

# EXPERTISE TRANSPORT SOLIDE – MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉVOLUTIONS DES FONDS DE LA RIVIÈRE DES PLUIES



21 juin 2022

L'énergie au cœur des territoires



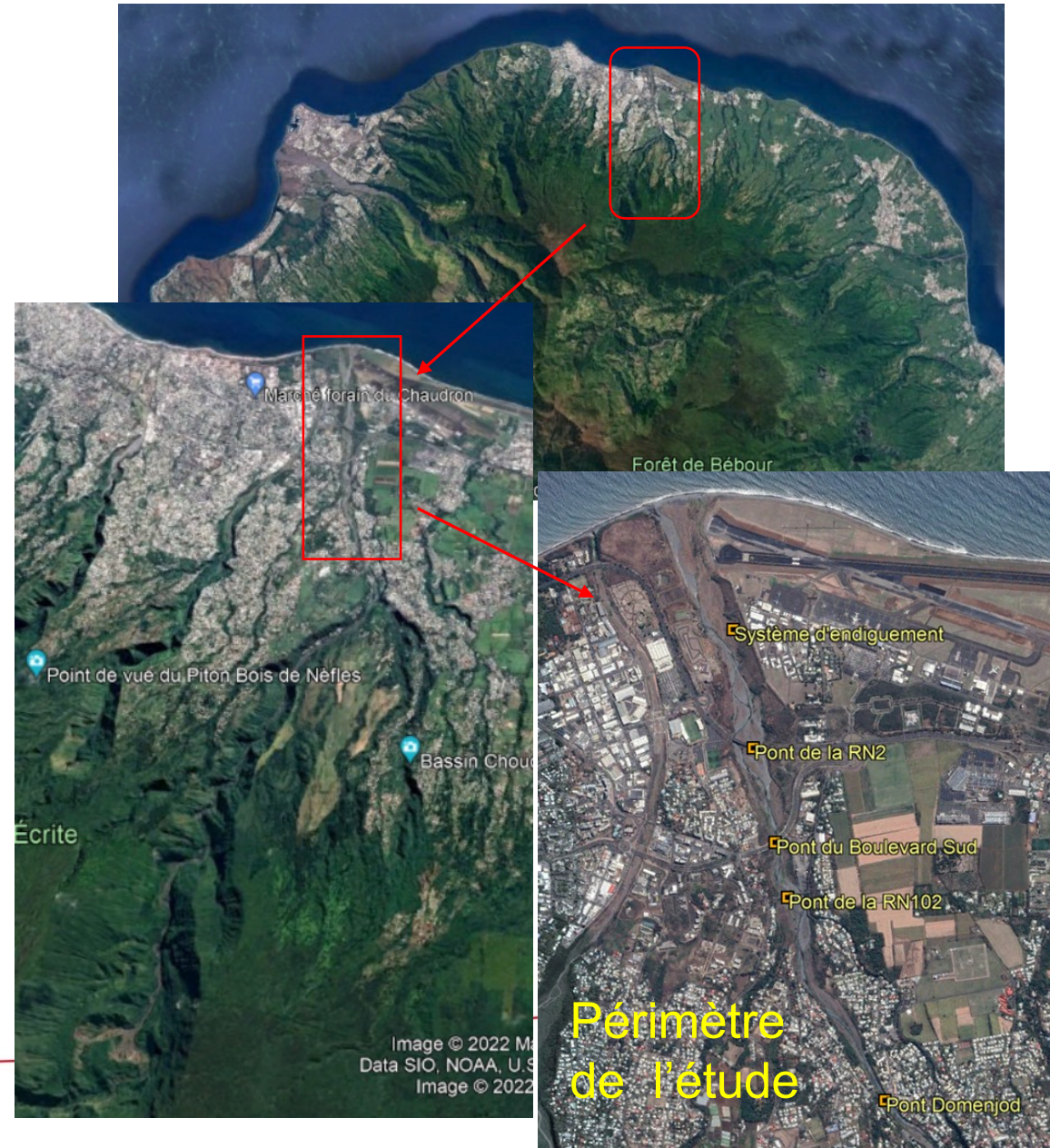
# Sommaire

- ❖ **Contexte de l'étude**
- ❖ **Reconnaissance du bassin versant**
- ❖ **Analyse des données d'entrées**
- ❖ **Etude des évolutions à plus ou moins longs termes**
- ❖ **Points d'attentions et compléments**



# Rappel des éléments de l'étude

- ❖ **Client** : DEAL La Réunion – Service Eau de Biodiversité
- ❖ **Planning** : de janvier à septembre 2021
- ❖ **Objectif** : déterminer les évolutions morphologiques à court et moyen termes sur le périmètre de l'étude afin de mettre à jour l'EDD des endiguements de protection de l'aéroport
- ❖ **Périmètre de l'étude** : tronçon de 4.5 km entre le pont Domenjod et l'océan

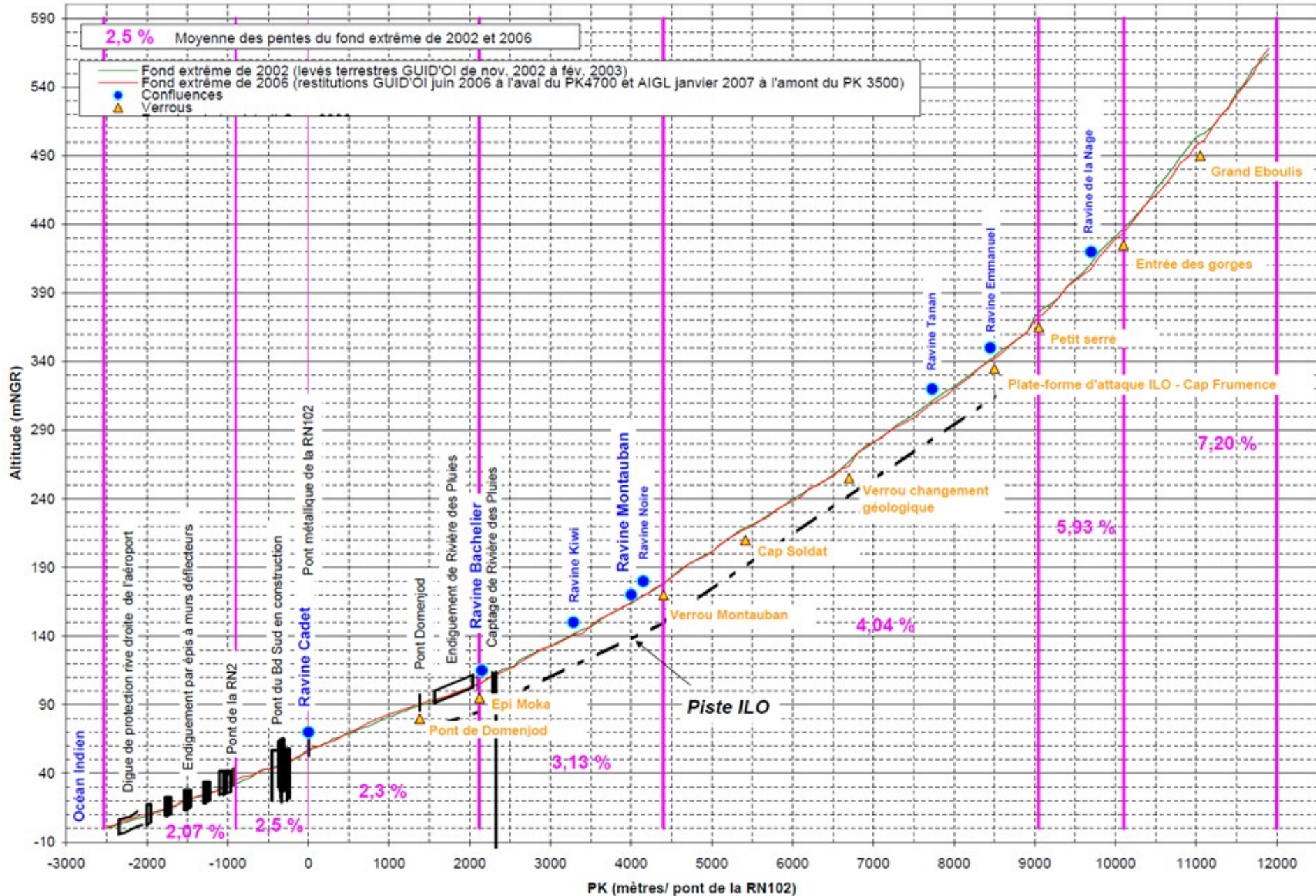


# Démarche envisagée pour les études hydro-sédimentaires à La Réunion

- Collecte et une analyse des documents disponibles,
- Complément des données manquantes (bathy, topo, granulo),
- Préanalyse de l'évolution globale du profil en long à partir de ces données,
- Modélisation numérique des évolutions systématiques du profil en long attendues à plus ou moins longs termes à l'aide du logiciel EVOFOND.

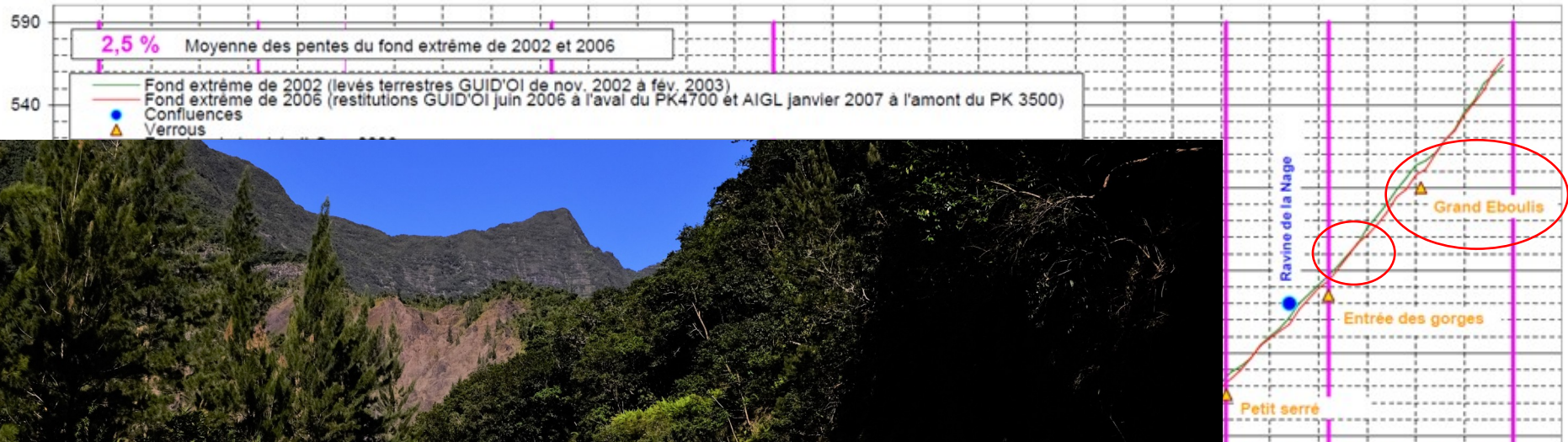


# Reconnaissance du bassin versant



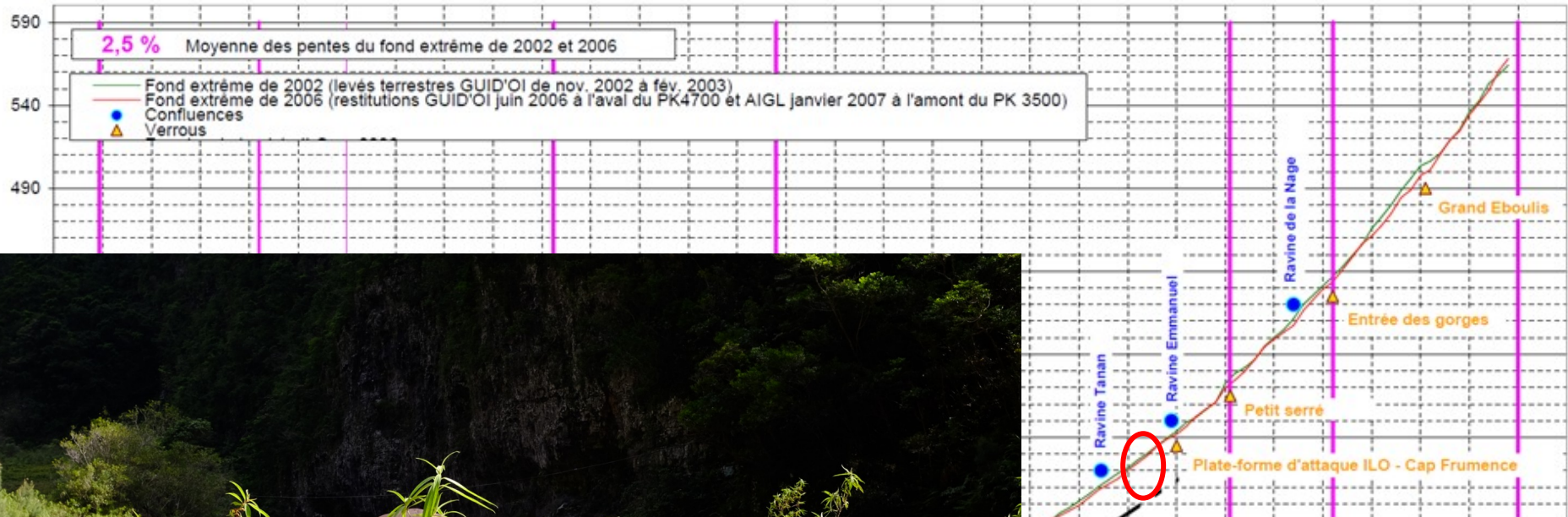


# Reconnaissance du bassin versant - Zones d'apports massifs





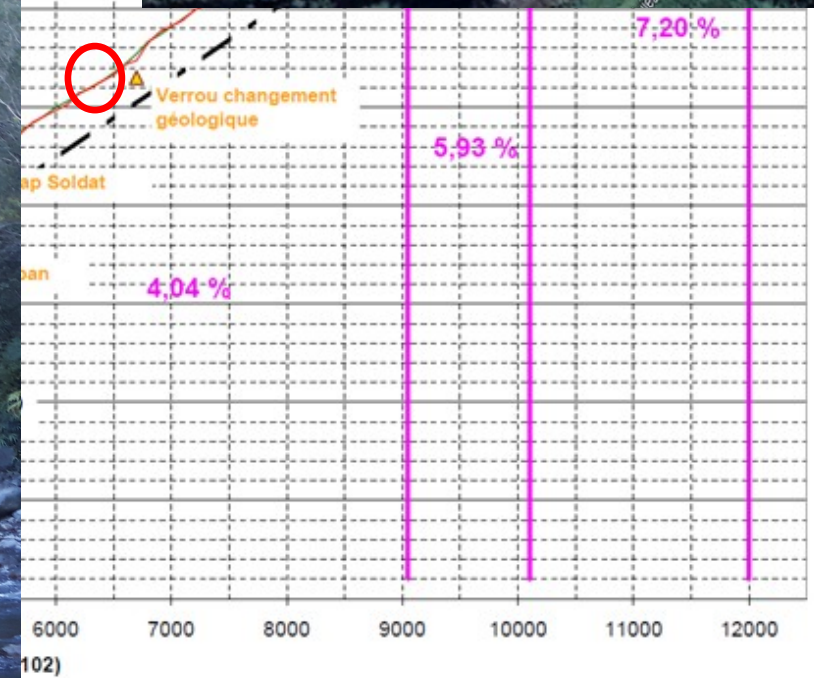
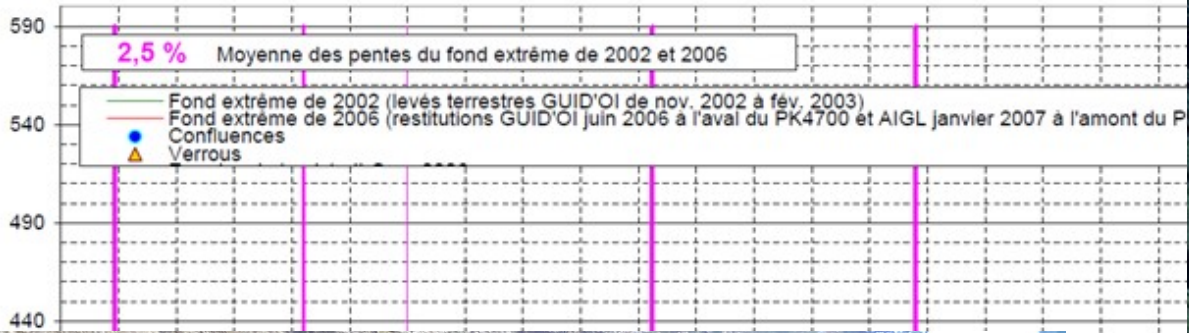
# Reconnaissance du bassin versant - Zones de remobilisation et d'apports intermédiaires



PK (mètres/ pont de la RN102)



# Reconnaissance du bassin versant - Zones de remobilisation et d'apports intermédiaires





# Reconnaissance du bassin versant – Points singuliers



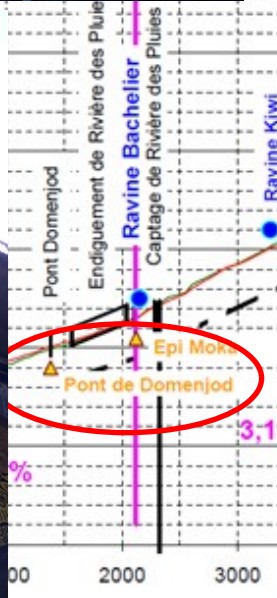
Vue amont



Station LSPIV  
(OE)



Radar (CVH)



Berges indurées  
RG

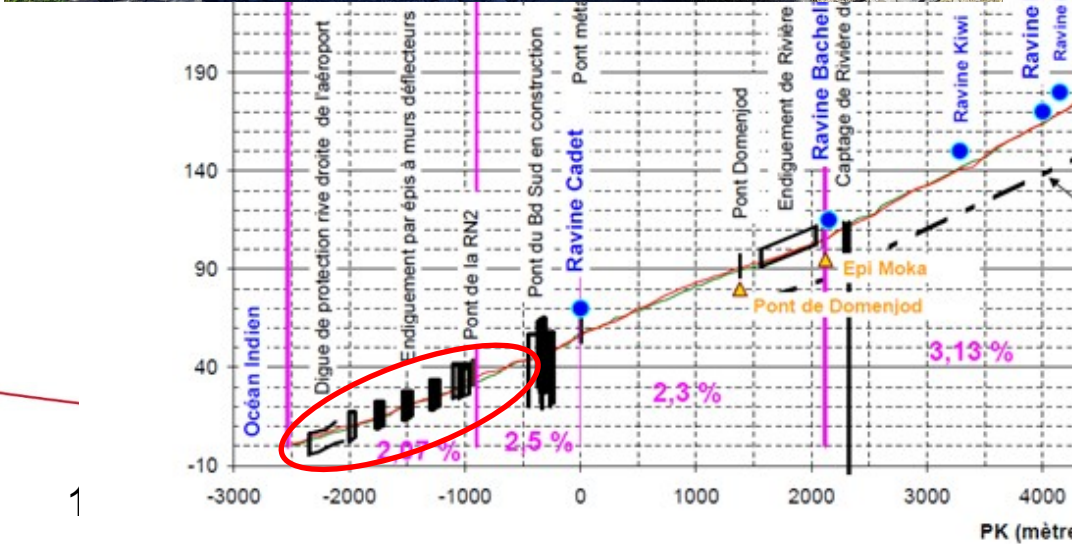
PK (mètres/ pont de la RN102)



# Reconnaissance du bassin versant – Cône de déjection et secteur d'endiguement



Pratelles et auques ILO Cap Frémence





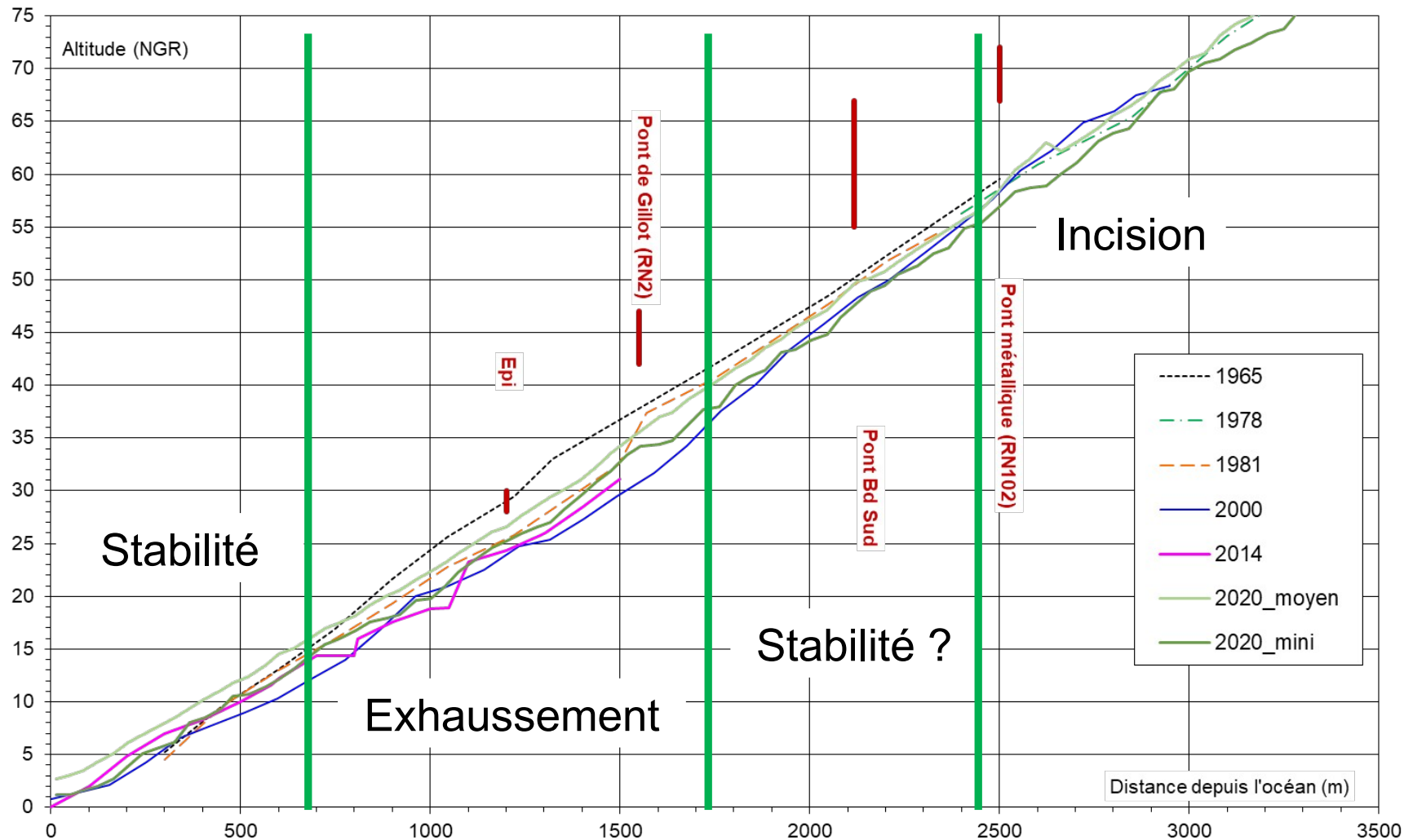
# Analyse des données d'entrées

## Données topographiques

- Données nombreuses depuis les années 60 mais éparses en terme :
  - De profils levés (profils en long, profils en travers);
  - De périmètre couvert (peu de données récentes en amont du pont RN10 et du pont Domenjod);
  - De référence longitudinale (référence de l'axe hydraulique);
  - De référence des profils en travers.
- ➔ **Besoin de standardiser les levés topo et le référencement des données**
- Données récentes concentrées dans la zone d'étude de l'EDD (aval pont RN2)
- Levés LIDAR
  - En 2020 entre l'océan et le pont Domenjod
  - Amont du pont, utilisation du levé disponible sur le site Litto3D® du SHOM (2016)

# Analyse des données d'entrées

## Evolution du profil en long entre 1965 et 2020



Ecart fond moyen / fond mini ~ +1 à 2 m

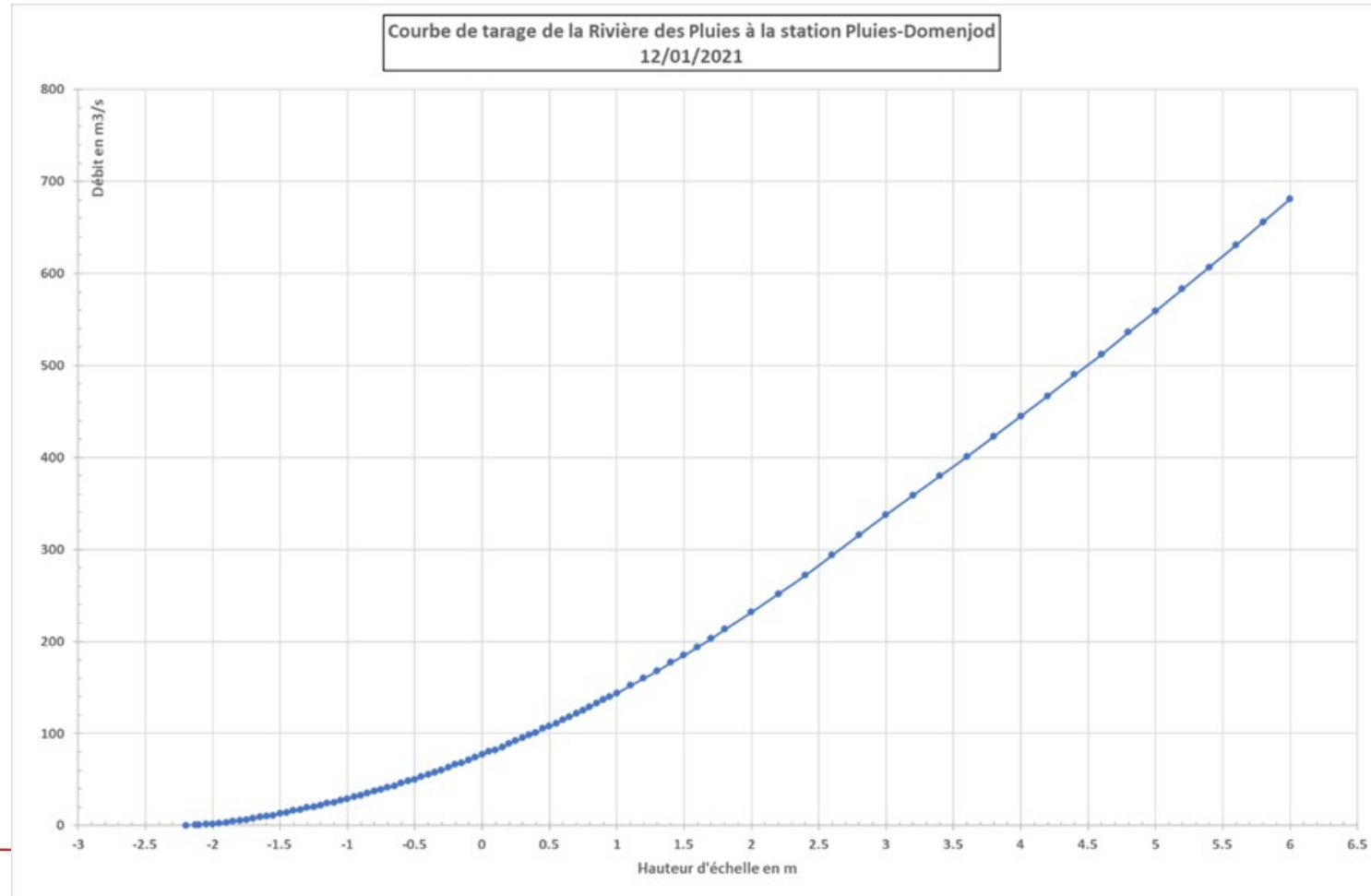
# Analyse des données d'entrées

## Données hydrologiques

- Deux stations « disponibles » pour la mesure des débits :
  - Station CVH Domenjod mise en service en août 2006, équipée d'un radar – courbe Q(h)

Période de retour (année)	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)
2	180
5	400
10	700
20	970
30	1130
50	1330
100	1610

Débits de crues  
caractéristiques estimés  
au pont Domenjod  
Source : Artelia 2008





# Analyse des données d'entrées

## Données hydrologiques

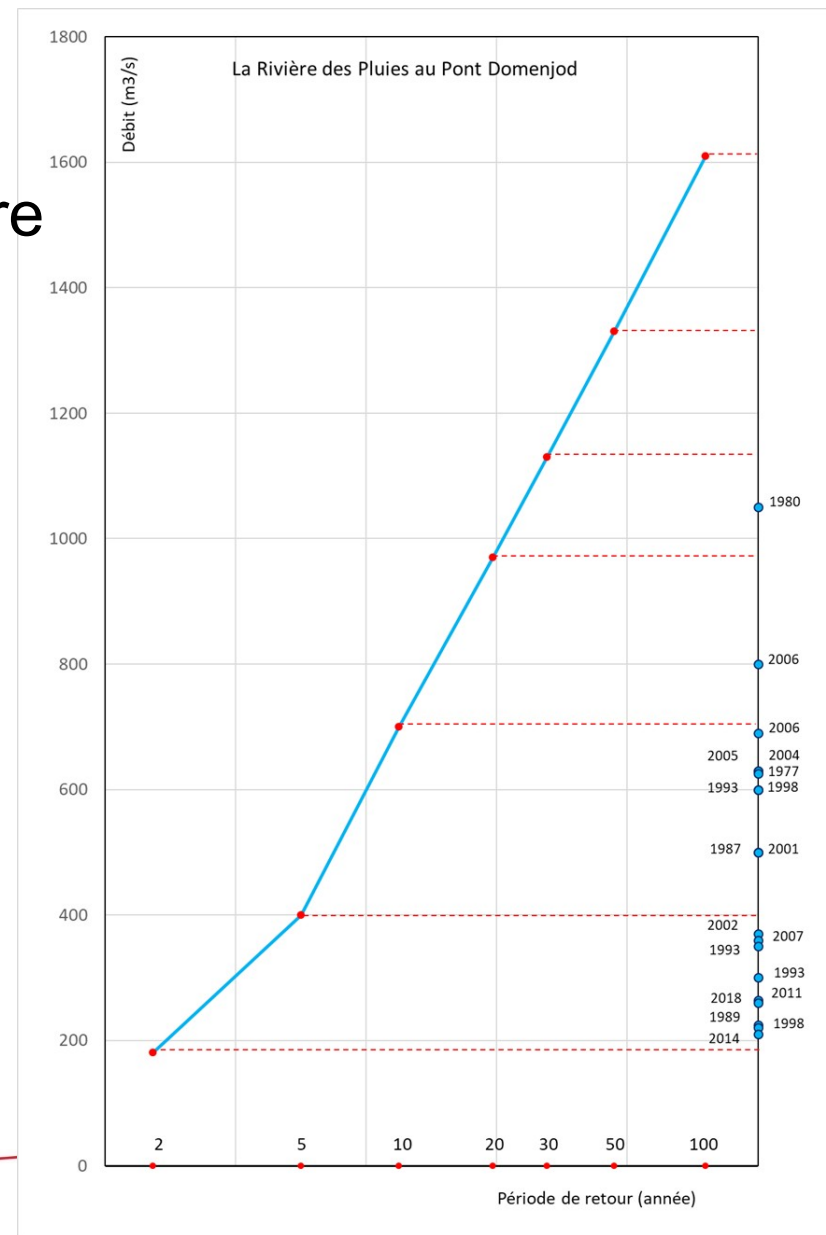
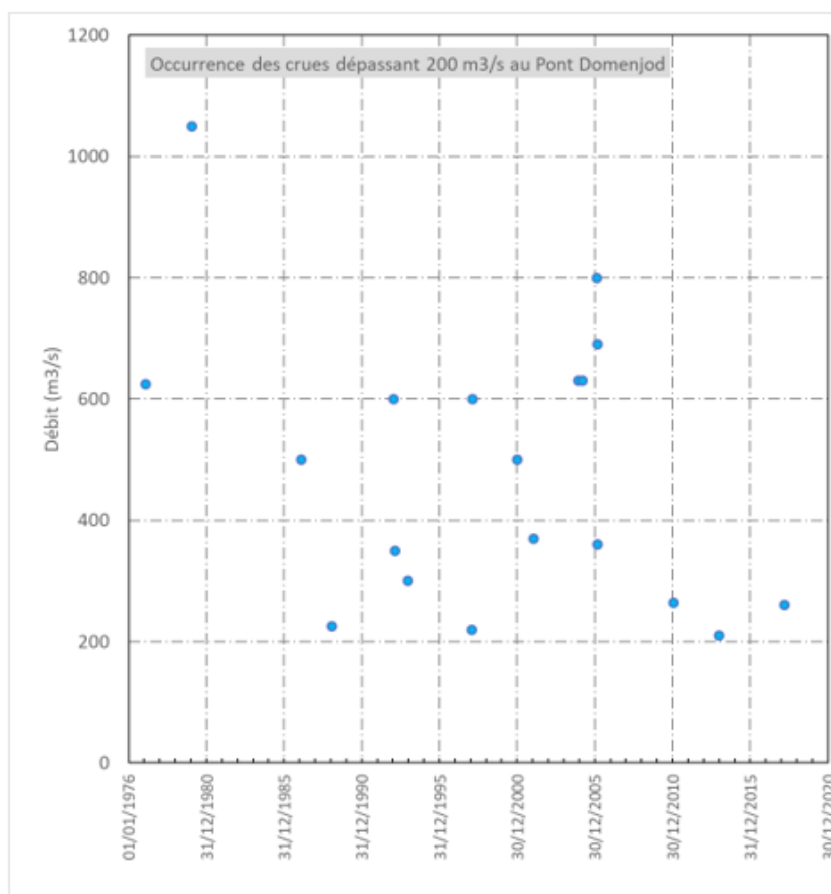
- Deux stations « disponibles » pour la mesure des débits :
  - Station CVH Domenjod mise en service en août 2006, équipée d'un radar – courbe  $Q(h)$
  - Station Office de l'Eau
    - Equipée d'une sonde de pression – Courbe  $Q(h)$  – Installée dans les gorges sous le Piton Tanan entre 2009 et 2015 – détruite en 2014 et 2015 puis abandonnée
    - Equipée d'un système vidéo (LSPIV) – Installée au pont Domenjod en 2020

# Analyse des données d'entrées

## Données hydrologiques

- Peu de données disponibles;
- Peu d'évènement significatifs depuis 2006;
- La crue la plus forte observée se situe entre Q20 et Q30.

Année	Débit de pointe en m <sup>3</sup> /s
06/02/1977	625
27/01/1980	1050
13/02/1987	500
29/01/1989	225
13/01/1993	600
01/03/1993	350
13/12/1993	300
19/02/1998	600
03/02/1998	220
06/01/2001	500
22/01/2002	370
15/12/2004	630
24/03/2005	630
17/02/2006	800
05/03/2006	690
24/02/2006	360
27/01/2011	264
01/01/2014	210
06/03/2018	260



# Analyse des données d'entrée

## Données hydro-sédimentaire - Granulométrie

- Plusieurs granulométries réalisées depuis 1966 pour les études antérieures avec des résultats disparates;
- Derniers éléments en date de 2000
  - Difficile de définir une granulo représentative sur le secteur modélisé à partir des seules données disponibles.
  - Réalisation d'échantillonnages complémentaires.

Date		1966	1982	1983	2000
		Diamètre (cm)			
Diamètre nature mini modélisable		Nature	Nature	Nature	Nature (PK100)
% de poids inférieur au diamètre		m	cm	cm	cm
	5%			0,125	
	10%	0,2		0,2	1
	20%	0,6	0,45	0,6	1,5
	30%	1,6	1,2	1,6	3
	40%	4	2,51	4	4,5
	<b>50%</b>	<b>8,5</b>	<b>4,47</b>	<b>8,5</b>	<b>5,5</b>
	60%	14	6,76	14	7,5
	70%	21	10	21	10
	80%	30	16,21	30	10,5
	90%	40	31,62	40	15
100%	80	100	100	33	



# Analyse des données d'entrée

## Données hydro-sédimentaire - Granulométrie

- 9 sites de prélèvements entre l'océan et la Ravine Montauban et 13 granulométries réalisées par comptages de surface





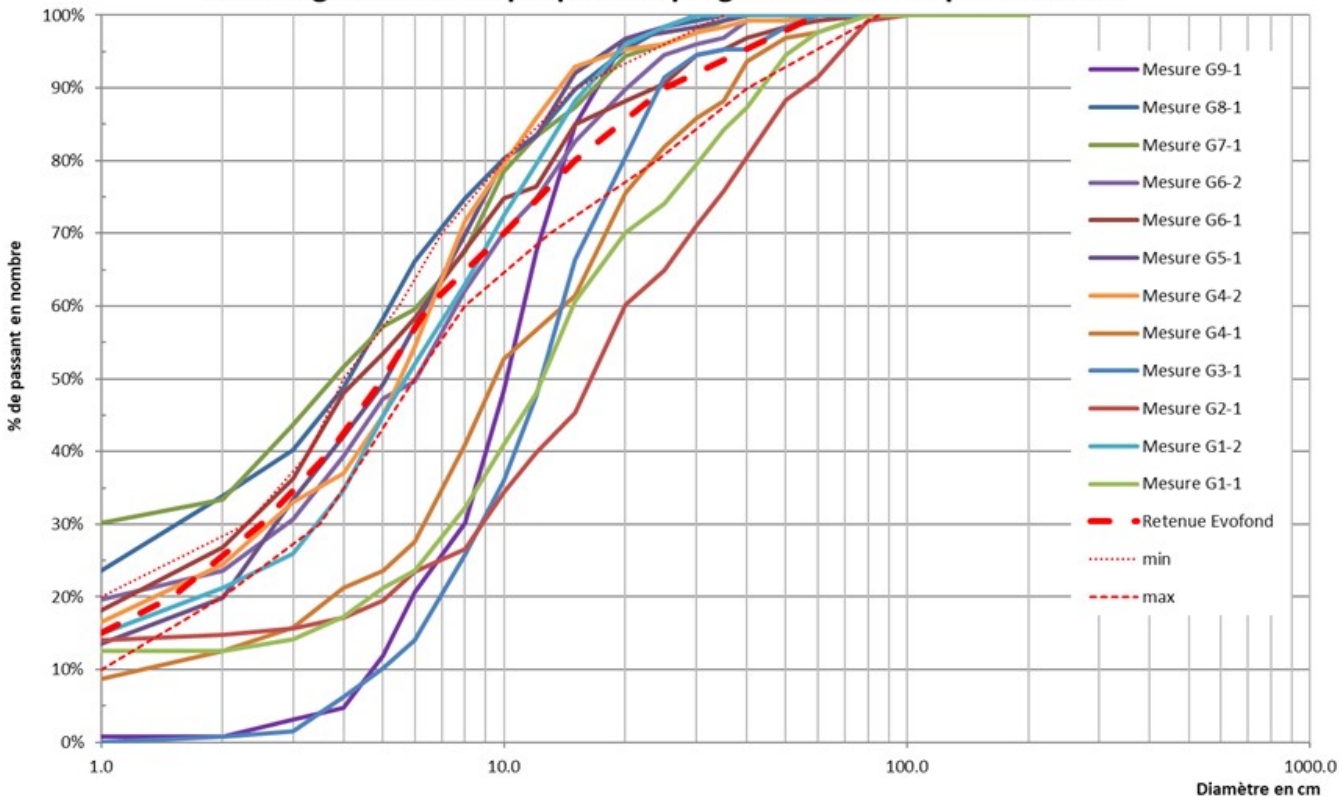
# Analyse des données d'entrée

## Données hydro-sédimentaire - Granulométrie

### ➤ Obtention de courbes représentatives :

- des sédiments transportés en crue (G2-2, G3-1, G4-2, G5-1, G6-1, G6-2, G7-1, G8-1);
- des éléments structurant le lit, qui influencent la rugosité du chenal et lui déterminent sa capacité de résistance à l'érosion (G1-1, G3-1, G2-1 et G4-1)
- des matériaux présents sur le trait de côte, apportés par les crues précédentes et lavés des éléments fins par l'océan (G9-1)

Courbe granulométrique par comptage de surface et prélèvement



Courbes granulométriques retenues


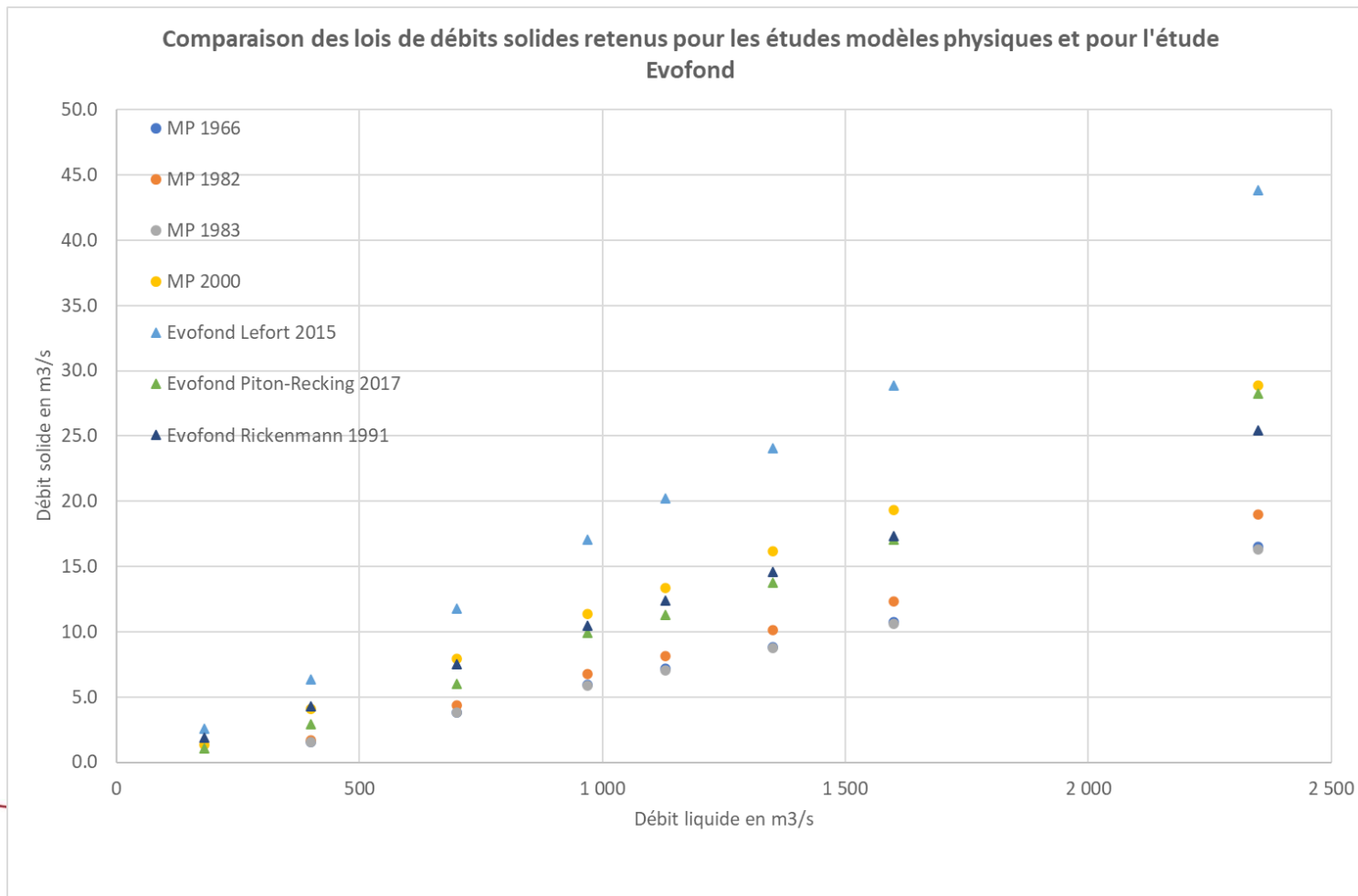
		moyenne			
	min			max	
<1	10%	1.0	15%	1.0	10%
1.0	20%	1.5	20%	2.0	20%
2.3	30%	2.5	30%	3.5	30%
3.3	40%	3.7	40%	4.6	40%
4.0	50%	5.0	50%	6.0	50%
5.5	60%	6.5	60%	8.0	60%
7.0	70%	10.0	70%	13.0	70%
10.0	80%	15.0	80%	24.0	80%
15.0	90%	25.0	90%	40.0	90%
35.0	100%	60.0	100%	85.0	100%

# Analyse des données d'entrée

## Données hydro-sédimentaire - Lois de transport solide

### ➤ Bilan des lois utilisées lors des études précédentes

- Lois identiques retenue pour les études sur MP de 1966, 1982 et 1983
- Comparaison des 3 lois les plus adaptées dans Evofond



Loi de Lefort 2015  
retenue car sécuritaire  
vis-à-vis des enjeux liés  
à la mise à jour de  
l'EDD

## Données hydro-sédimentaire - Evaluation des apports solides

- Evaluation des apports essentielle pour affiner les calculs
- Existence de données mais lacunaire (périmètre concerné par les apports, durée des évènements...) → Expertise à mener

Source	Auteur - Année	Apports
Etude diagnostic du transport solide et de l'évolution du fond du lit de la Rivière des Pluies	BRGM Décembre 2003	Apport de 30 000 T soit 15 000 m <sup>3</sup> pour une crue décennale (débit non précisé) Estimation réalisée sur la base des études sur modèle de Sogreah de 1966 et 1982
		Apport de 120 000 T soit 60 000 m <sup>3</sup> pour une pointe de débit de 600 m <sup>3</sup> /s durant 10h entre deux passages à 200 m <sup>3</sup> /s (Hyacinthe)
Schéma d'extraction de la Rivière des Pluies	Sogreah, LCHF 1988	Transport solide total de la RdP évalué à 3 300 T/km <sup>2</sup> / soit 87 000 T/an ou 43 000 m <sup>3</sup> /an pour un BV de 26.5 km <sup>2</sup>
Boulevard Sud de Saint Denis - Etude sur modèle réduit du franchissement de la Rivière des Pluies	Hydretudes/ERTM/CNR 2000	Apport de 360 000 m <sup>3</sup> pour un hydrogramme représentant une Q100 : débit de pointe de 1 300 m <sup>3</sup> /s, temps de montée 7h, durée totale 18h, pente de 2.2%. L'apport est de 390 000 m <sup>3</sup> pour le même hydrogramme avec une pente de 2.3%
Etude PGRI	Sogreah 2008	Apports calculés par application de la formule de Lefort dans le programme Cavalcade pour plusieurs évènements : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dina (403 m<sup>3</sup>/s) – 223 500 m<sup>3</sup></li> <li>- Crue de décembre 2004 (489 m<sup>3</sup>/s) – 37 500 m<sup>3</sup></li> <li>- Crue de février 2006 (811 m<sup>3</sup>/s) – 282 500 m<sup>3</sup></li> <li>- Diwa (717 m<sup>3</sup>/s) – 296 500 m<sup>3</sup></li> <li>- Gamède (400 m<sup>3</sup>/s) – 308 000 m<sup>3</sup></li> </ul> Ces volumes correspondent à la somme des apports de matériaux des 6 principaux BV : Grands Eboulis, Emmanuel-remparts, Emmanuel-ilets, Montauban, Sèche et Cadet

# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Modèle Evofond

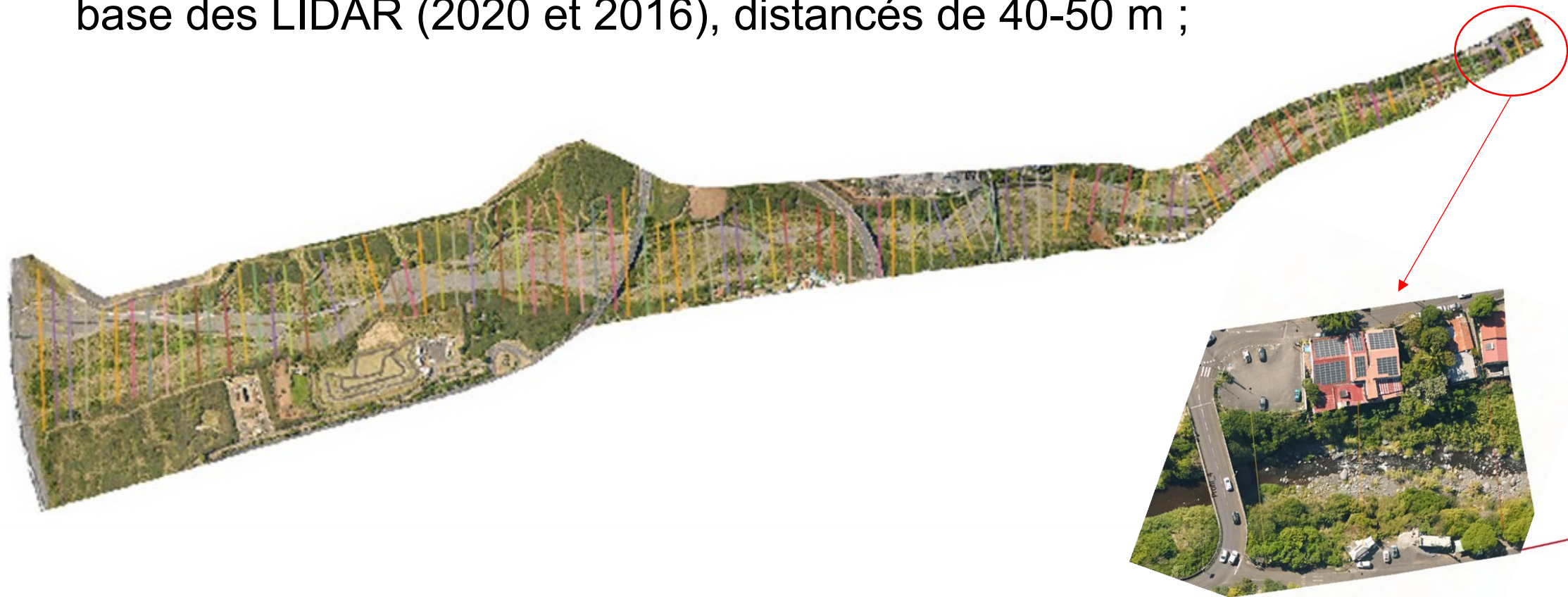
- Modèle développé par l'ONF-RTM depuis 2018 (accès libre) ;
- Permet la modélisation 1D de l'évolution systématique du niveau du fond de lit sous l'effet d'écoulements torrentiels avec charriage ou charriage hyper concentré ;
- Débits solides peuvent être calculés à l'aide de nombreuses formules de transport solide par charriage adaptées aux cours d'eau à forte pente (Rickenmann, Recking, Lefort...) ;
- Approche simplifiée de l'hydraulique par un calcul de hauteur d'écoulement en régime critique sans propagation d'onde de crue ;
- Testé sur un jeu de données provenant d'essais sur MP (erreur moyenne de  $\pm 20\%$ ) ;
- Appliqué avec succès pour l'étude de plusieurs torrents et rivières torrentielles du nord des Alpes françaises pour lesquels le RTM disposait de nombreuses données (torrent du Riffol par exemple).



# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Données d'entrée du modèle Evofond - Bathymétrie

- Définition d'un axe hydraulique qui a pour référence l'axe du pont de la RN102 (abscisse  $< 0$  à l'aval et  $> 0$  à l'amont);
- Génération de 150 profils entre l'océan et la Ravine Montauban sur la base des LIDAR (2020 et 2016), distancés de 40-50 m ;



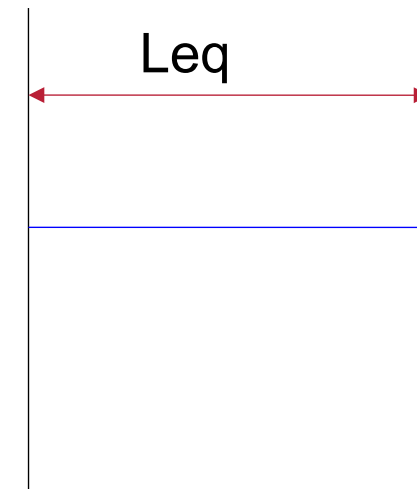
# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Données d'entrée du modèle Evofond - Bathymétrie

### ➤ Pré-traitement des profils en travers en déterminant :

- Cote minimum du profil en m NGR ;
- Hauteur critique de l'écoulement en m ;
- Cote critique de l'écoulement en m NGR (hauteur critique + altitude minimum) ;
- Largeur au miroir en m ;
- Section critique en  $m^2$  ;
- Cote moyenne en m NGR, (moyenne des cotes du profils situés entre les  $Y_{min}$  et  $Y_{max}$  à  $Q$  fixé)
- Largeur équivalent à saisir dans Evofond.

Profil réel



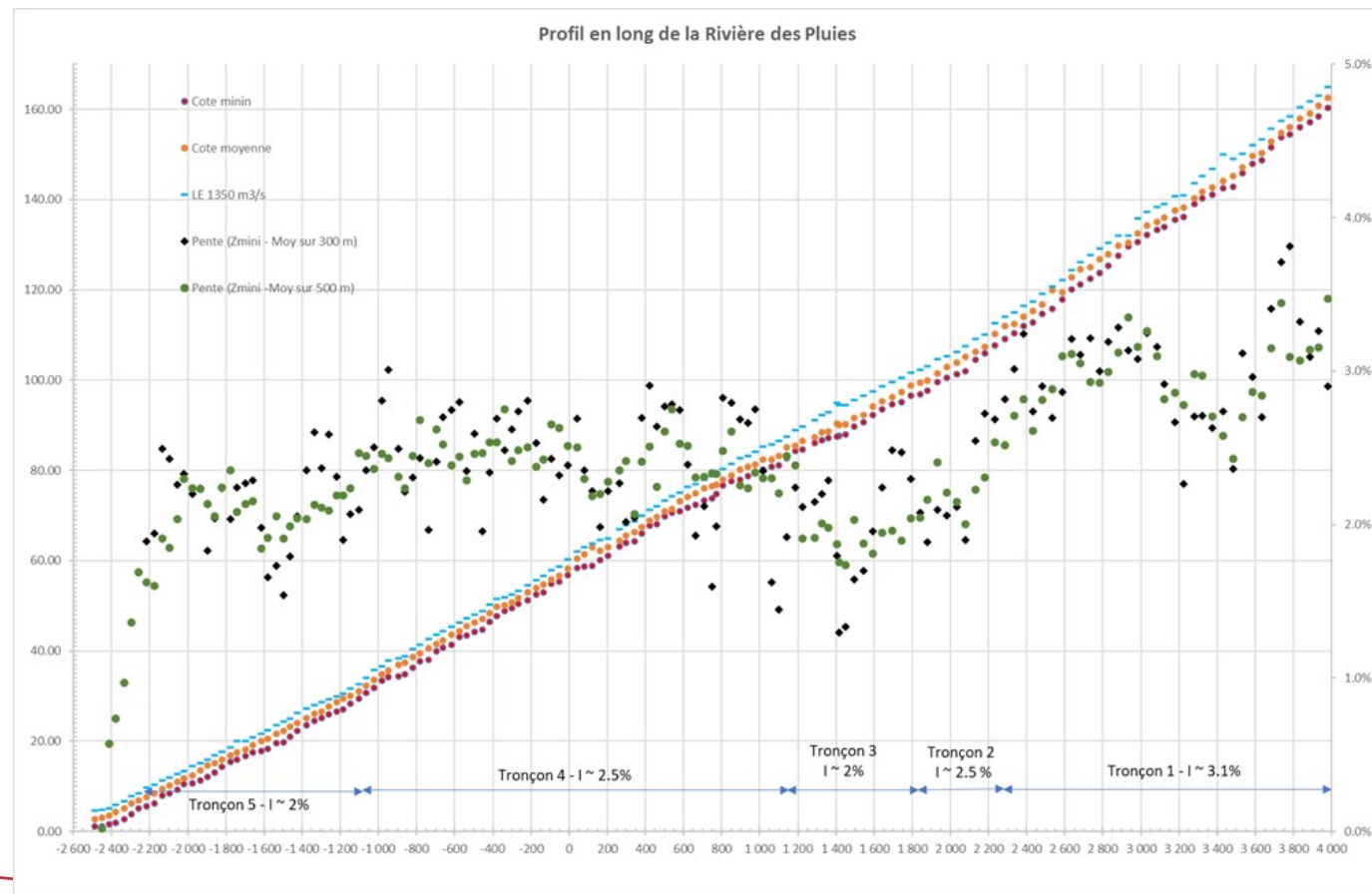
Profil Evofond



# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Données d'entrée du modèle Evofond - Bathymétrie

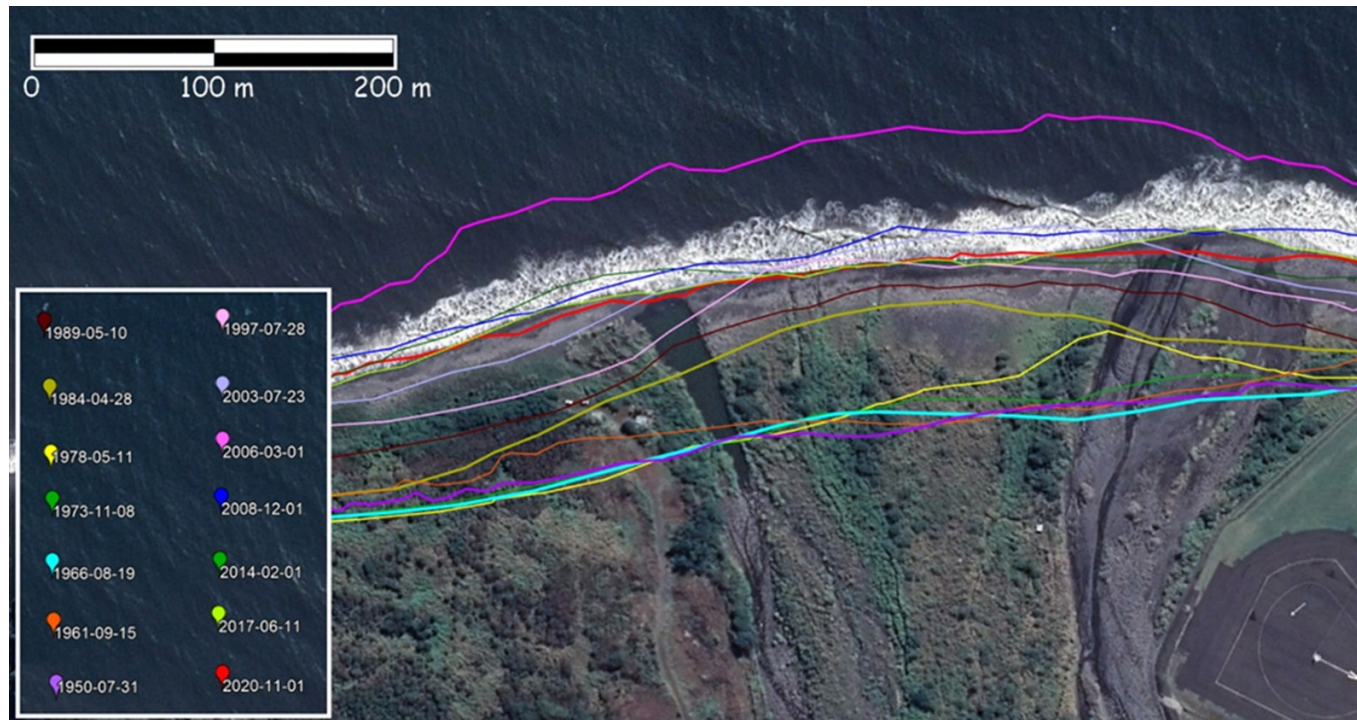
- Analyse du profil en long actuel
  - Identification des tronçons de pentes homogènes
  - Calcul de la ligne d'eau (hauteur critique)



# termes

## Données d'entrée du modèle Evofond - Bathymétrie

- Analyse de l'évolution historique de la position du trait de cote
  - Modification de la condition limite aval
  - Impact sur le bilan sédimentaire dans le secteur aval
  - Analyse montre une avancée du trait de côte de +80 m par rapport à la situation actuelle (situation post 2006)





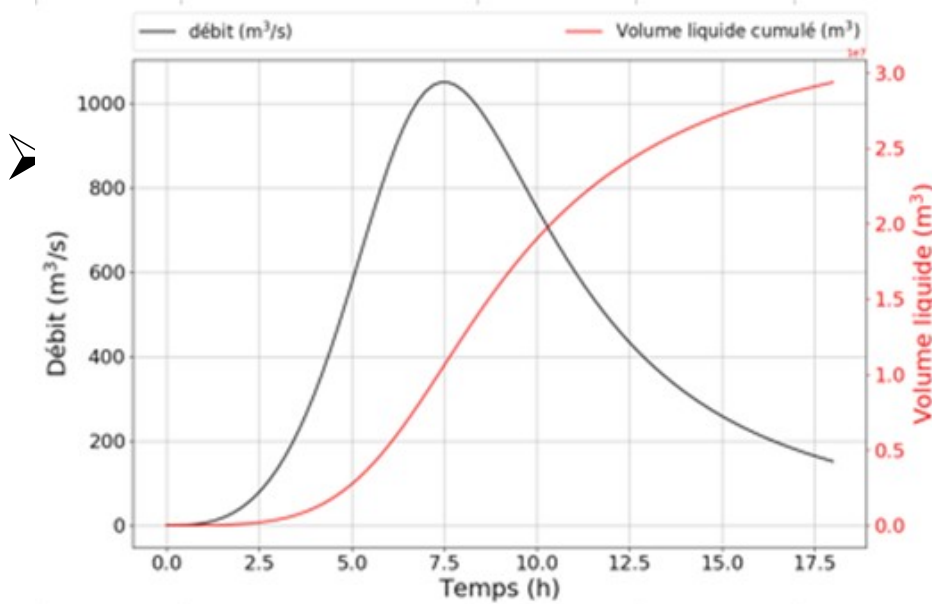
# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Données d'entrée du modèle Evofond - Hydrologie

### ➤ Scénarios de crue unique

- Hydrogramme court type EDD 2016 (6h)
- Hydrogramme court étude CNR 2000 (18h)
- Hydrogramme long étude CNR 2000 (50h)

Débit de pointe en m <sup>3</sup> /s	Occurrence (Selon l'étude PGRI de 2008)	Commentaires
2 350	Q1000	Crue extrême
1 600	Q100	Crue centennale type PPRI
1 350	Q50	Crue de référence retenue dans l'EDD



10 et 20 ans

Volume liquide (m3)		29365054	
19/02/1998	600		X
03/02/1998	220		X

Année	Q pointe (m3/s)	10 ans	20 ans
06/01/2001	500		X
22/01/2002	370		X
15/12/2004	630		X
24/03/2005	630		X
17/02/2006	800		X
05/03/2006	690		X
24/02/2006	360		X

## Définition de chroniques pour les scénarios à 10 ans et 20 ans

- Les chroniques considérées pour estimer les évolutions morphologiques à moyen/long terme correspondent aux périodes suivantes :
  - **Evolutions à T0+10 ans :**
    - Chronique 1997-2006 plus cyclone Hyacinthe de 1980 afin de simuler une décennie marquée par une forte activité événementielle ;
    - Chronique 1987-1996 plus cyclone Hyacinthe de 1980 afin de simuler une décennie marquée par une activité événementielle modérée ;
  - **Evolutions à T0+20 ans :** chronique 1987-2006 plus cyclone Hyacinthe de 1980.



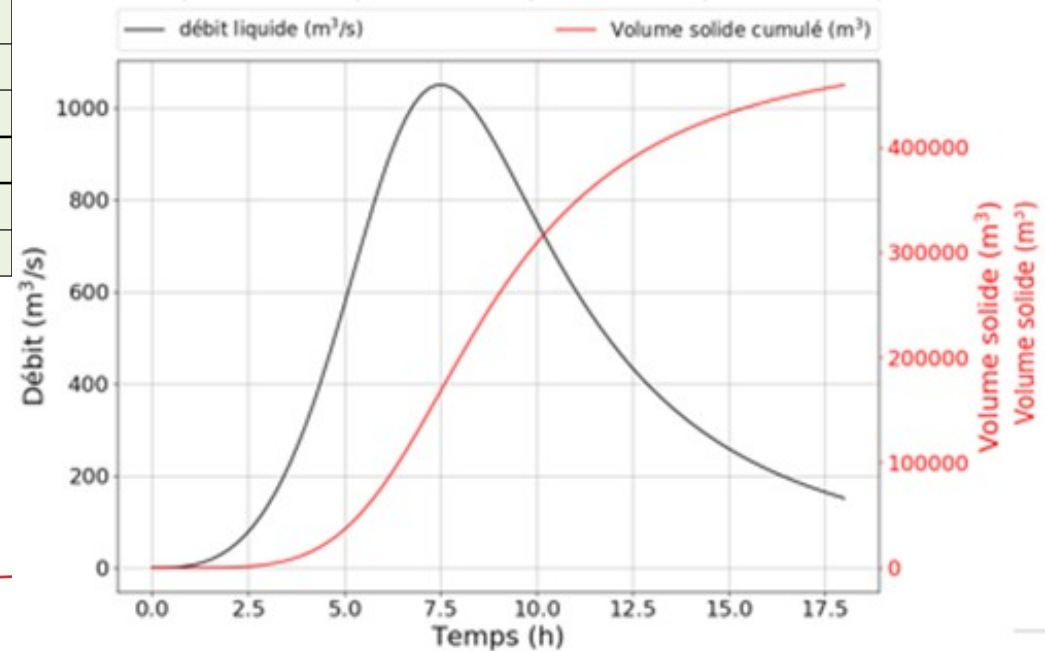
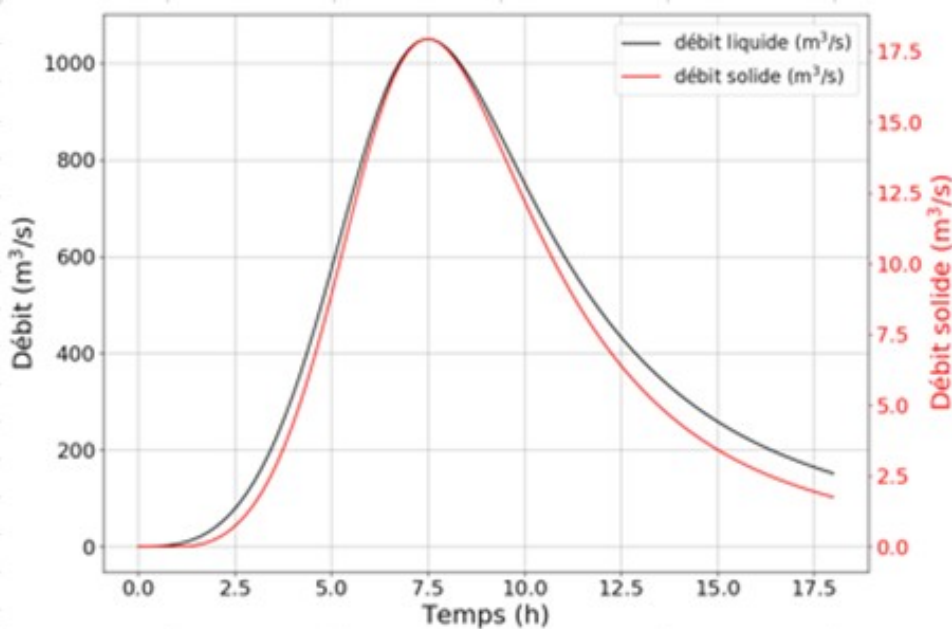
# termes

## Données d'entrée du modèle Evofond – Hydro-sédimentaire

- Utilisation de la formule de Lefort 2015
- Granulométrie définie par les mesures réalisées sur site en juin 2021 (3 courbes mini/moyenne/maxi)
- Calcul d'un sédimentogramme (loi débit solide fonction du temps) à partir de l'hydrogramme de la formule de transport retenue et de la granulométrie
- Calcul du volume solide total entrant

Courbes granulométriques retenues

mm	mini	moyenne	maxi	mm	mini
<1	10%	1.0	15%	1.0	10%
1.0	20%	1.5	20%	2.0	20%
2.3	30%	2.5	30%	3.5	30%
3.3	40%	3.7	40%	4.6	40%
4.0	50%	5.0			



# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Hypothèses et limites des simulations réalisées pour les scénarios à 10 ans et 20 ans

- **La pente conditionnant les apports solides à l'amont du modèle est inchangée (3.1%)**, ce qui suppose un équilibre strict et permanent entre la fourniture en matériaux et la capacité maximale de transport.
- Les éventuels phénomènes temporaires de suralimentation (si un éboulement en masse se produisait à nouveau) ou de tarissement (si le rythme de renouvellement des stocks devenait trop peu rapide) ne sont donc pas pris en compte.
- **Le trait de côte est considéré comme étant fixe**, ce qui suppose en moyenne un relatif équilibre entre les apports solides fluviaux dans l'Océan Indien et la capacité de reprise par les courants côtiers.



## Tests de sensibilité aux données d'entrée

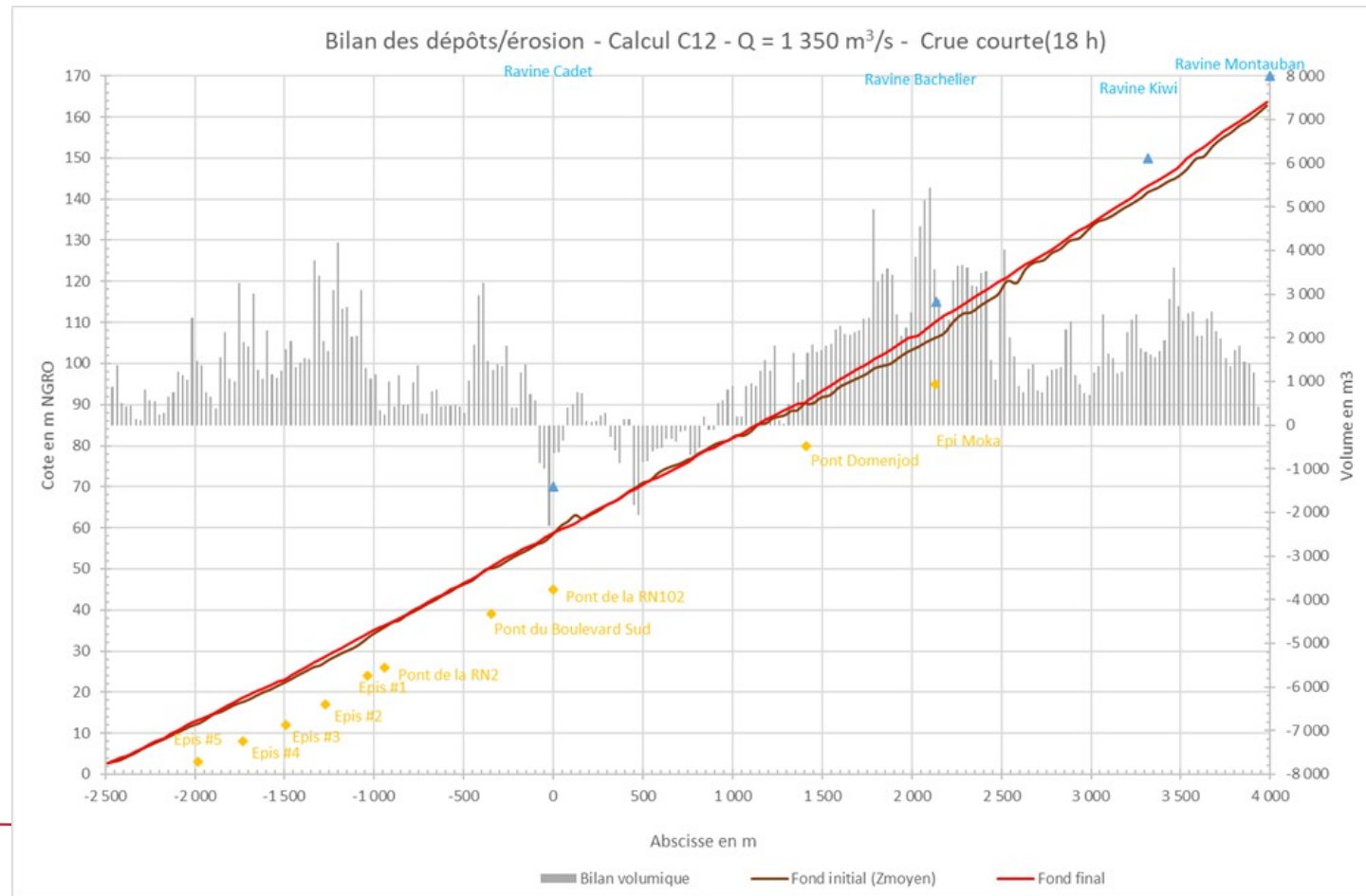
- Approche paramétrique en absence de données suffisantes pour effectuer un calage du modèle sur un évènement passé;
  
- Tests des paramètres suivants :
  - La formule de transport solide utilisée pour calculer la capacité de transport,
  - La largeur du lit,
  - La granulométrie des matériaux transportés,
  - La pente représentative des apports solides,
  - La durée de l'hydrogramme,
  - Le débit de pointe de la crue,
  - La position du trait de côte.
  
- Eléments de comparaison :
  - Le volume d'apport solide amont total,
  - Le bilan sédimentaire global (en considérant la totalité du domaine modélisé),
  - Le bilan sédimentaire restreint au secteur concerné par l'Etude De Danger (du P50 au P100),
  - Le volume de sédiments sortant (arrivant jusqu'à l'océan).

## Exemple de résultats pour la crue de 1 350 m<sup>3</sup>/s – Crue courte 18 h

### ➤ Bilan sédimentaire et évolution du lit

- Exhaussements moyens :
  - Entre 0.5 et 1.5 m en aval du pont de la RN102 ;
  - Entre 1.0 et 4.0 m en amont du pont Domenjod.
- Exhaussements moyens de 1.0 à 1.5 m au niveau du système d'endiguement de l'aéroport

	Érosion en m <sup>3</sup>	Dépôt en m <sup>3</sup>	Bilan sédimentaire en m <sup>3</sup>
Totalité du secteur modélisé	-18 171	352 748	334 576
Secteur EDD	0	94 852	94 852

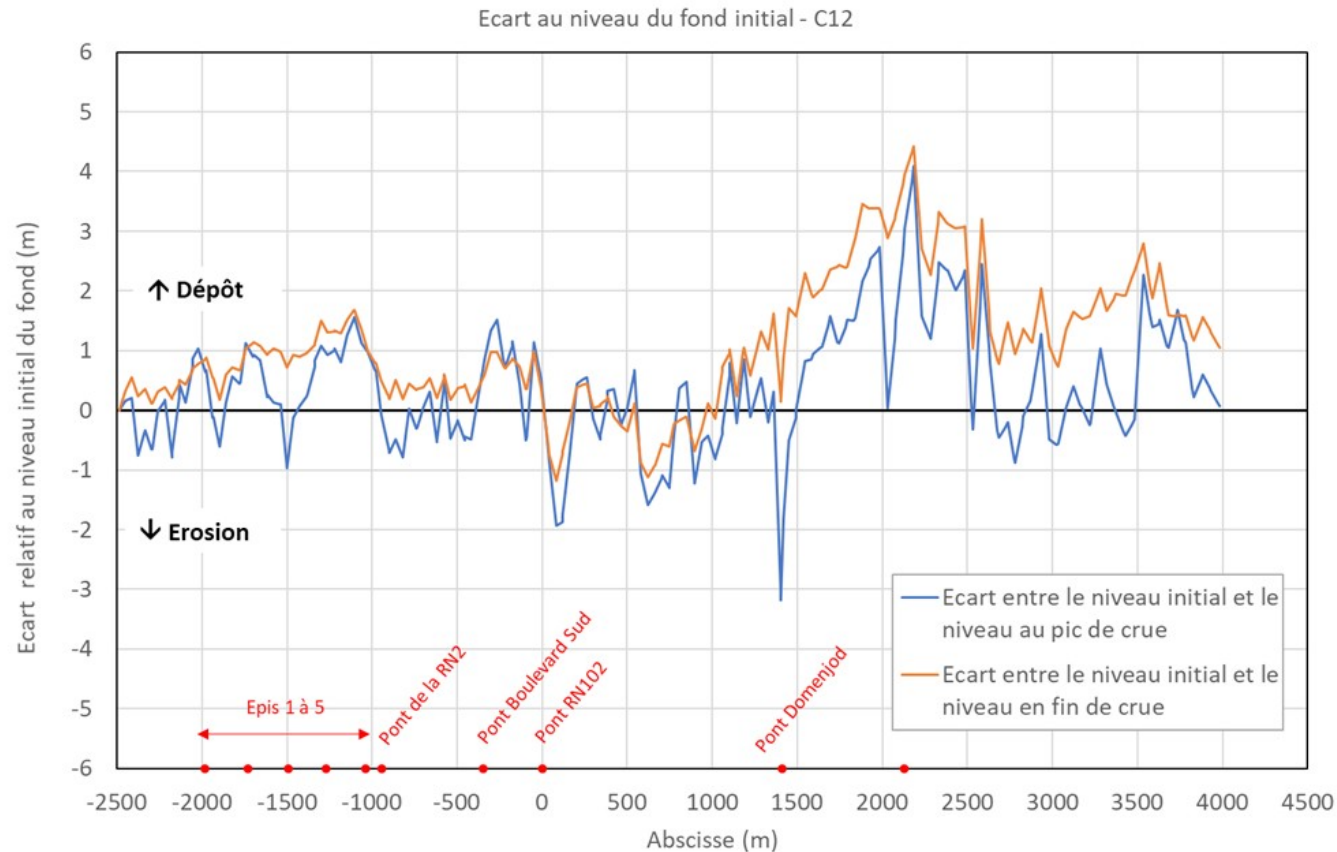




## Exemple de résultats pour la crue de 1 350 m<sup>3</sup>/s – Crue courte 18 h

### ➤ Ecart au niveau du fond initial en pointe et en fin de crue

- L'exhaussement maximum est attendu en fin de crue hormis au droit de quelques secteurs très ponctuels;
- Observation de processus d'incision ponctuels en cours de crue:
  - jusqu'à -3.0 m au droit du pont Domenjod en pointe de crue,
  - jusqu'à -1.0 m au droit des système d'endiguement.

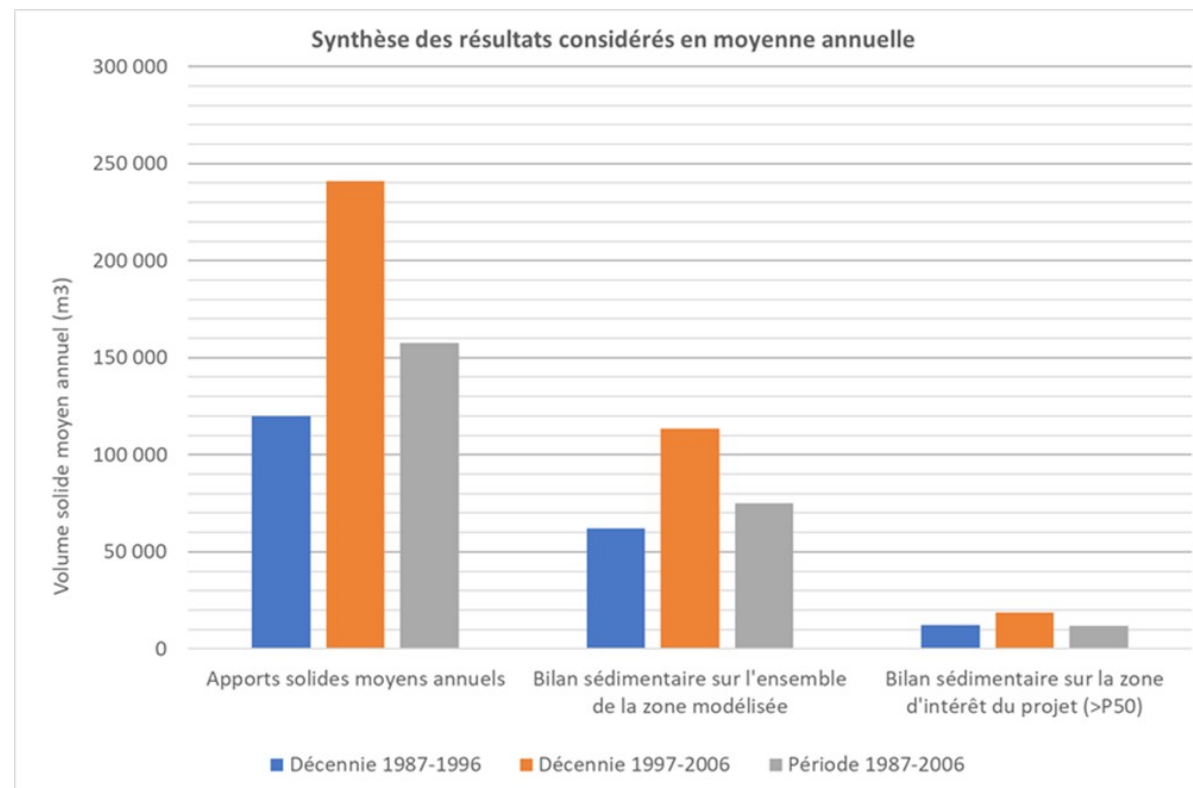


# Etude des évolutions à plus ou moins longs termes

## Résultats pour les scénarios à 10 ans et 20 ans

### ➤ Comparaison avec les apports estimés en 2008 par Artelia

Evènement	Débit estimé en m <sup>3</sup> /s	Apport estimé avec la formule de Lefort (année ?) en m <sup>3</sup>
Dina Janvier 2002	400	223 500
Crue Décembre 2004	489	37 500
Crue Février 2006	811	282 500
Diwa Février 2006	717	296 500
Gamède Février 2007	400	308 000





# Points d'attentions et compléments

## Données d'entrée et modélisation

### ➤ **Evaluation du potentiel des apports amont :**

- Nécessité de réaliser une étude scientifique sur les potentialités d'apports solides en distinguant différents pas de temps;
- Nécessité, dans ce cadre, de mieux comprendre les couplages versants/lit et les rythmes de stockage/déstockage au niveau des ravines pour vérifier si l'hypothèse de capacité maximale de transport solide est vraiment toujours vérifiée ;
- Nécessité de poursuivre le suivi topographique fin du lit sur toute la zone modélisée pour mieux quantifier les variations de la pente conditionnant les apports solides amont.

### ➤ **Précision des zones de substratum non affouillables ;**

# Points d'attentions et compléments

## Données d'entrée et modélisation

- **Nécessité de fiabiliser la surveillance hydrométrique** pour avoir une idée claire sur la forme des hydrogrammes et le débit de pointe des crues. Dans cette optique, Intérêt de poursuivre l'effort de recherche sur la quantification indirecte du débit solide par méthode sismique et hydrophone, lien avec les travaux de l'INRAE et de CNR en cours sur la Drôme ;
- **Nécessité de faire vivre ce modèle**
  - en enrichissant son calage à partir des données topo et hydrométriques collectées
  - en comparant les évolutions avérées aux évolutions simulées en rejouant les chroniques observées à Domenjod sur une période commune de suivi topo/hydro



# Points d'attentions et compléments

## Gestion des données

- **Standardisation des processus de levé des fonds et d'archivage des données (cf. établissement d'un référentiel technique pour le suivi topographique de la Rivière des Galets produit pour le TCO);**
- Recalage des abscisses des profils en long entre les différentes campagnes (notamment pré et post 2008) afin de permettre une comparaison objective,
- Numérisation par le Maître d'Ouvrage des données historiques antérieures à 2008 (profils en long notamment) pour faciliter les suivis futurs.

**MERCI !**

