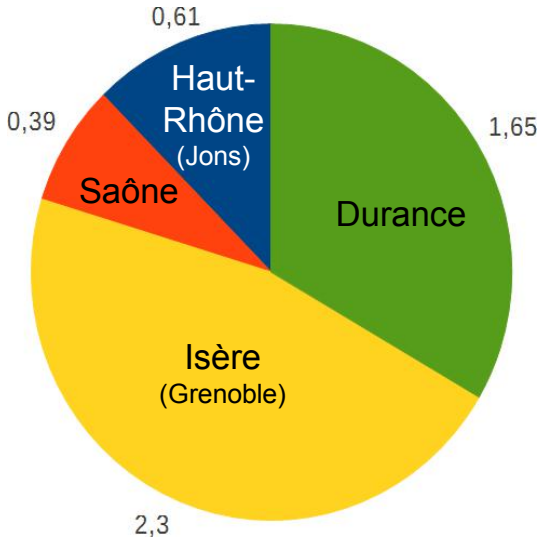
→ les flux de MES annoncés par l'EGR apparaissent fortement surestimés
→ les teneurs moyennes en contaminants obtenues avec des protocoles d'analyse documentés et sensibles permettent de préciser certaines valeurs pré-existantes



Répartition des apports moyens inter-annuels au Rhône (2002-2012)



Flux d'eau [km3/an]



Flux de MES [Mt/an]

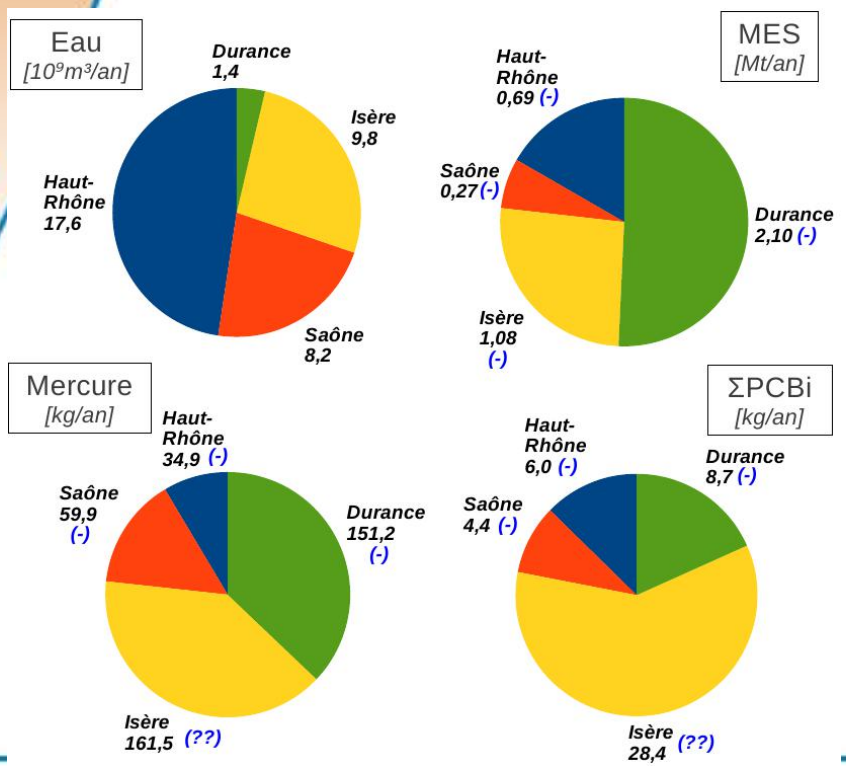
Une nouvelle image des flux particulaires moyens inter-annuels

Des estimations de flux de contaminants (ici Hg, PCBi) à confirmer

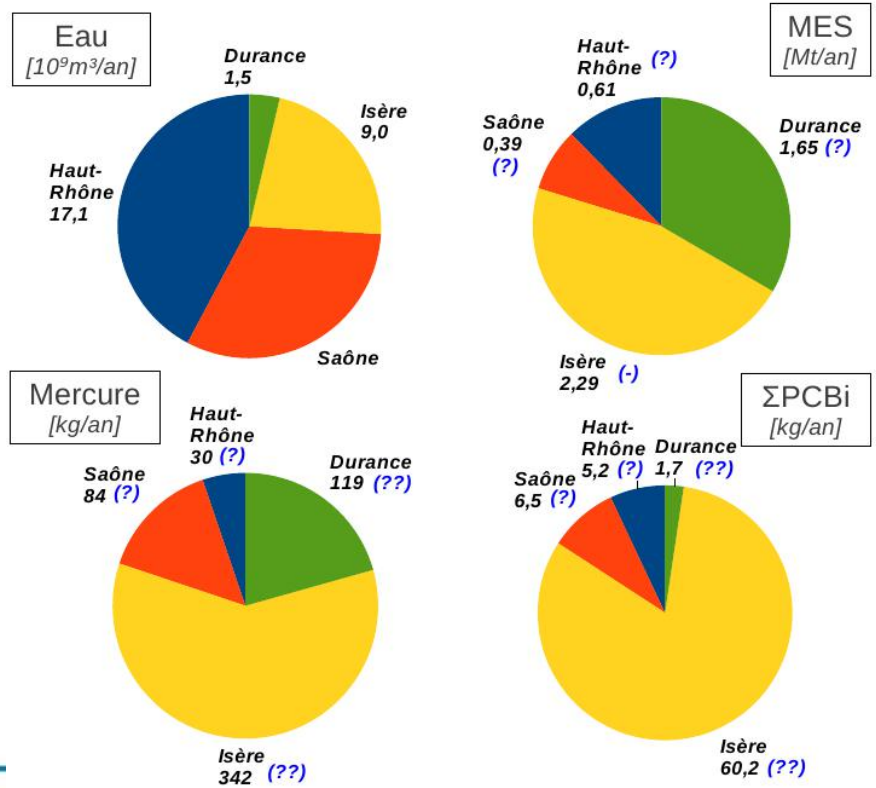
→ les flux de MES sur le long-terme restent à préciser par l'observation en continu
→ ainsi que les teneurs en contaminants des MES apportées au Rhône par l'**Isère** et la **Durance** notamment

Rhône aval Léman

2011-2012



2001-2012

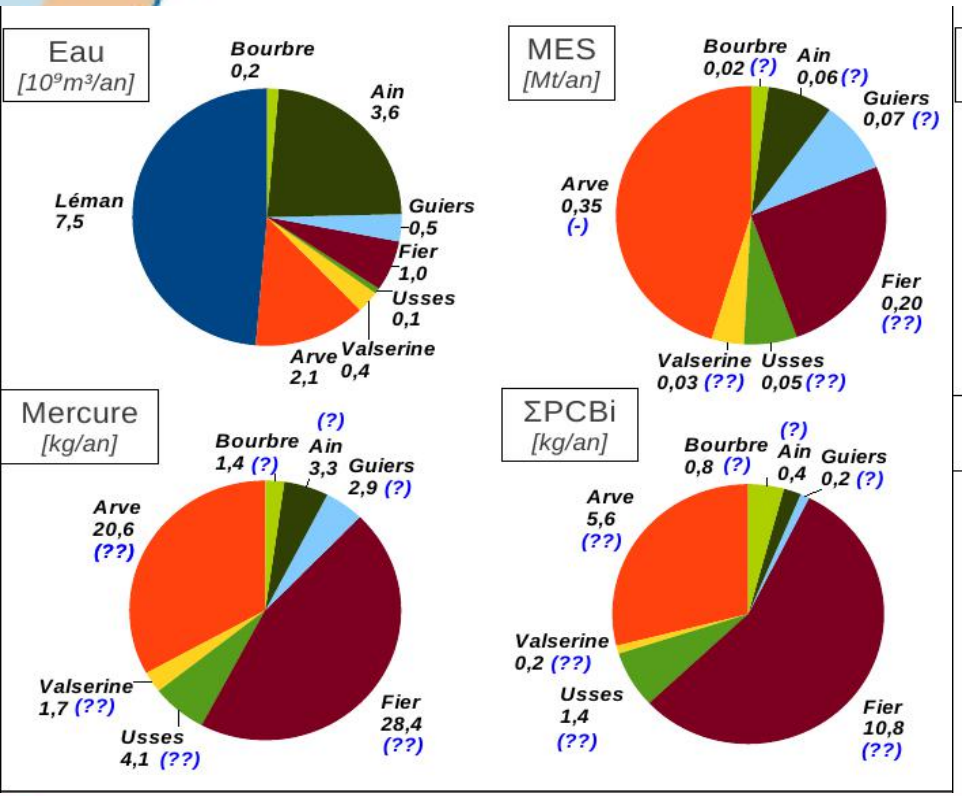


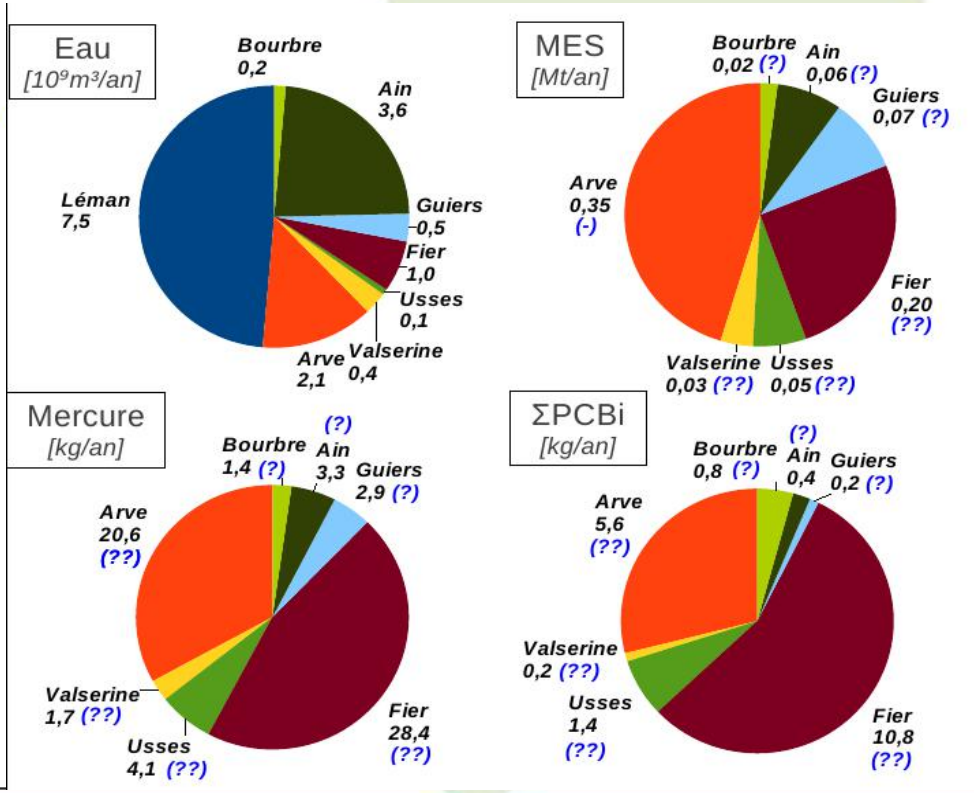
Une nouvelle image des flux particulaires moyens inter-annuels

Des estimations de flux de contaminants (ici Hg, PCBi) à confirmer

→ les flux de MES sur le long-terme restent à préciser par l'observation en continu
→ ainsi que les teneurs en contaminants des MES apportées au Rhône par l'**Arve** et le **Fier** notamment

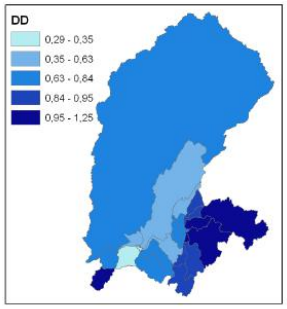
2011-2012 **Haut-Rhône** 2001-2012

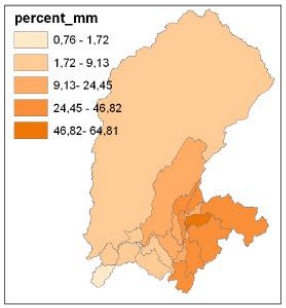


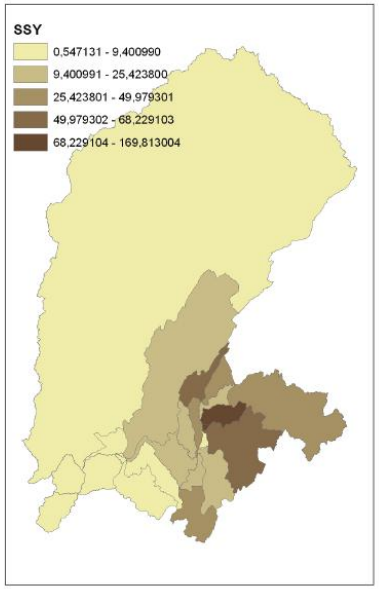


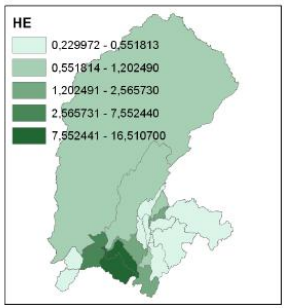
Analyse spatiale de la production particulaire des sous-bassins versants

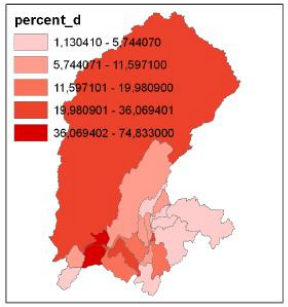
La méthode quantitative PESERA (type USLE), calée pour des grands bassins européens, fournit des résultats incohérents avec les mesures et les reconstitutions de flux de MES



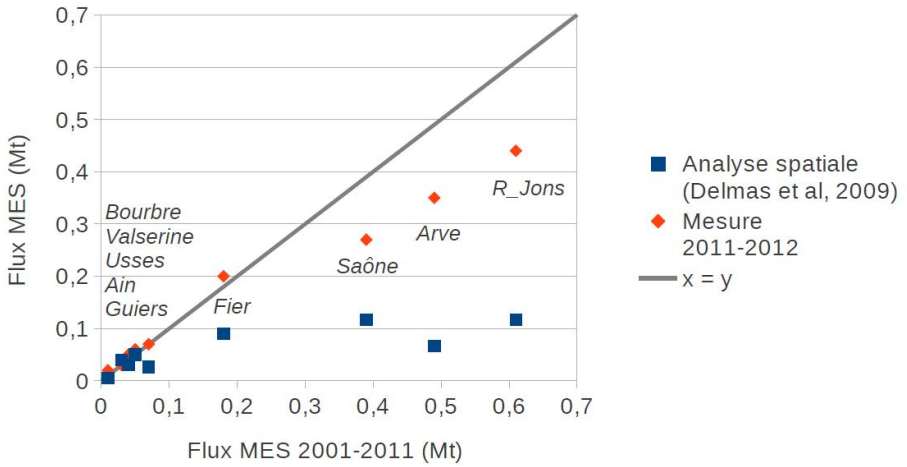








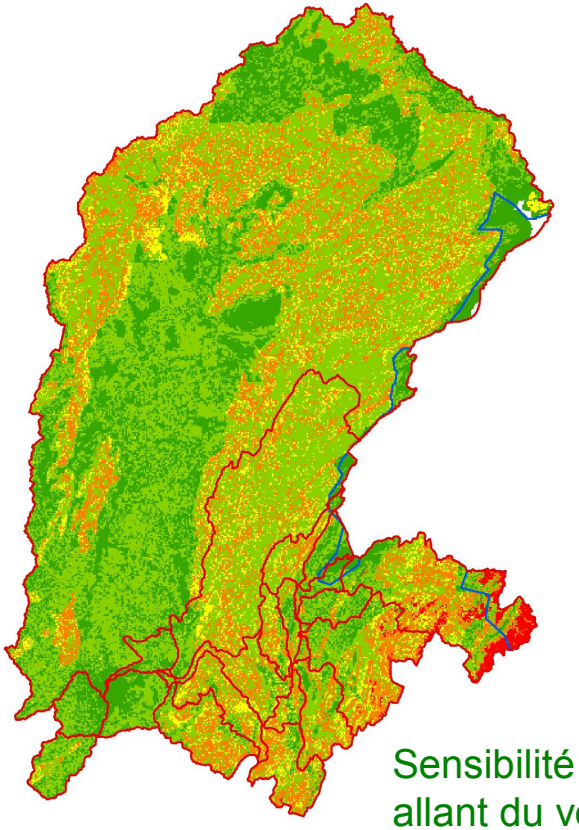
Prédiction des flux moyens annuels par PESERA et comparaison à la mesure 2011-2012 et à la reconstitution 2001-2011



Couches raster des 4 indices HE, MM, DD et D proposés par Delmas et al. (2009)
et estimation des exports de sédiments à l'exutoire SSY des bassins versants du Haut-Rhône et de la Saône

Analyse spatiale de la production particulaire des sous-bassins versants

La méthode qualitative de Bertrand (Irstea, 2009) fournit une cartographie des érosivités utile pour hiérarchiser les contributions potentielles des sous-bassins



Sensibilité à l'érosion sur le Haut-Rhône et la Saône allant du vert (faible) au rouge (forte)

→ l'indicateur de sensibilité à l'érosion est calculé par croisement d'indicateurs
(relief, géologie, occupation du sol)

→ pour évaluer les flux particulaires moyens : croisement avec le forçage hydro-climatique, sources et sols pollués, connectivité hydrographique

→ nécessaire agrégation par sous-bassins
→ un préliminaire à la modélisation hydrologique spatialisée

Perspectives

Poursuite de l'effort multi-partenarial d'observation des flux particulaires

Prélèvements et analyses

→ résultats 2013 en cours de traitement
→ maintenance, développement et homogénéisation du réseau
→ extension à d'autres substances d'intérêt émergentes

Gestion des données

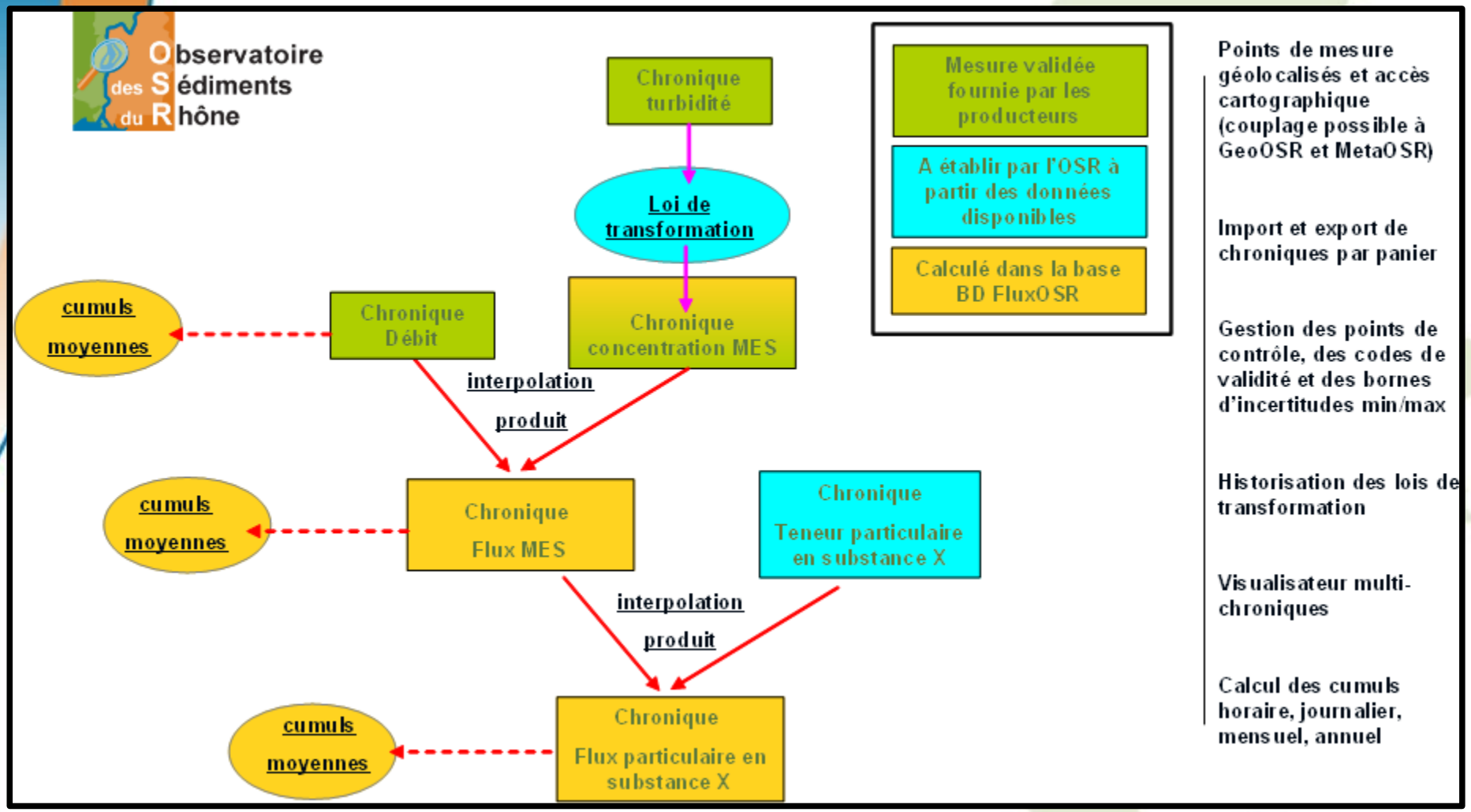
→ expression des incertitudes sur les flux
→ bancarisation des chroniques et flux dans la base de données FluxOSR
→ bancarisation des échantillons et des résultats d'analyse

Modélisation

→ modélisation des flux dans le réseau avec le modèle Adis-TS
→ croisement des flux observés avec les archives sédimentaires
→ analyse spatiale des bassins-versants sources et modèle hydrologique

Perspectives

Base de données FluxOSR (BDOH – Observatoire OSR)
Convention multi-producteurs en cours de validation juridique



Merci à tous ceux qui font vivre le réseau !