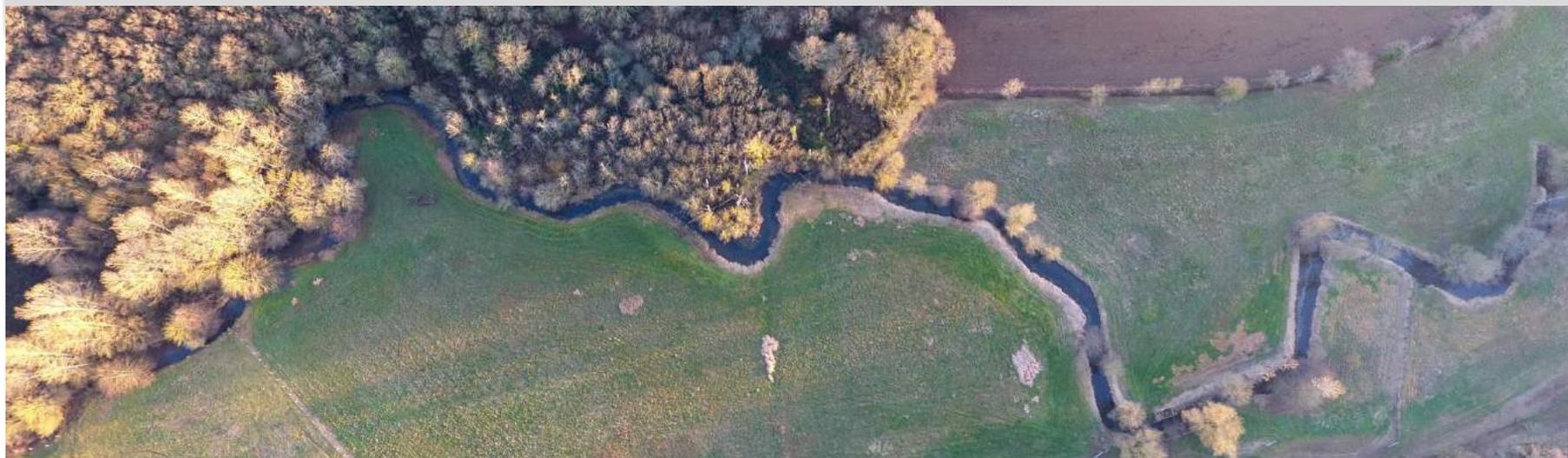


Rencontres Techniques
Géomorphologie des petits cours d'eau en tête de bassin versant

Michel Bramard

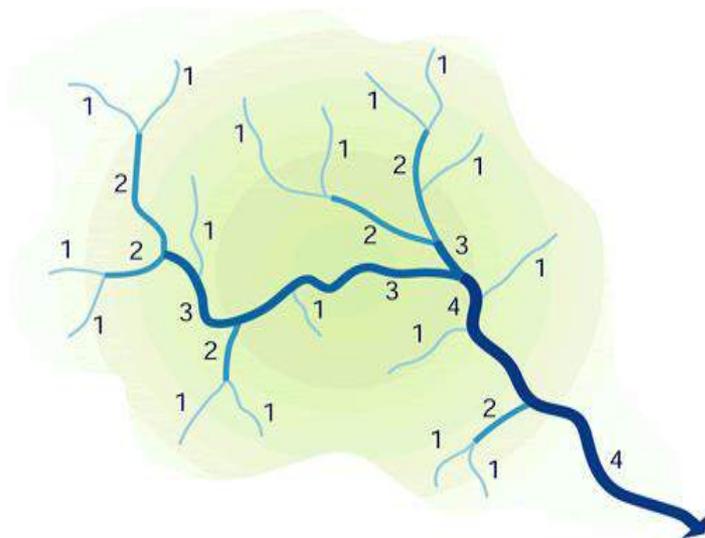
Notions d'hydromorphologie sur les petits cours d'eau

Poitiers, 6 décembre 2018



Qu'est ce qu'un cours d'eau en tête de bassin versant ?

Cours d'eau de rang de Strahler 1 et 2 à l'échelle 1 : 25 000



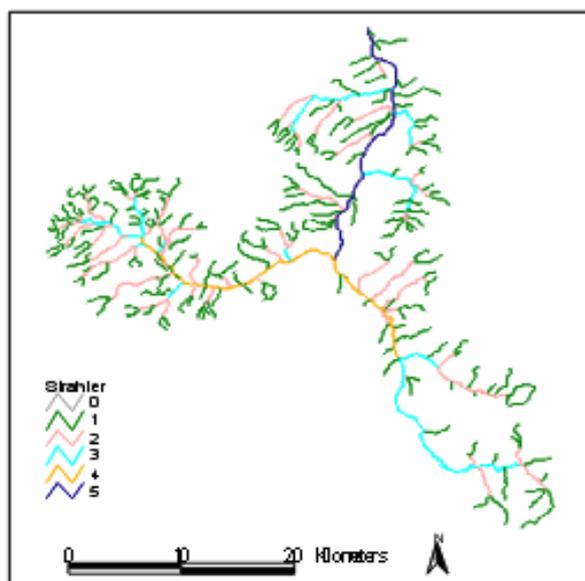
Classification du réseau hydrographique selon l'ordre de Strahler *

- Jusqu'aux zones de source avec leurs zones humides associées
- Cours d'eau généralement de largeur inférieure à 2 mètres

Que représentent-ils?

Ordination des cours d'eau

Loire R= 8



Résultat Loire

Rang de Strahler	% du Linéaire
n.d.	0 %
Rang 1	57 %
Rang 2	20 %
Rang 3	11 %
Rang 4	6 %
Rang 5	4 %
Rang 6	2 %
Rang 7	1 %
Rang 8	1 %
Loire	100 %

Les rangs 1 et 2
représentent la majorité
des linéaires de cours
d'eau

Outils de classification et
de sectorisation

STRAHLER (ou SCHEIDEGGER R = 14.92)

Andriamahaf H. (1999). hydroécologie du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions sur les cours et les versants. Thèse de doctorat Université Jean Saint : 272 p.

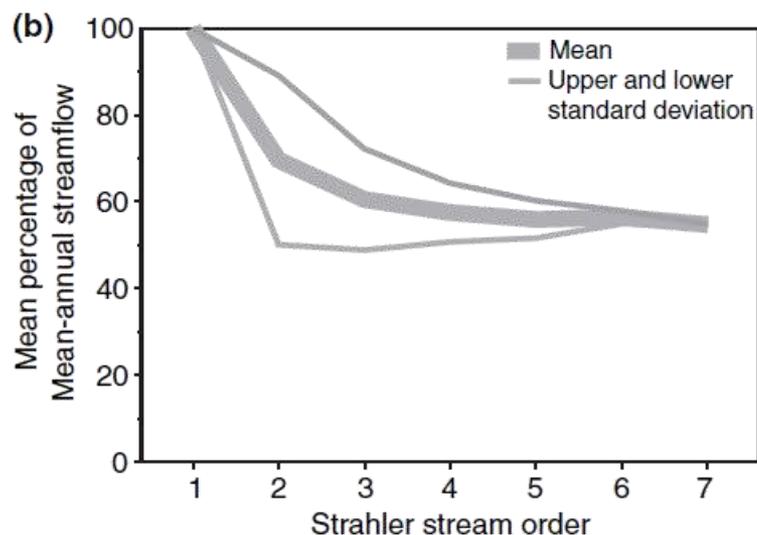
Figure 6.4. Répartition des différents rangs des cours d'eau du bassin de la Loire, en proportion relative des linéaires.

in Souchon Y. 2002

L'importance de l'alimentation en eau des têtes de bassin versant

● Contributions des TBV aux flux hydrauliques

- ✓ Conditionnent quantitativement les ressources en eau de l'aval (Alexander *et al.*, 2007*) 
- ✓ **50 à 70% de l'alimentation en eau des cours d'eau d'ordre supérieur** (ordre 3 à 7) provient des têtes de bassin versant d'ordre 1 et 2 (Alexander *et al.*, 2007*)



« **CAPITAL** hydrologique »



Rôle dans les processus hydrologiques

● La diversité des têtes de bassin versant permet la désynchronisation de l'arrivée des masses d'eau dans le cours d'eau aval (Gomi et al., 2002)

✓ Atténuation des pics de crues

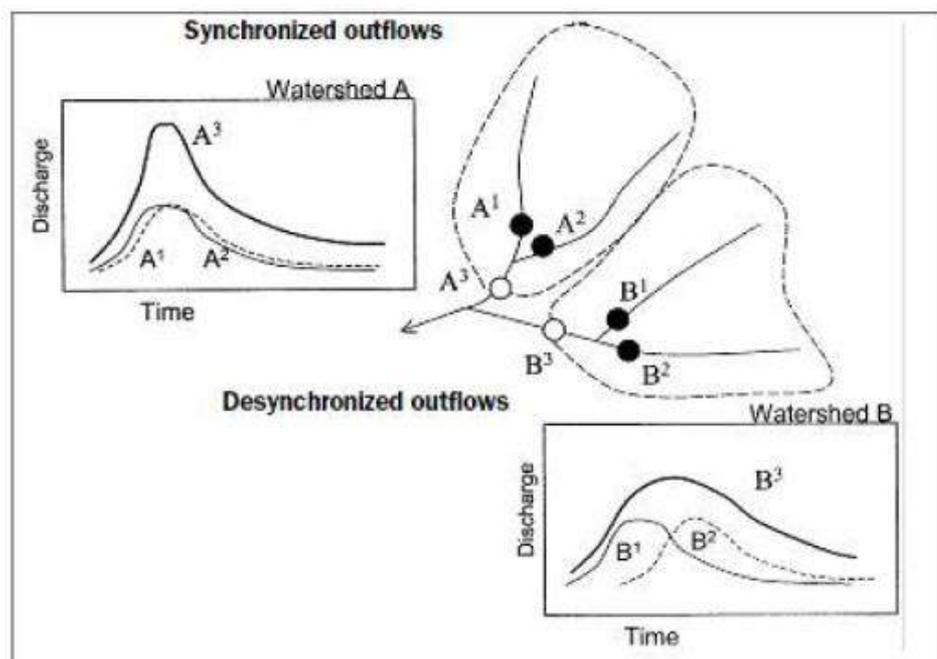


Figure 9 Synchronisation des processus hydrologiques dans le réseau hydrographique. Les volumes dans le bassin versant A et B sont identiques mais les pics de débit à la confluence sont différents car les masses d'eau sont synchronisées en A^3 et désynchronisées en B^3 , d'après (Gomi et al. 2002)

En bon état, le partenariat cours d'eau - zone humide régule les débits (crue, étiage)

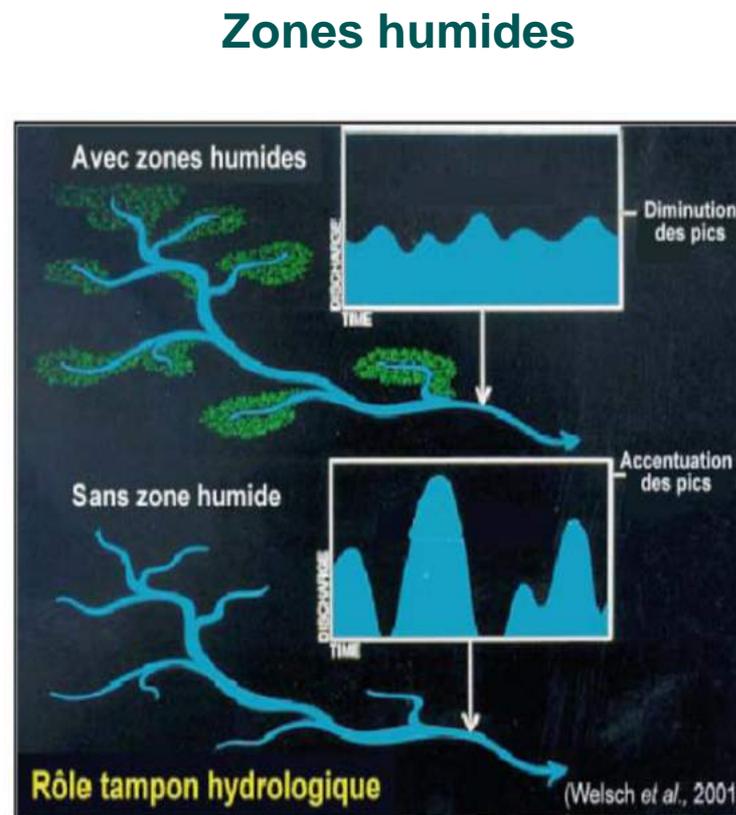
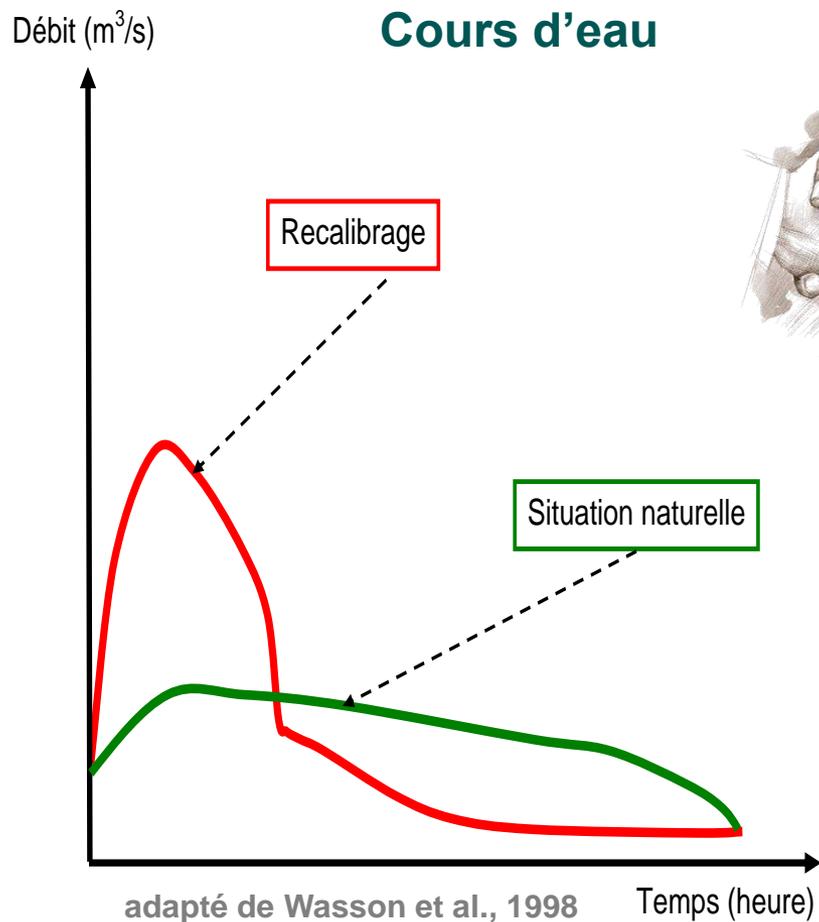


Fig. 2. Fonction hydrologiques des zones humides associées aux têtes de bassin versant. (Barnaud G., 2013)

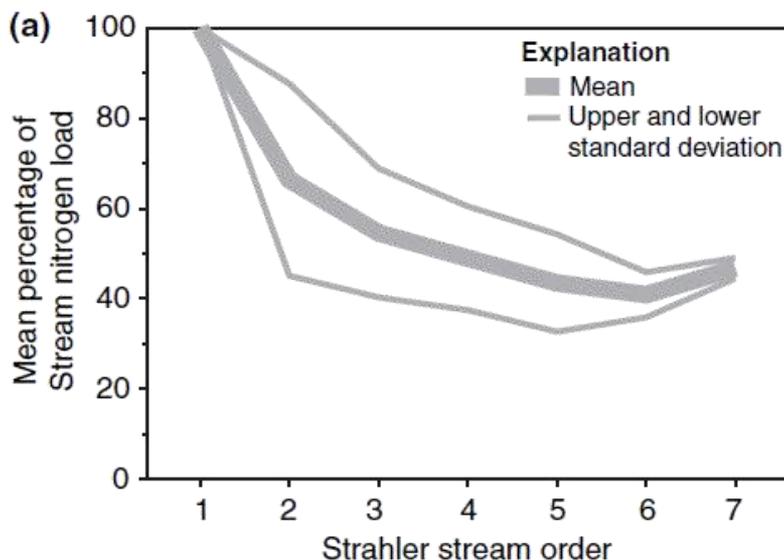
La qualité physico-chimique de la ressource en eau

- Conditionnent qualitativement les ressources en eau de l'aval (Alexander *et al.*, 2007*)

Cours d'eau en tête de bassin versant

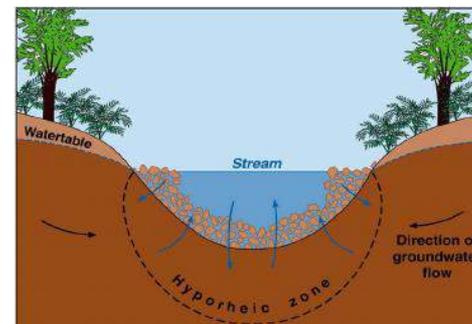
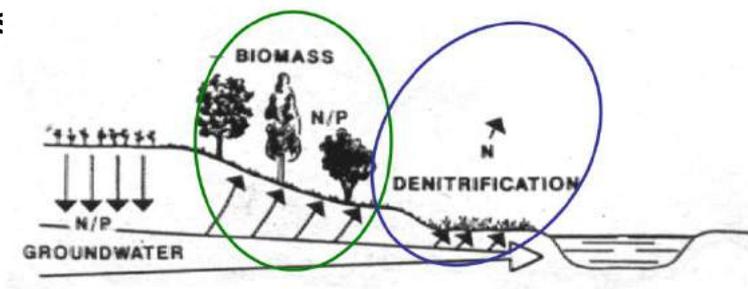
✓ **Zone de forte dénitrification** (Thomas *et al.*, 2001* ; Bohlke *et al.*, 2004 ; Mulholland *et al.*, 2004 ; Oraison *et al.*, 2011)

✓ **60% de la charge en nitrate** trouvée dans les cours d'eau d'ordre supérieur à 3 **proviendrait des cours d'eau de rang 1** (Alexander *et al.*, 2007*)



Zones humides en tête de bassin versant

✓ **Zone de forte dénitrification**
(comm Pinay, 2015)



La qualité physico-chimique de la ressource en eau

● Des conséquences à l'aval



✓ Le contrôle des niveaux de nitrate dans les cours d'eau en tête de bassin est crucial pour éviter les pollutions en nitrates dans les grands cours d'eau et les estuaires (Lassaletta *et al.*, 2010*)

✓ La dégradation des TBV est identifiée comme étant la principale cause d'eutrophisation des estuaires en Caroline du



Nord (Duda 1982 ; Craig & Kuenzler 1983; Mallin *et al.*, 1995 in Rheinhardt, 1999)

Hotspot dans la rétention des nutriments

**Nécessité d'intégrer les têtes de bassin dans les plans
d'actions nitrates**

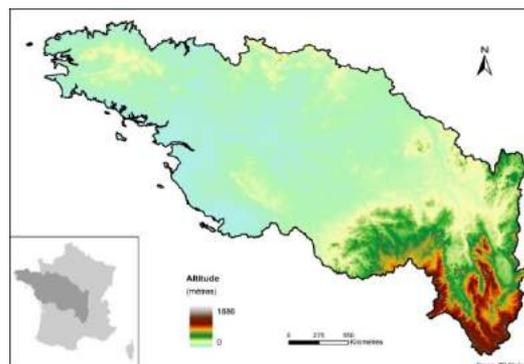
(Lassaletta *et al.*, 2010*)

Un réseau de cours d'eau et de zones humides extrêmement diversifié à l'échelle de chaque grand bassin

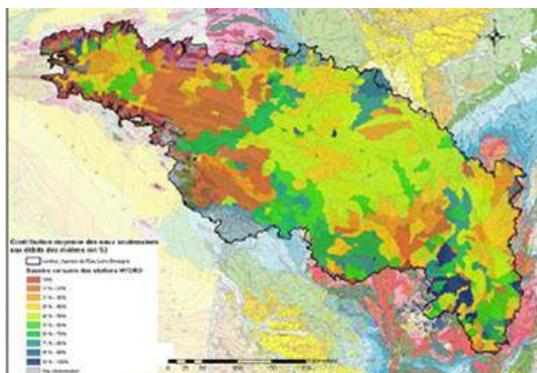
Climat



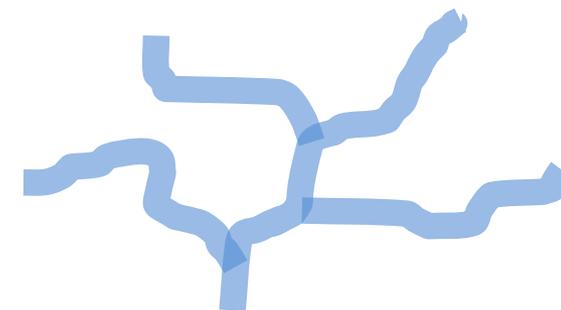
Relief



Géologie



Pente de vallée
élevée faible



Organisation
du réseau
extrêmement variée
(linéaire de cours d'eau
et superficie des zones
humides)



Diversité importante
des habitats

Des habitats particuliers et des espèces inféodées à ces milieux

(ou zones refuges)



- Ecrevisses (pieds-blancs ...)
- Chabot
- Lamproie de planer
- Moule perlière
- ...



- Agrion de mercure
- Codulegastre
- Amphibiens...

- Odontocerum albicorne
- Glossosomatidae...
- Hildenbrendia...
- Spongeria...
- Batrachospermum...
- ...

- Corridor et lieu de chasse (loutre, campagnol amphibie, musaraigne aquatique...)



Une forte vulnérabilité aux pressions des têtes de bassin versant

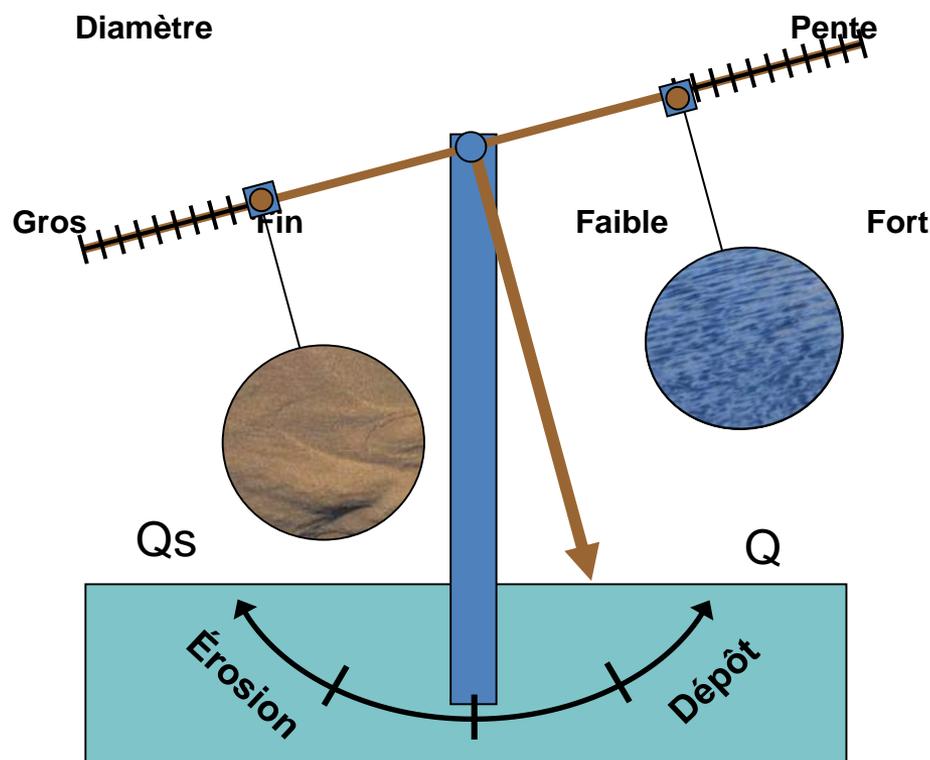
● Critères de vulnérabilité

- Petit gabarit (CE) ou petite superficie individuelle (ZH)
- Intermittence des écoulements
- Forte probabilité de rencontrer des activités humaines
- Milieux facilement « aménageables »
- Définition réglementaire souvent remise en cause
- Difficulté d'accès, cartographie non exhaustive
- Intérêt halieutique (nombre d'espèces et taille des individus)



Fonctionnement morphologique

- **Principe d'action – réaction**
- **Notion d'équilibre « dynamique »**
- **Variables de contrôle**
(débit liquide et solide, boisement du BV, couverture végétale des berges, nature des matériaux)
- **Variables de réponse**
(pente du fond, taille et volume des sédiments, sinuosité, largeur et profondeur lit mineur).
- **Les formes du lit s'ajustent autour des conditions moyennes**



« Balance de Lane » : principe de l'équilibre dynamique (Lane 1955)

Fonctionnement morphologique

● Les ajustements se font en fonction

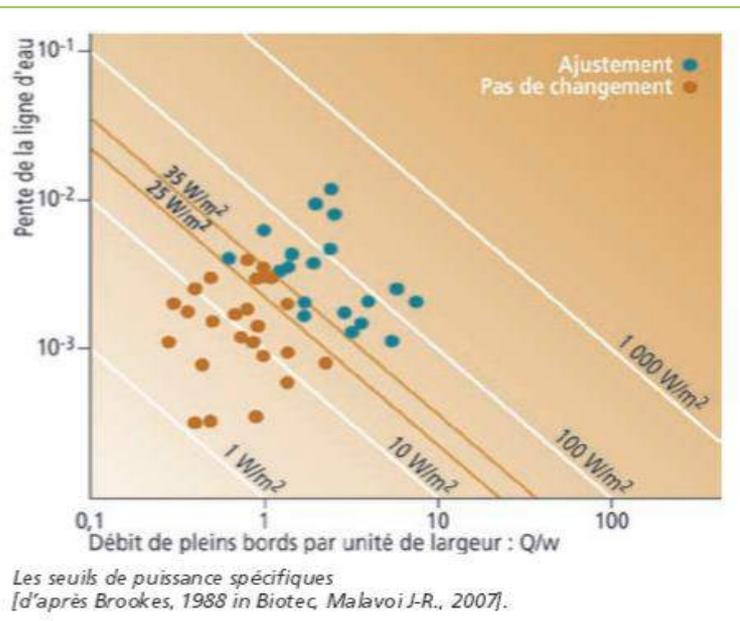
- de la puissance
- de la quantité de sédiments mobilisables (taille, cohésion, contraintes latérales et verticales)
- de la durée des crues

● Les têtes de bassin sont (par définition) proches des sources de production des sédiments.

-  en montagne, débit faible, crues courtes, mais pente élevée. Réajustements rapides (surtout érosion des matériaux grossiers)
-  en plaine, débit (très) faible, crues courtes, pente faible. Réajustements très lents : surtout par sédimentation des « fines »

Fonctionnement morphologique

● Les ajustements se font en fonction de la puissance *



La puissance spécifique, exprimée en W/m^2 correspond au produit de la pente, par le débit, par la largeur du cours d'eau

● Aide au choix :

- pour une restauration passive (on se contente de lever les contraintes avec éventuellement accompagnement de la transition)
- pour une restauration active (plus la puissance est faible et plus les travaux doivent être affinés)

● Comparaison :

- CE impacté / CE de référence,
- station témoin / station restaurée...
- évaluation transport solide (?)

* + disponibilité de matériaux (cohésion berges, ripisylve...), durée des crues...

Fonctionnement morphologique

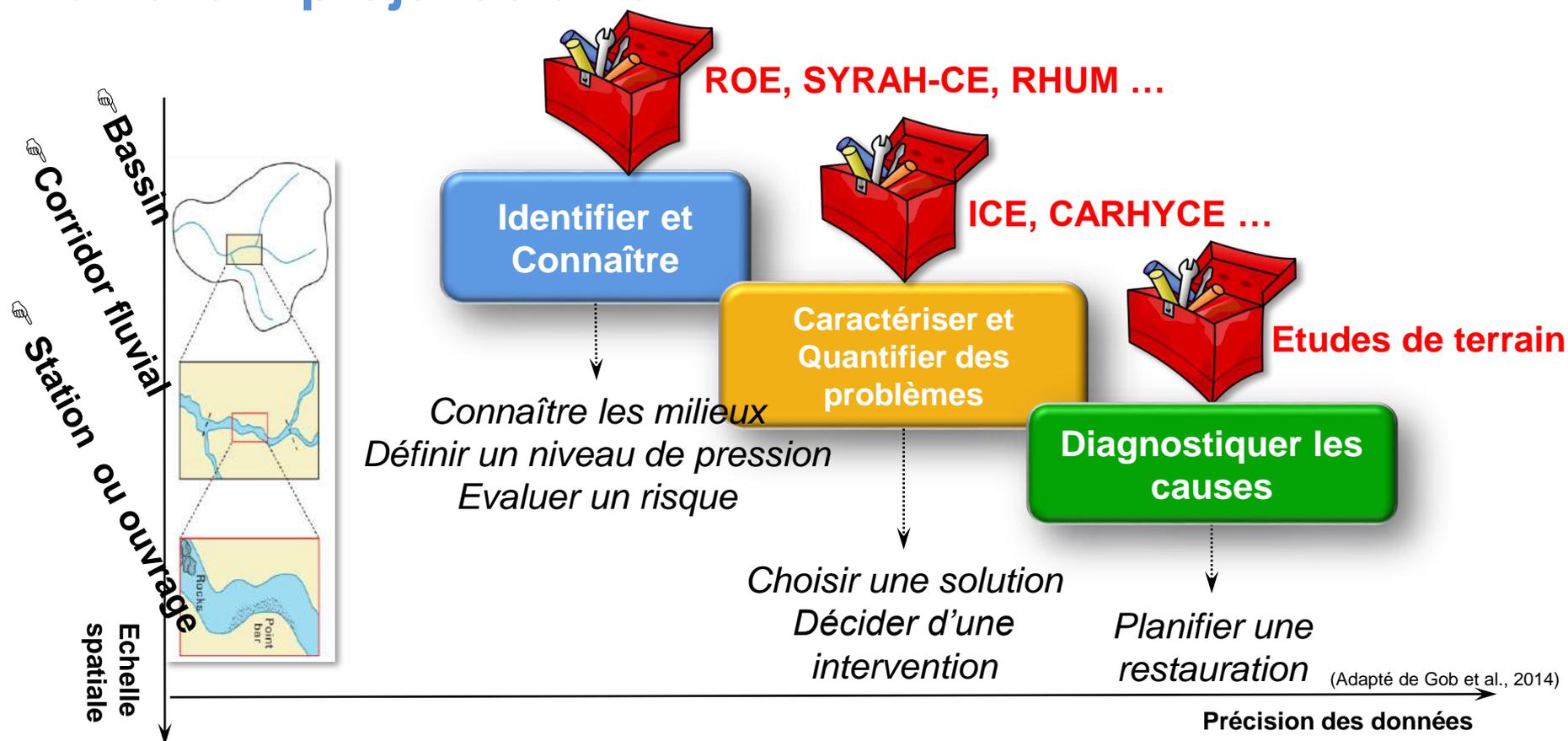
● Des constantes physiques

- **Succession des faciès de courant** : fosses/radiers , généralement de 3 à 10 fois la largeurs plein bord de référence, moyenne 6 fois (CE sur alluvions)
- **Avec des spécificités liées à un contexte global ou local**
 - à l'occupation des sols (par exemple en milieu forestier succession faciès petits cours d'eau 4,5 – 5 lpb)
 - à l'écorégion (tables calcaires / régions sableuses...)
 - aux accidents géologiques (dépressions, ruptures de pente, ...)
 - aux contraintes anciennes ou récentes (ripisylve + ou – entretenue, castor, seuils, rectifications ...)

 **Espace de mobilité/de fonctionnalité, amplitude des méandres, épaisseur de matelas alluvial, fraction héritée non mobilisable, bois mort...**

B-Définition d'un projet de restauration : le diagnostic

Le projet de restauration repose sur un diagnostic solide et un avant projet détaillé



Définition d'un projet de restauration : comment restaurer ?

La restauration écologique est le processus qui assiste l'autoréparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit . (SER, 2004)*

- **La restauration de l'hydromorphologie**
 - Rétablir les processus physiques
 - Viser la durabilité
 - Viser un effet sensible sur les communautés
- **Les types d'opérations**
 - Reméandrage
 - Effacement ou contournement d'ouvrage
 - Remise dans le talweg
 - Recharge du matelas alluvial,
 - Suppression des contraintes latérales
 - Diversification des habitats



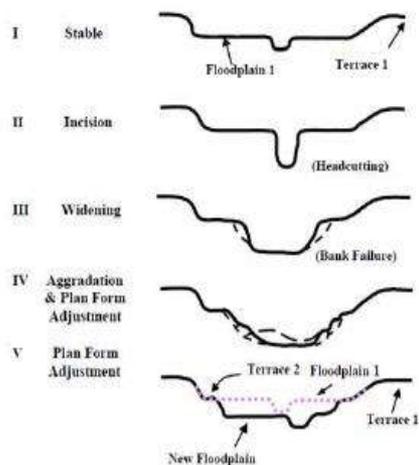
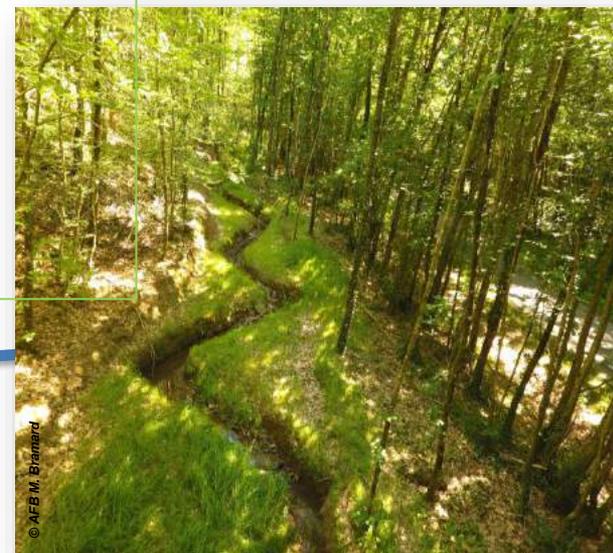
* https://c.ymcdn.com/.../SER_Primer/ser-primer-french-2004.pdf

d'après pwpt de Marlène Meynard, Rever, Avril 2018

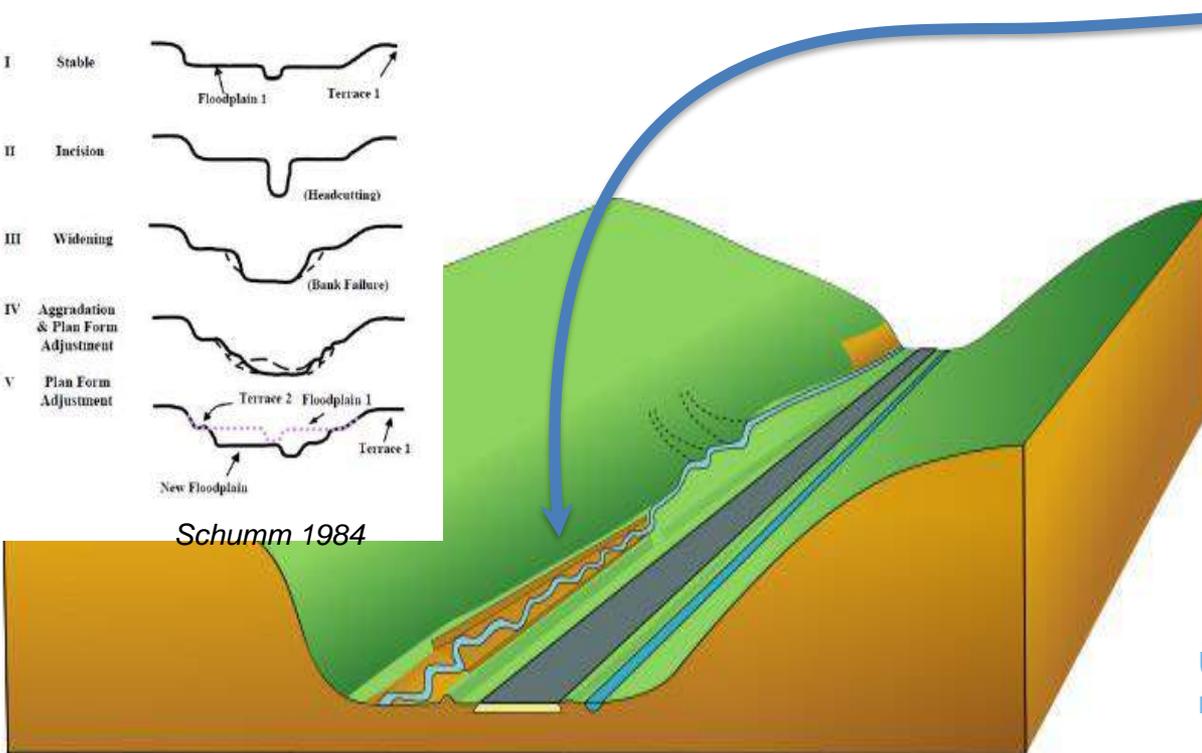
Définition d'un projet de restauration : Comment restaurer ?

● Recherche de la solution la plus ambitieuse

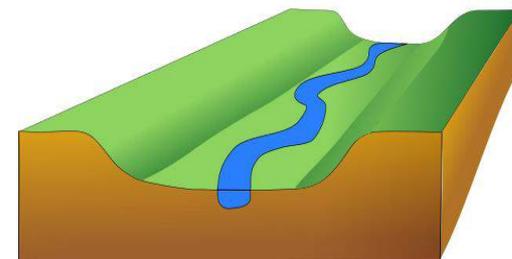
- 1 on essaie de lever les contraintes (plutôt que faire avec)
- 2 on restaure la situation avant perturbation ou à défaut une morphologie d'ajustement naturel



Schumm 1984



Lit emboîté :
création d'un nouveau talweg



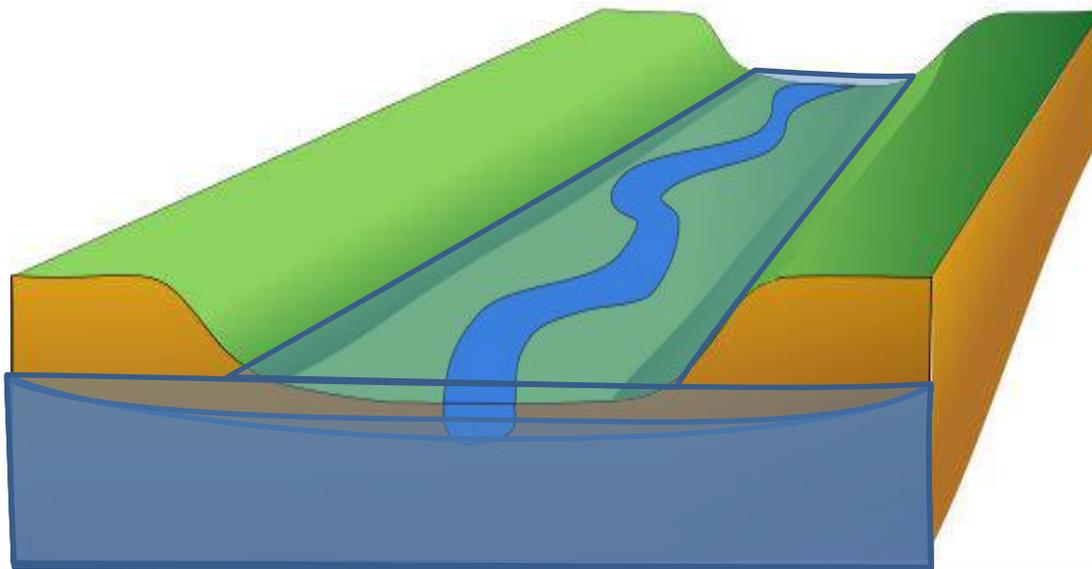
Un espace de fonctionnalités réduit,
mais un fonctionnement optimisé

Définition d'un projet de restauration : **comment restaurer ?**

● **Concilier enjeux zh/CE**

- les débits du lit mineur (à plein bord) sont généralement compris entre QJ1 (sources marais) et QJ2.
- Localement valeurs plus faibles (petites annexes à 1.5, 2 x module)

- **Eviter l'effet drain de la zh (gabarit trop grand)**
- **Eviter une perte trop forte d'énergie (gabarit trop faible) et une création de « plan d'eau »**



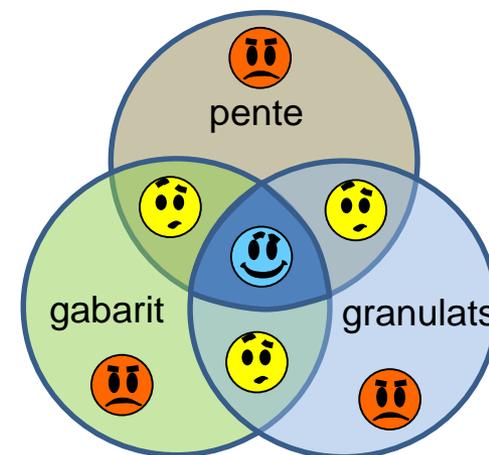
Définition d'un projet de restauration : Le dimensionnement

Les éléments techniques majeurs conditionnant la réussite d'un projet :

- Le gabarit du cours d'eau
- La pente (talweg, profil en long/tracé en plan)
- La reconstitution du matelas alluvial

Les éléments complémentaires :

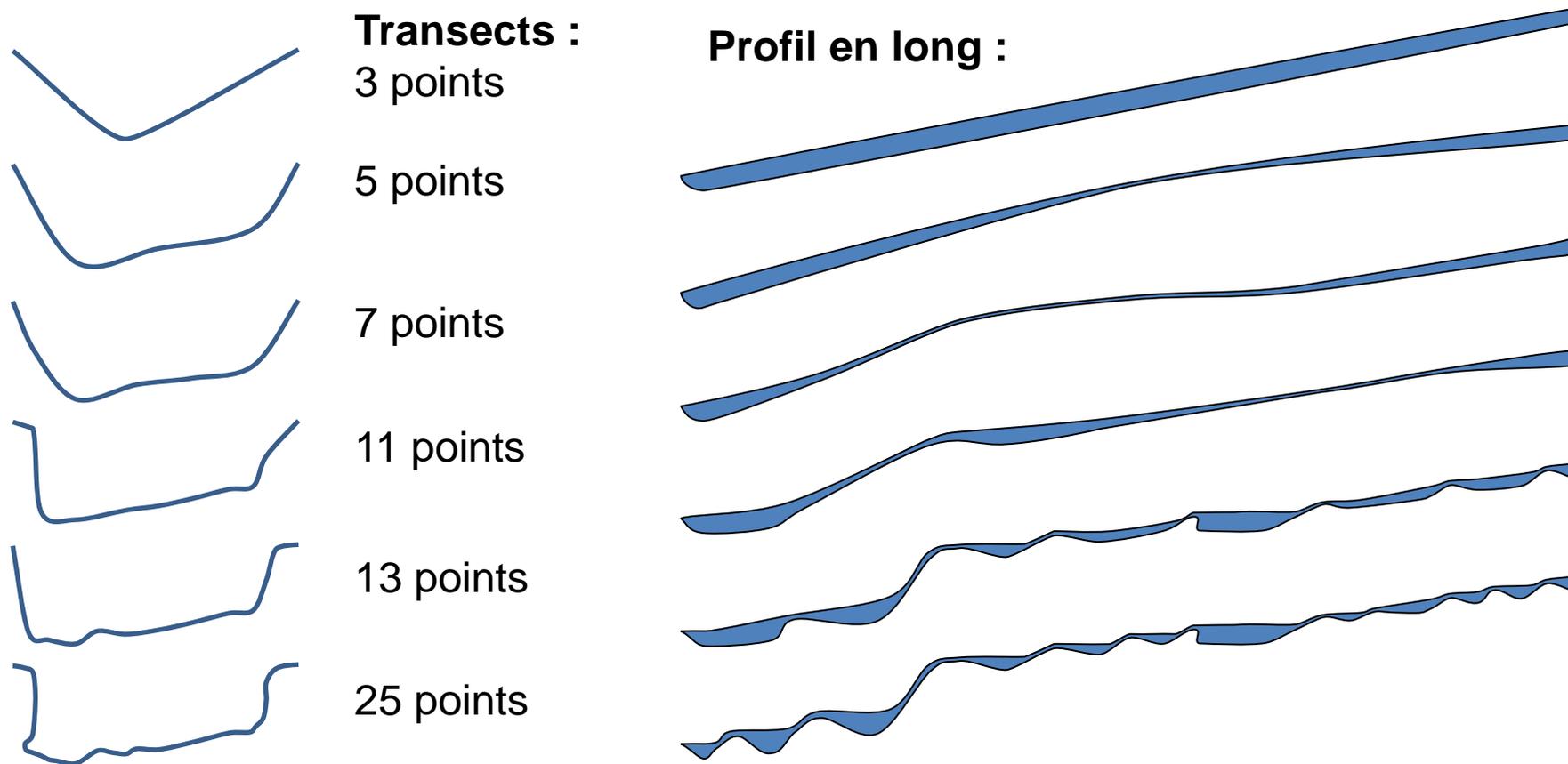
- La répartition des faciès
- Le rapport de forme
- Les habitats
(fraction héritée non mobilisable , bois mort...)
- La ripisylve
- ...



Définition d'un projet de restauration : le dimensionnement

Partir d'un diagnostic suffisamment précis !

(bien connaître les limites de ses descripteurs)



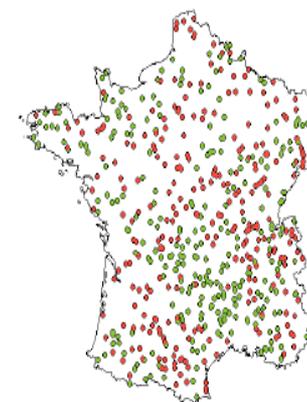
Cours d'eau – Tronçons de cours d'eau de référence



Bretagne, Pays de la Loire
Rang 1 : 55 stations
(Jan, 2013 ; Bossis, 2014)

Stations de Réf
CARHYCE
406 stations peu ou pas altérées en France

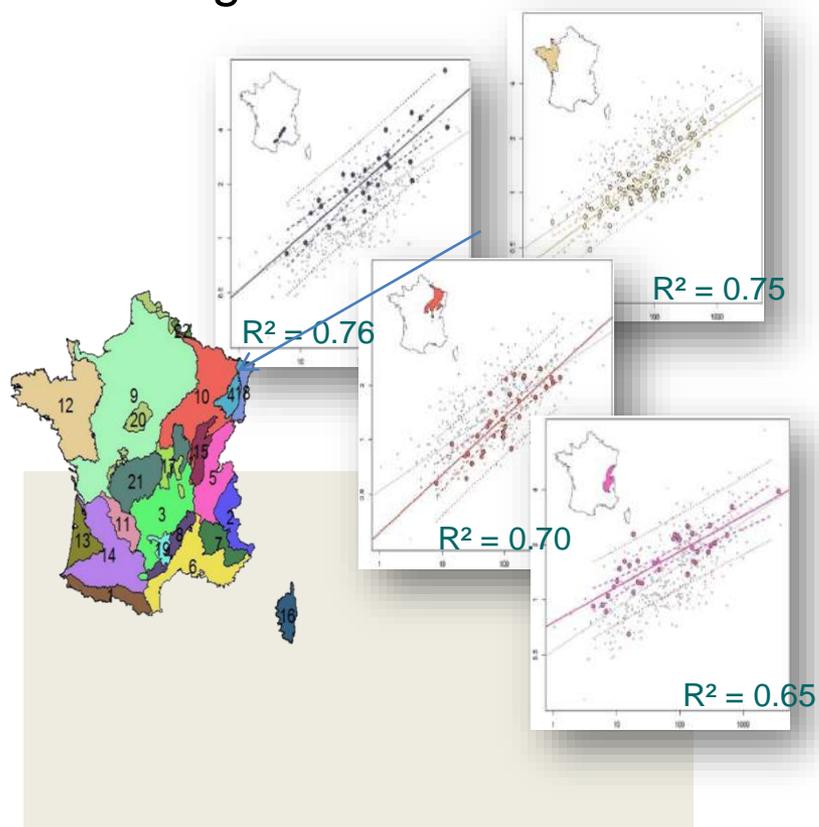
Centre, Poitou Charentes
Rang 1, 2, 3, 4 : 26 stations
Vierron, 2015 ;



● Stations non altérées (290)
● Stations altérées (277)

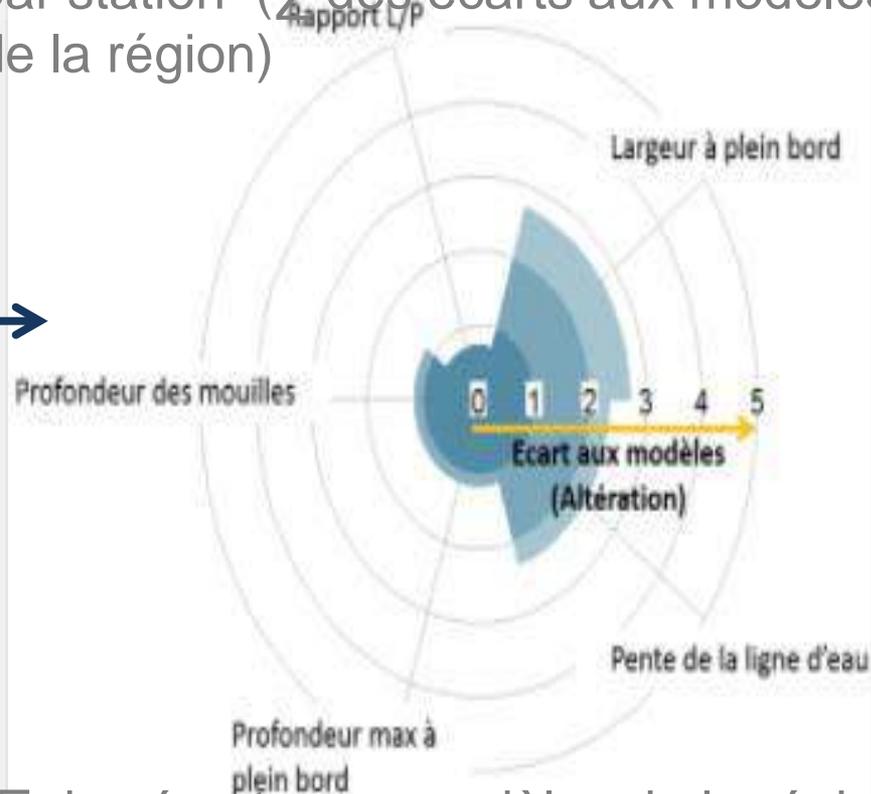
Un outil d'aide à l'évaluation IED CARHYCE

- Plusieurs modèles de références par hydro-écorégion



Calcul de l'Indicateur Morphologique Global

par station (\sum des écarts aux modèles de la région)



(\sum des écarts aux modèles de la région)

Définition d'un projet de restauration : le dimensionnement

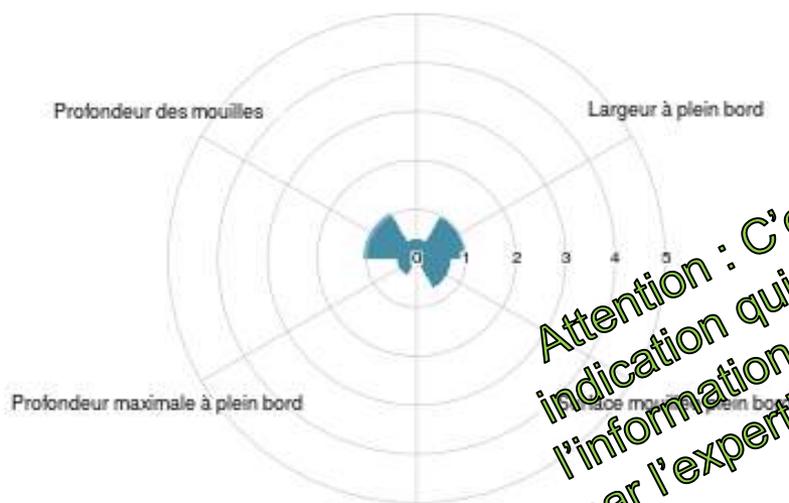
Restaurer par analogie à une référence géographique exemple de L'Amasse au moulin de Givry

Exploitation IED-CARHYCE

Indicateur Morphologique Global : MASSE OU AMASSE à SOUVIGNY-DE-TOURAINES

Opération n° : 406, date de réalisation : 2009-08-18

Rapport largeur/profondeur à plein bord

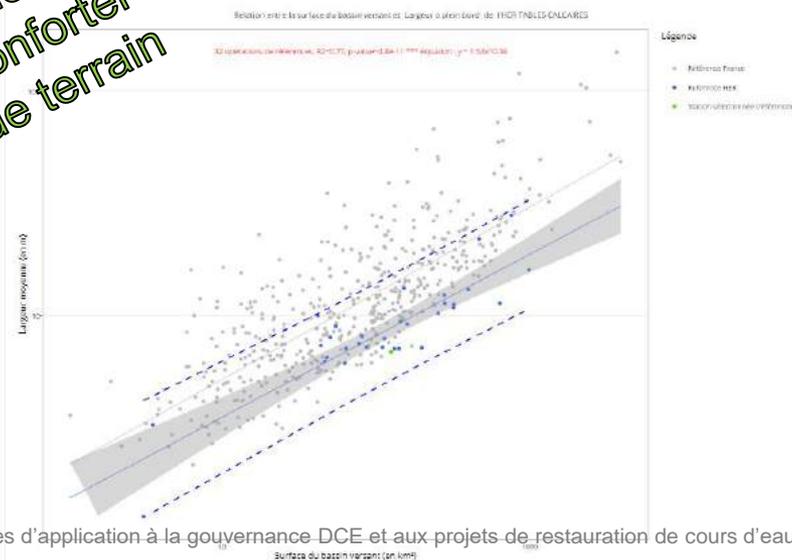
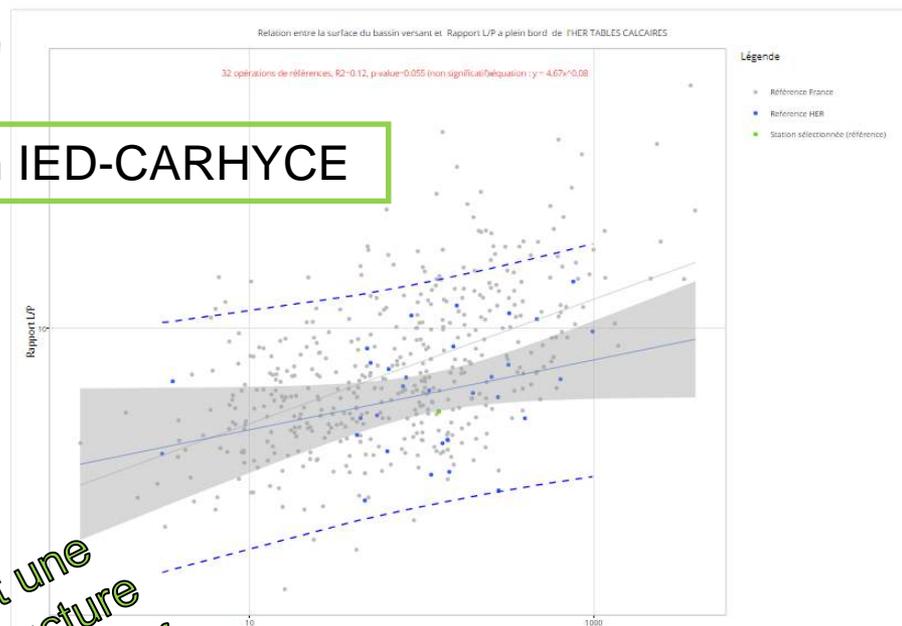


Valeurs des résidus standardisés

Largeur à plein bord : 0.97
Rapport largeur/profondeur à plein bord : 0.38
Profondeur des mouilles : 1.00
Profondeur maximale à plein bord : 0.38
Pente de la ligne d'eau : 0.07
Surface mouillée plein bord : 0.68

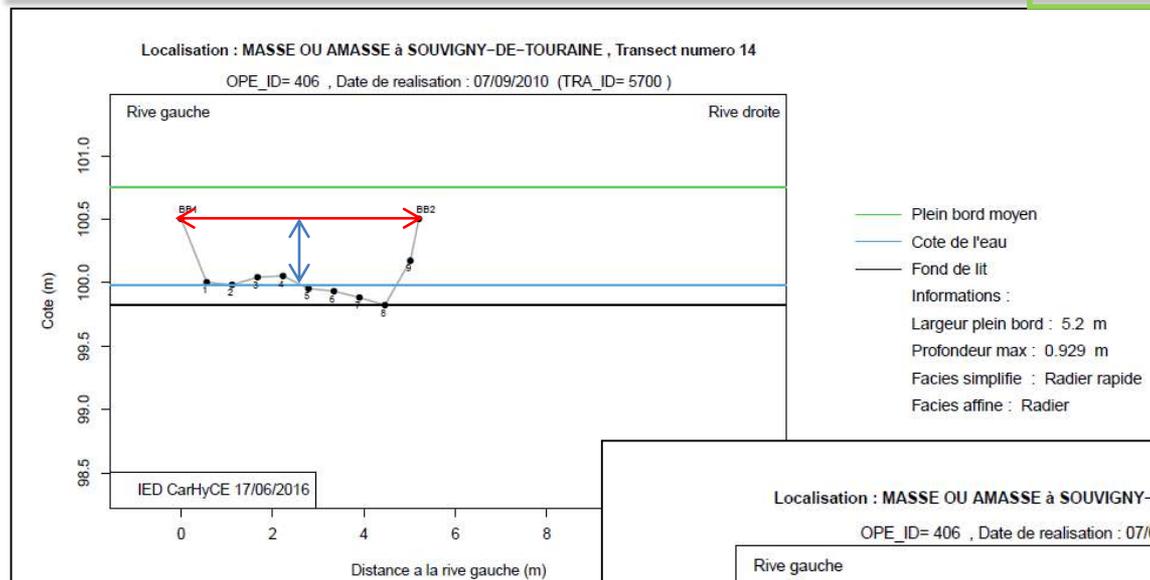
IED Carhyce 26/09/2017

Attention : C'est une
indication qui structure
l'information à conforter
par l'expertise de terrain



Restaurer par rapport à une référence géographique : le gabarit

Exploitation IED-CARHYCE

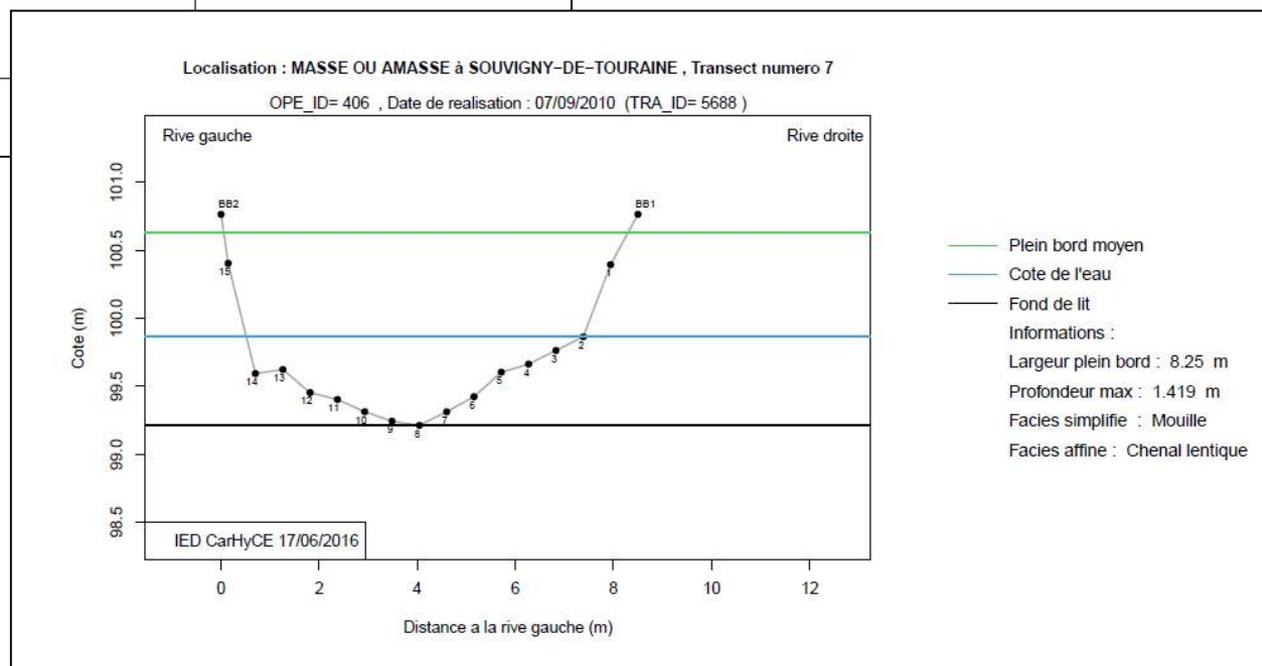


Gabarit type pour les radiers

Lpb = 5m

Hpb = 50 cm

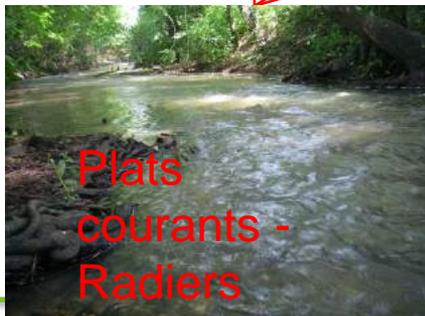
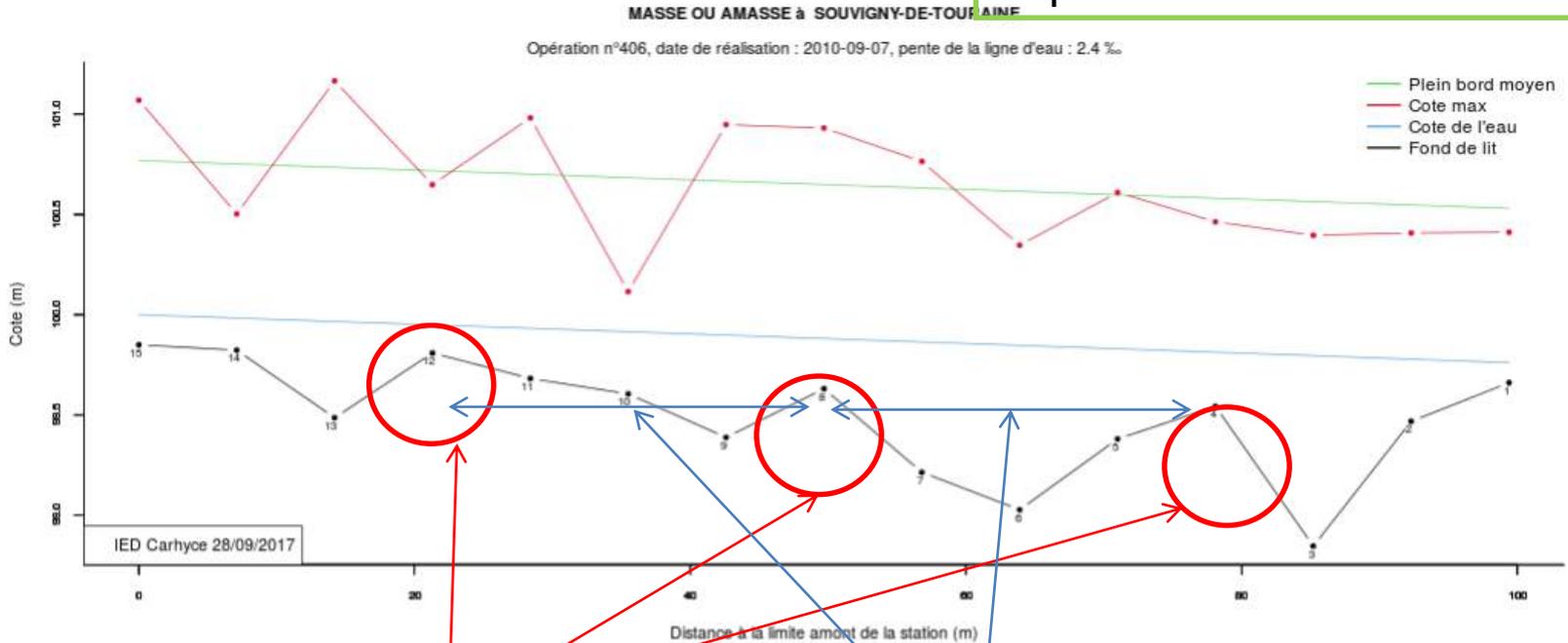
Gabarit type pour les mouilles



B-Définition d'un projet de restauration : le dimensionnement

Restaurer par rapport à une référence géographique : Le profil en long et successions de faciès

Exploitation IED-CARHYCE

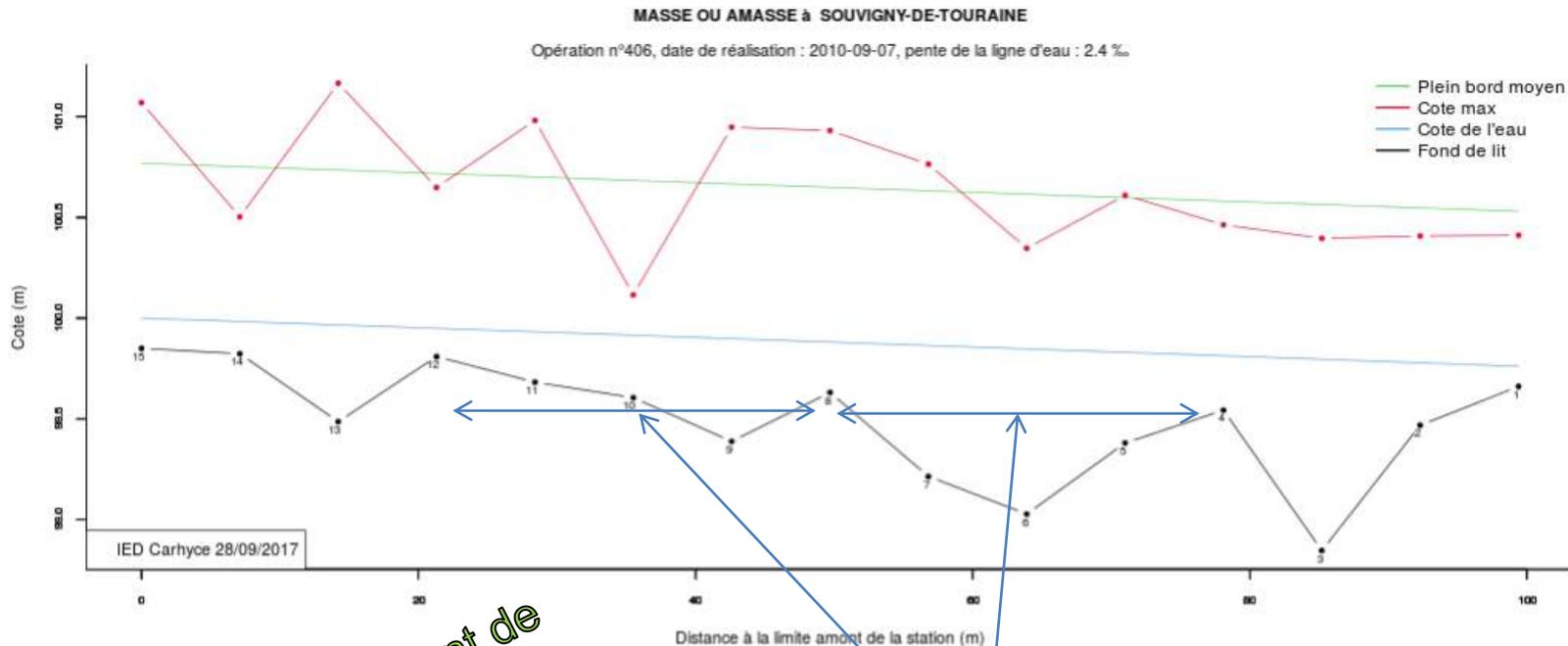


distance alternance successions
de faciès

manque des indications
sur le % de linéaires en
de radiers

Restaurer par rapport à une référence géographique : Le tracé en plan

Exploitation IED-CARHYCE



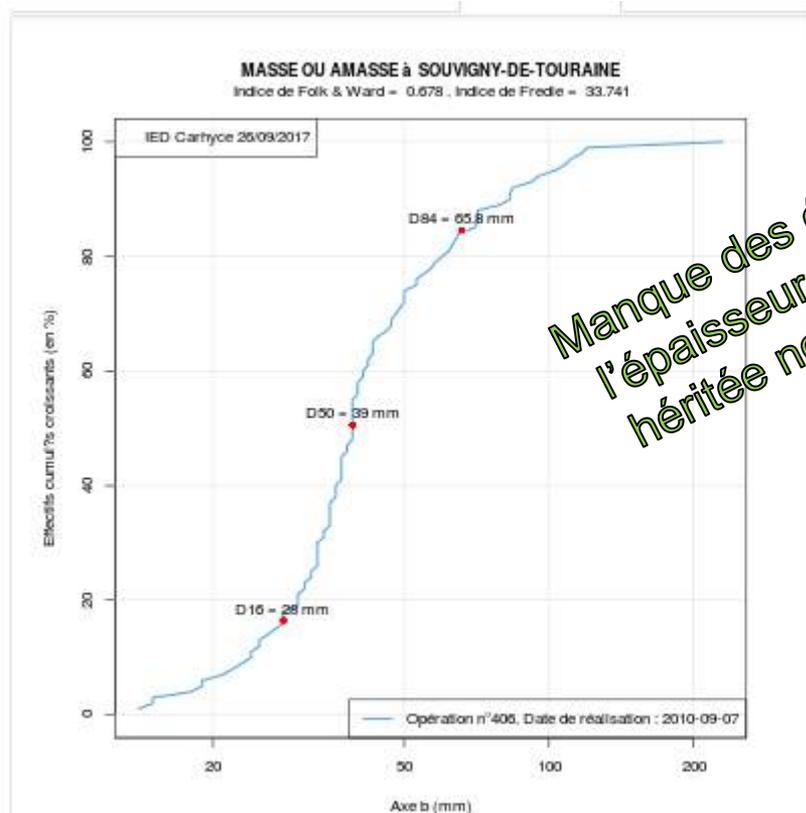
Attention au coefficient de
sinuosité calculé dans
IED!

distance alternance successions
de faciès soit ici un point
d'inflexion environ tous les 30 m
(6X la L_{pb} sur radiers)

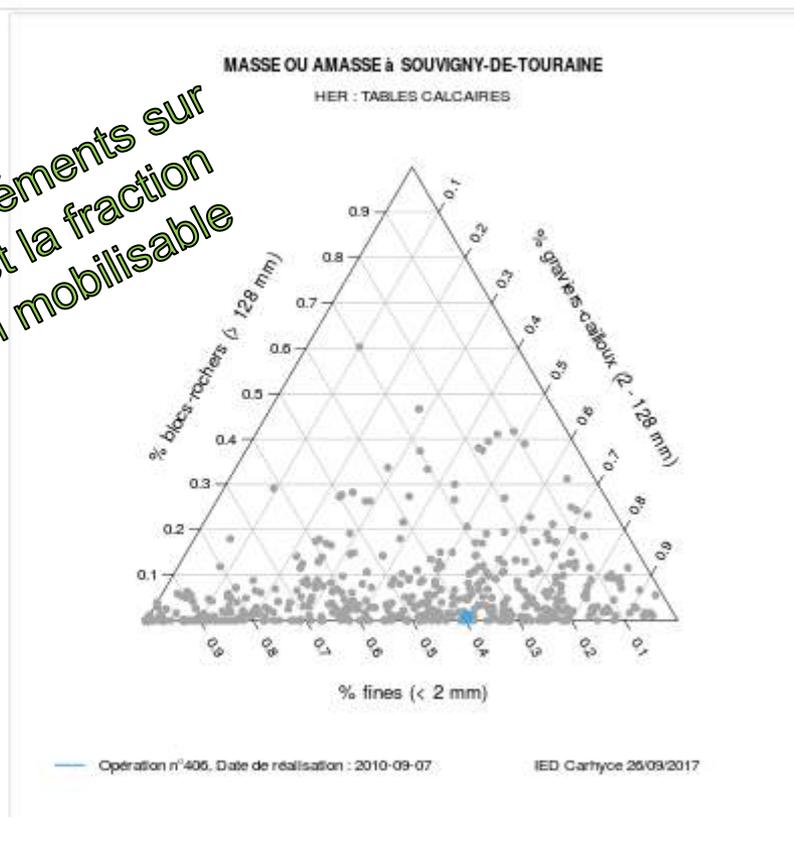
B-Définition d'un projet de restauration : Le dimensionnement

Restaurer par rapport à une référence géographique : La reconstitution du matelas alluvial

Exploitation IED-CARHYCE



Manque des éléments sur l'épaisseur et la fraction héritée non mobilisable



Etendue granulométrique

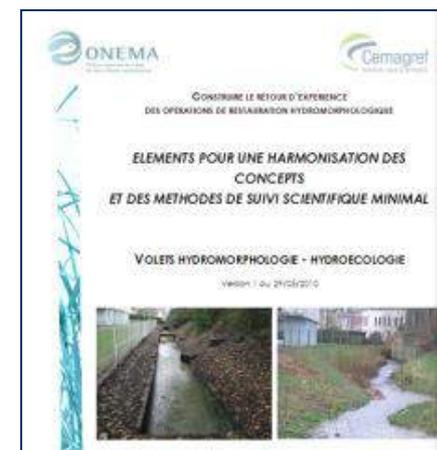
Proportions des classes granulométriques

C- Le suivi : Restaurer, et après ?

Le suivi des opérations de restauration :
Carhyce préconisé dans le guide SSM

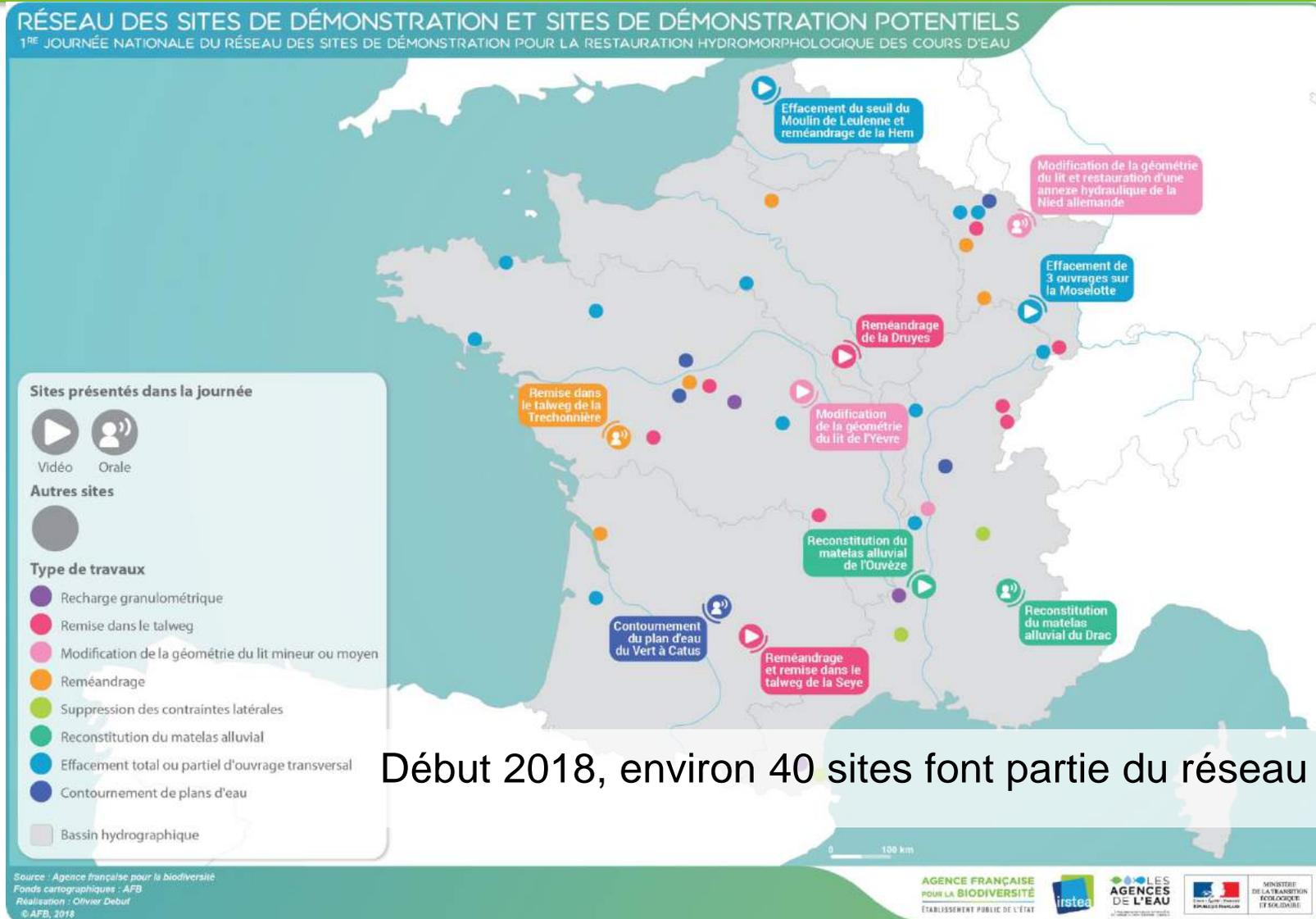


M. Bramard AFB



d'après pwpt de Marlène Meynard, Rever, Avril 2018

Le réseau de sites de démonstration :

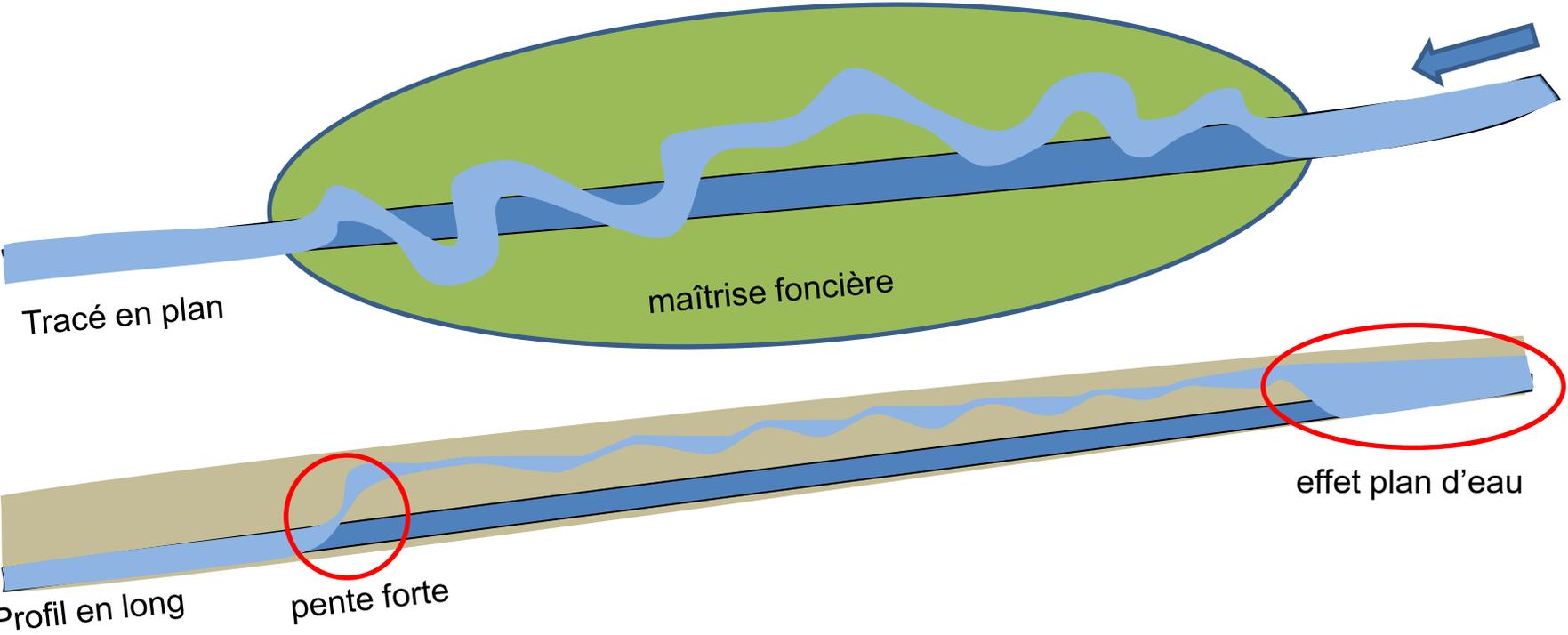


Début 2018, environ 40 sites font partie du réseau

Restaurer ?

ter ou retarder

a restauration



Site de démonstration : Contournement du plan d'eau de la Choisille – Phase travaux (Juin à Octobre 2016)



Photos AFB : Michel Bramard / Laetitia Boutet-Berry

Site de démonstration : Contournement du plan d'eau de la Choisille – Suivi post travaux hydromorphologiques(2017)

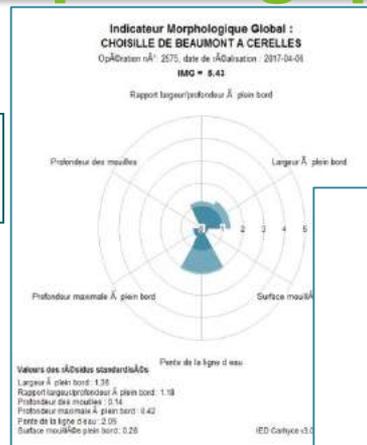
Que dit l'IMG?



Station amont

Station restaurée

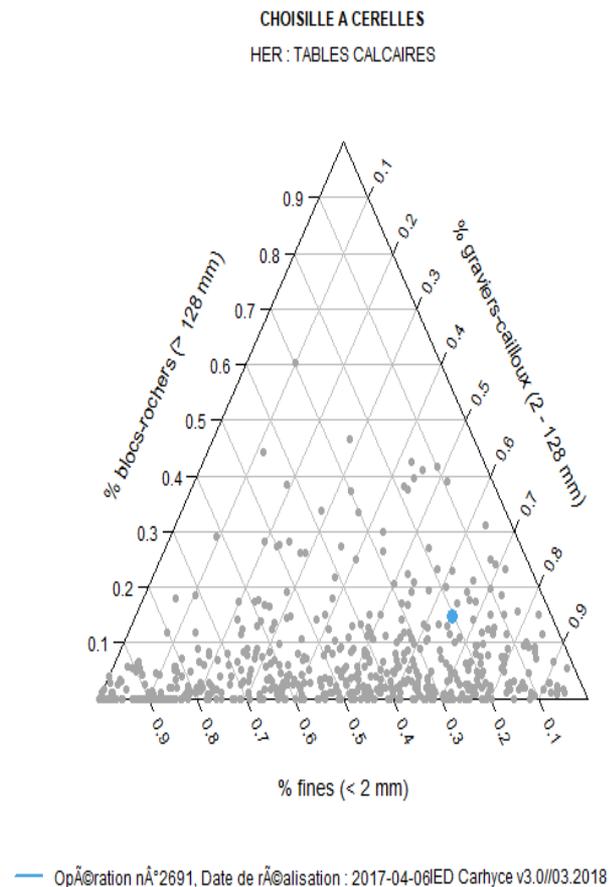
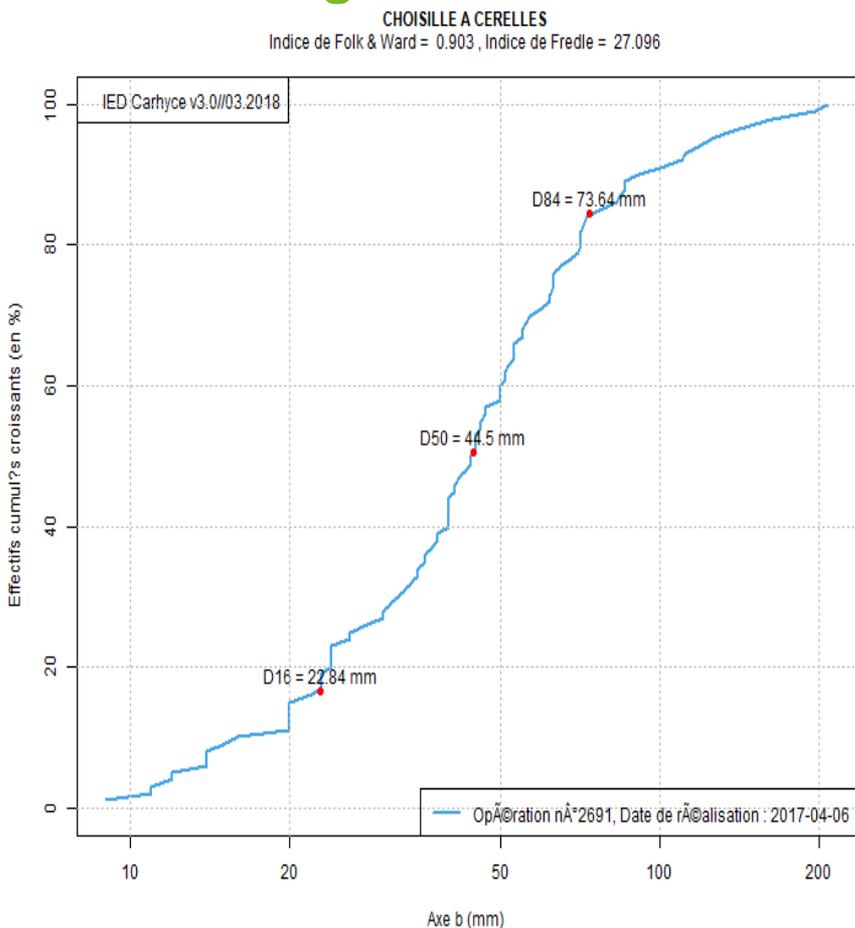
Station aval (RCO)



C- Le suivi

Site de démonstration : Contournement du plan d'eau de la Choisille – Suivi post travaux hydromorphologique(2017)

Que dit la granulométrie ?

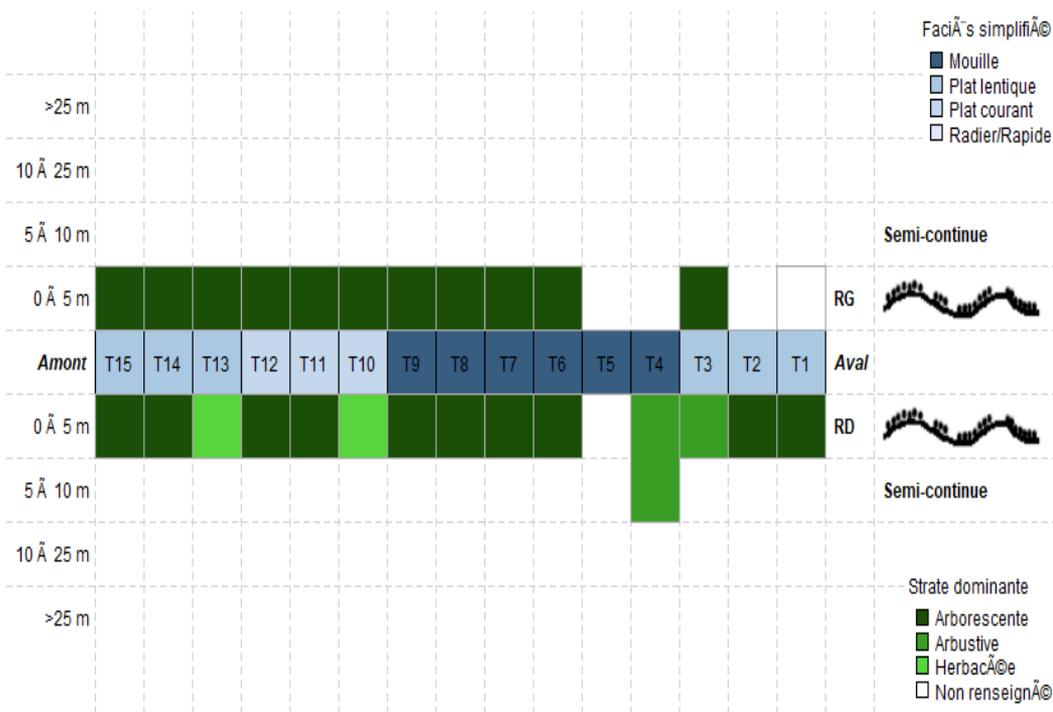


Station restaurée (004449017)

Site de démonstration : Contournement du plan d'eau de la Choisille – Suivi post travaux hydromorphologiques(2017)

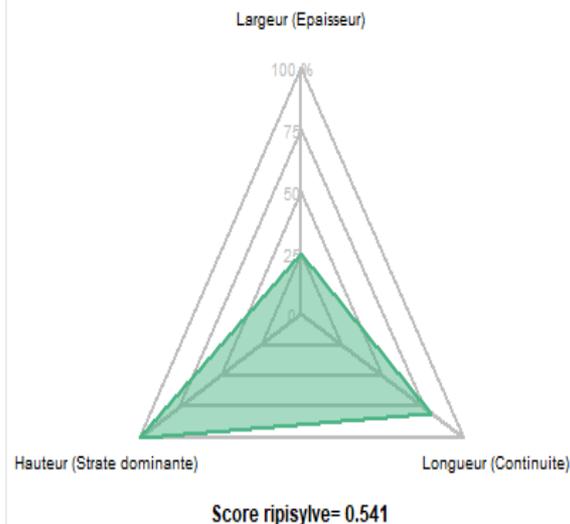
Que dit la diversité de faciès et la ripisylve ?

CHOISILLE DE BEAUMONT A CERELLES
Opération n°: 2575, date de réalisation : 2017-04-06



IED Carhyce v3.0//03.2018

CHOISILLE DE BEAUMONT A CERELLES
Opération n°: 2575, date de réalisation : 2017-04-06

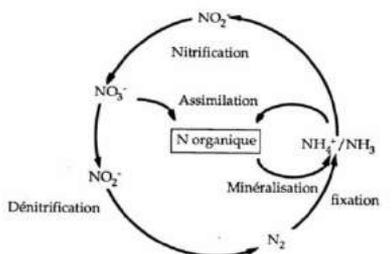


IED Carhyce v3.0//03.2018

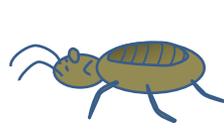
Station Amont (004449005)

Intérêt des restaurations morpho : l'épuration par les cours d'eau

CYCLE REDOX DE L'AZOTE



Cycle rédox de l'azote (Brock & Madigan, 1988)



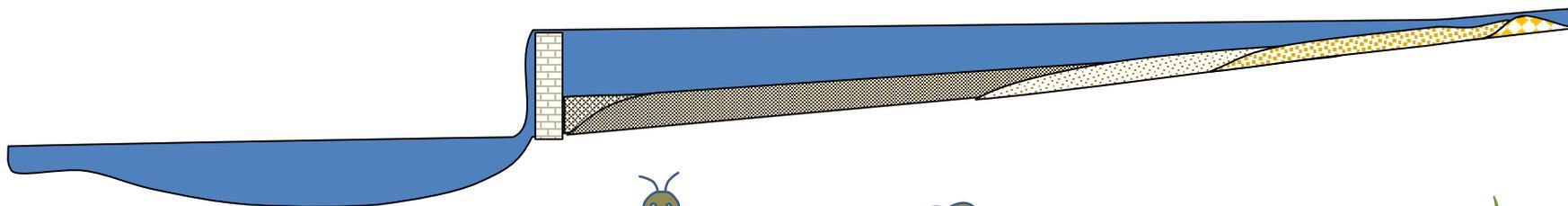
N_2



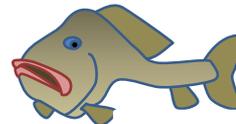
NO_3^-



MO
 NH_4^+



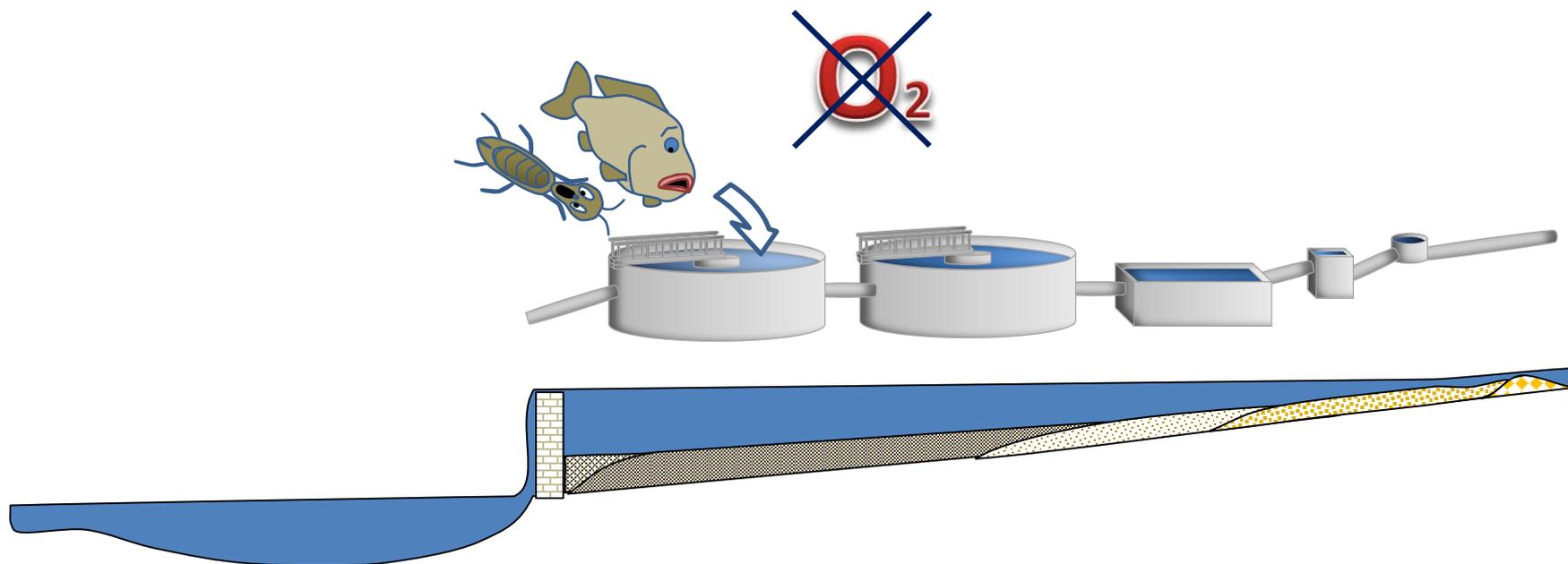
NH_3
 NO_2^-



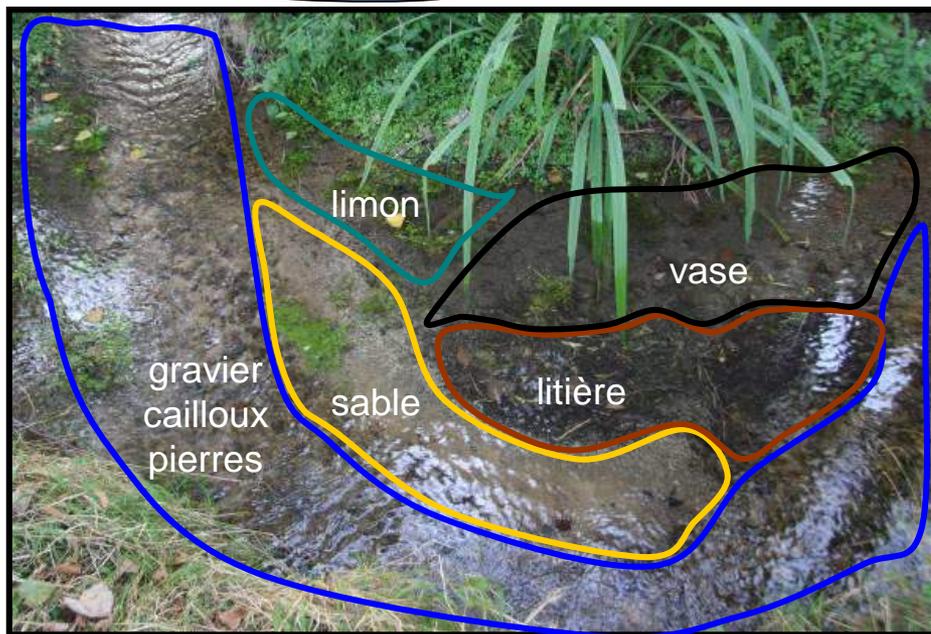
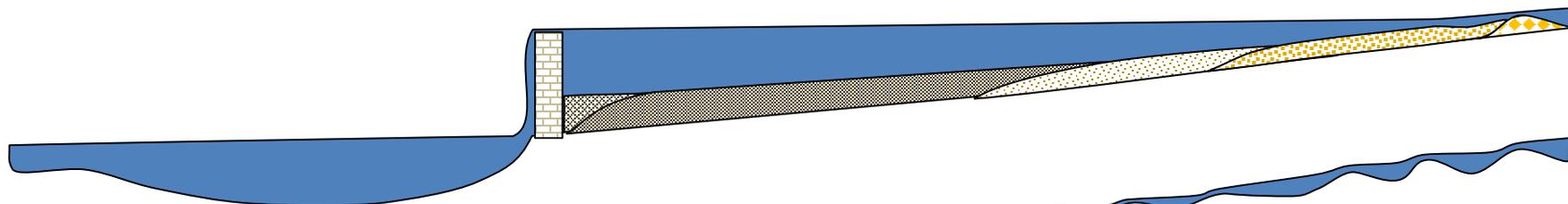
+ T° , P, ...



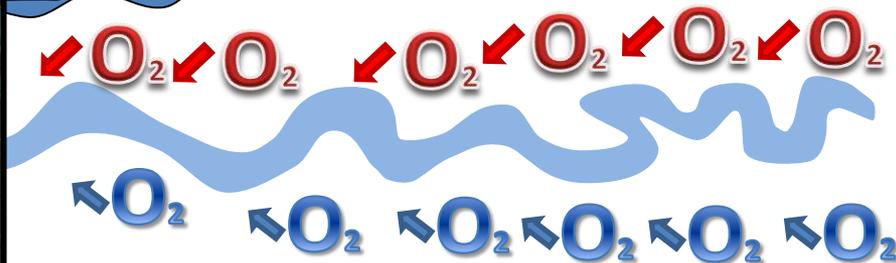
Intérêt des restaurations morpho : l'épuration par les cours d'eau



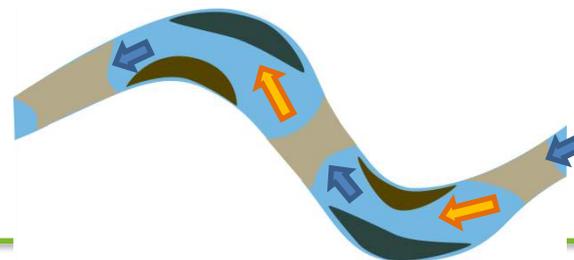
Intérêt des restaurations morpho : l'épuration par les cours d'eau



Répartition des tailles de matériau en fonction des gradients de vitesse



- zones de décantation / réduction (présence de MO)
- zones d'infiltration / aération



Intérêt des restaurations morpho : l'épuration par les cours d'eau

Allonger le temps de
résidence de l'eau
(sans excès !)

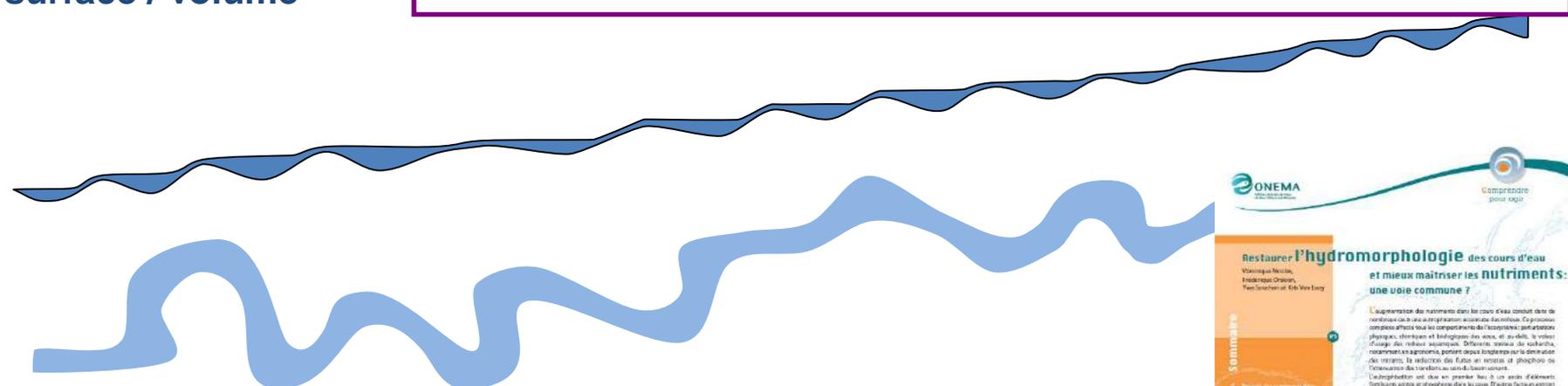
Un indice de sinuosité de 1,9 pour un cours d'eau en zone agricole
a amélioré l'élimination des nitrates de **91 %** Oraison et al 2011*

Equilibrer le ratio
surface / volume

Elimination des nitrates au printemps : **40 000 km** de cours d'eau
canalisés ou **2900 km** de cours d'eau à méandres Oraison et al 2011*

Favoriser les zones
d'échanges avec la
zone hyporhéique

Les échanges (et processus associés) se
déroulent prioritairement **en tête de chaque
radier** (Rhoads, et al. 2003, Ensign and Doyle 2006;
Bukaveckas 2007; Roberts et al. 2007).*



Intérêt des restaurations morpho : la résilience

Améliorer la résilience



Restaurer la rugosité

Tableau relatif à la détermination des valeurs de n

Matériaux constitutifs de la berge	terre	n ₀	0,020
	graviers fins		0,024
	graviers grossiers		0,028
Degré d'irrégularité	très faible	n ₁	0,000
	faible		0,005
	moyen		0,010
	important		0,020
Variations de section	progressives	n ₂	0,000
	occasionnelles		0,005
	fréquentes		0,010
Présence d'obstacles	négligeable	n ₃	0,00
	faible		0,01
	appréciable		0,02
	élevé		0,04
Végétation dans le lit à plein bord	basse	n ₄	0,0075
	moyenne		0,0175
	haute		0,0375
	très haute		0,0750
Méandrement	faible (SI = 1-1,2)	m	1,00
	appréciable (SI = 1,2-1,5)		1,15
	fort (SI > 1,5)		1,30
Formule de Cowan	$K = 1/[(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m]$		

Remarque : Exemple d'ordres de grandeur des valeurs du coefficient de rugosité (K) :

	K
Cours d'eau naturel avec ripisylve, bois en rivière et profil irrégulier :	5 - 20
Cours d'eau peu sinueux à rectiligne avec peu de ripisylve :	20-30
Cours d'eau rectiligne, recalibré avec peu d'irrégularités :	30 - 40

Intérêt des restaurations morpho : la résilience

Améliorer la résilience



© AFB M. Bramard

M. Bramard

Restaurer le matelas alluvial

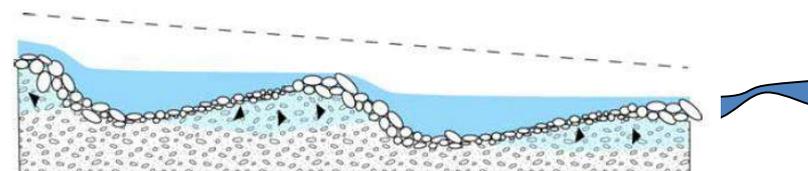


Figure 1: Schematic views of hyporheic flow through gravel a) cross-section (after *Stewart, 2004*) b) map view (from *Bilby, 1984*)

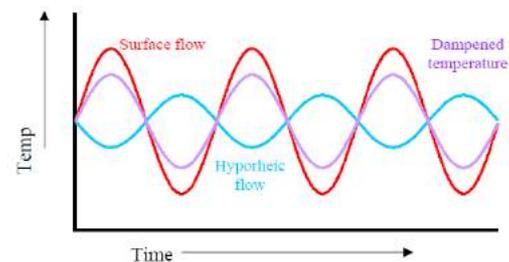


Figure 2: Idealized schematic demonstrating how out-of-phase diurnal temperature peaks and troughs of hyporheic and surface flow combine to buffer temperature extrema. Hyporheic flow that is 12 hours out of phase will lower peak temperature the most, but any phase lag will result in a peak temperature decrease.

Exemple source de Ringère

Absence de référence



1983

Exemple source de Ringère



Biblio citée

Alexander R.B., Boyer E.W., Smith R.A., Schwarz G.E. & Moore R.B., 2007, The role of headwater streams in downstream water quality, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 43 (1), 41-59.

BARNAUD G., 2013, Spécificités des têtes de bassin, cours d'eau et zones humides associées, Rencontres Eau, Espaces, Espèces - Préservation des zones humides, de la continuité écologique et de la biodiversité - Atelier « Têtes de bassin », Tours.

Bossis M., 2014, Étude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant armoricains en situation de référence, ONEMA / Université de Rennes 1,

Bukaveckas P. A. 2007 Effects of Channel Restoration on Water Velocity, Transient Storage, and Nutrient Uptake in a Channelized Stream

Craig, N., and Kuenzler, E.J., 1983, Land use, nutrient yield, and eutrophication in the Chowan River Basin: Raleigh, North Carolina, The University of North Carolina Research Institute Report No. 205, 69 p.

Duda A., 1982 : Municipal point source and agriculture nonpoint source contributions to coastal eutrophication

Ensign, S. H., and M. W. Doyle (2006), Nutrient spiraling in streams and river networks, **GOMI T.**, SIDLE R.C., RICHARDSON J.S., 2002, Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *Bioscience*, 52 : 905-916.

Hamilton S.K., Peterson B.J., 2004, Stream Denitrification and Total Nitrate Uptake Rates Measured Using a Field ¹⁵N Tracer Addition Approach, *Limnology and Oceanography*, 49, 809-820

JAN, 2013, Etude du fonctionnement hydromorphologique de référence des cours d'eau en tête de bassin versant sur le Massif Armoricaïn, ONEMA / Université de Rennes 1,

Lassaletta L., García-Gómez H., Gimeno B., Rovira J. 2010, Headwater streams: neglected ecosystems in the EU Water Framework Directive. Implications for nitrogen pollution control

Mulholland P.J., Valett H.M., Webster J.R., Thomas S.A., Cooper L.W.,

Oraison F., SOUCHON Y., LOOY K.V., 2011, Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?, Synthèse bibliographique, ONEMA/CEMAGREF, 34 pages.

Pinay G., 2015 comm Chambéry : Le bassin versant : un réacteur biogéochimique aux interfaces eaux souterraines et superficielles http://www.brgm.fr/sites/default/files/2015-12_colloque-ressources_10-pinay.pdf

Portland A., Grant G., Haggerty R., Lewis S., Burkholder B., Wampler P., 2006, : Potential effects of gravel augmentation on temperature in the Clackamas River, Oregon

Rheinhardt RR, Rheinhardt MC, Brinson MM, Faser KE., Jr Application of reference data for assessing and restoring headwater ecosystems. *Ecol Restoration*. 1999;7:241-251.

Rhoads, B.L., Schwartz, J.S. and Porter, S. (2003). Stream geomorphology, bank vegetation, and three-dimensional habitat hydraulics for fish in midwestern agricultural streams. *Water Resources Research*. 39p

Roberts, B.J., Mulholland, P.J. and Houser, A.N. (2007). Effects of upland disturbance and instream restoration on hydrodynamics and ammonium uptake in headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society*. 26(1): 38-53.

SER : L'abécédaire sur l'écologie de la restauration de la SER Internationale Society for Ecological Restoration International, Science & Policy Working Group (Version 2, octobre, 2004)* https://c.ymcdn.com/.../SER_Primer/ser-primer-french-2004.pdf

Souchon Y. 2002 : l'habitat des cours d'eau dans tous ses états. Mémoire HDR 114p.

THOMAS S.A., VALETT H.M., MULHOLLAND P.J., FELLOWS C.S., **Vierron A.** 2015, Caractérisation de tronçons de «référence hydromorphologique» sur le territoire de la Délégation Interrégionale Centre Poitou-Charentes, ONEMA/IMACOF

WEBSTER J.R., DAHM C.N., PETERSON C.G., 2001, Nitrogen Retention in Headwater Streams : The Influence of roundwater - Surface Water Exchange, *The Scientific World*, 1, 623-631.

WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y. & PAULIN L., 1998, Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, Editions Cemagref, 14, 158 pages.

Merci aux collègues AFB,
Agences de l'eau, aux MO
techniciens rivières, agents de
fédés de pêche, de CD, CEN...
pour leur contribution

Merci particulièrement à Laetitia
Boutet-Berry, Marlène Meynard,
Anne Vivier, Mickaël Le Bihan
pour leur collaboration et
l'utilisation de leurs supports

