

Vieux Rhône de Donzère-Mondragon

ETUDE DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE

DRAGAGE DE LOGIS-NEUF

HISTORIQUE DU DOCUMENT

Indice	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
0	21/08/2020	Mathilde BOUCHE	Thierry FRETAUD	
			Francesca Di Pietro	
Signature				

PARTICIPANTS

Service	Nom	Commentaire
CACOH	Thierry Fretaud	
CACOH	Sylvain Reynaud	

SOMMAIRE

	Page
1. INTRODUCTION.....	5
2.1 Présentation de la structure	5
2.2 Objectifs et contexte du stage	6
2. MATERIEL ET METHODE.....	7
2.1 Sites d'étude	7
2.1.1 Bief de Logis-Neuf.....	7
2.1.2 Bief de Caderousse.....	8
2.2 Logiciels utilisés	9
2.3 Données de référence de l'étude	9
2.4 Méthode de calcul : Méthode CNR	9
2.4.1 Forces tractrices	9
2.4.2 Diamètre critique de mise en mouvement des particules	11
2.4.3 Capacité de transport pour une crue de projet	11
2.4.3 Mode de transport dominant : nombre de Rouse	13
3. RESULTATS.....	15
3.1 Forces tractrices.....	15
3.1 Diamètre critique de mise en mouvement des particules	19
3.1 Capacité de transport pour une crue de projet	23
3.1 Mode de transport dominant : Nombre de Rouse	25
4. DISCUSSION.....	30
5. CONCLUSION.....	30
6. BIBLIOGRAPHIE.....	31
7. ANNEXES.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte du Bief de Logis-Neuf.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Carte de la retenue de Logis Neuf.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : Carte du Bief de Caderousse.....	8
Figure 4 : Carte du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	8
Figure 5 : Diagramme de Shields.....	10
Figure 6 : Crue de 2003 et crue de projet recalculée.....	11
Figure 7 : Crue de projet et durées associées à chaque occurrence de crue survenant pendant la crue de projet ...	12
Figure 8 : Processus de transport dominant en fonction du nombre de Rouse (p).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Forces tractrices pour les Plus Hautes Eaux Navigables.....	15
Figure 10 : Forces tractrices pour les débits de crue Q10.....	16
Figure 11 : Forces tractrices pour les débits de crue Q100.....	17
Figure 12 : Forces tractrices pour les débits de crue Q1000.....	18
Figure 13 : Diamètres critiques à l'étiage pour les Plus Hautes Eaux Navigables	19
Figure 14 : Diamètres critiques à l'étiage pour les débits de crue Q10	20
Figure 15 : Diamètres critiques à l'étiage pour les débits de crue Q100	21
Figure 16 : Diamètres critiques à l'étiage pour les débits de crue Q1000	22
Figure 17 : Capacité de transport pour une crue de projet, hypothèse de transport minimal.....	23
Figure 18 : Capacité de transport pour une crue de projet, hypothèse de transport maximal	24
Figure 19 : Mode de transport dominant pour les débits semi-permanent	25
Figure 20 : Mode de transport dominant pour les Plus Hautes Eaux Navigables	26
Figure 21 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q10	27
Figure 22 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q100	28
Figure 23 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q1000	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Débits de référence du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	12
--	----

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Charge H de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	32
Annexe 2 : Vitesse de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	32
Annexe 3 : Cote de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	33
Annexe 4 : Surface active de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	33
Annexe 5 : Largeur active de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	34
Annexe 6 : Débits de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon.....	34
Annexe 7 : Forces tractrices pour les débits d'étiage.....	35
Annexe 8 : Forces tractrices pour les débits semi-permanents.....	36
Annexe 9 : Diamètres critiques pour les débits d'étiage.....	37
Annexe 10 : Diamètre critique pour les débits semi-permanents.....	38
Annexe 11 : Mode de transport dominant pour les débits d'étiage.....	39

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 4 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	---------------------------

GLOSSAIRE, NOTATIONS

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

D50 : Taille médiane des particules.

PHEN : Plus Hautes Eaux Navigable.

PK : Point Kilométrique.

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 5 / 39 18/08/2020
--------------------------------	--	---------------------------

1. INTRODUCTION

1.1 Présentation de la structure d'accueil

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est le concessionnaire du Rhône pour la production d'hydroélectricité, le transport fluvial, les usages agricoles, et est le premier producteur français d'énergie exclusivement renouvelable. C'est un acteur important de la transition énergétique des territoires. A l'origine, lors de sa création en 1933, la CNR avait trois missions principales : assurer la production d'électricité, la navigation, l'irrigation des terres agricoles. A ce jour, l'entreprise a construit 19 centrales hydroélectriques, 19 barrages et 14 écluses, et ouvert 330km de voies navigables entre Lyon et la Méditerranée.

Pôle d'accueil du stage : le CACOH (Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques).

Le CACOH, créé en 1936, est le centre de mesure et d'expertise de la CNR. Si sa mission originelle était d'étudier et valider la conception hydraulique de l'ensemble des ouvrages de production hydroélectrique et de navigation du Rhône, celle-ci s'est maintenant étoffée, et le CACOH s'occupe désormais également de garantir la sécurité et l'optimisation des aménagements du Rhône. L'expertise de ce centre est reconnue et partagée dans de nombreuses instances françaises et internationales, et il participe aux principaux groupes nationaux et internationaux de pointe dans le domaine de la mesure, du contrôle, de la modélisation des écoulements et des structures hydrauliques.

Parmi ses différentes missions, le CACOH doit ainsi mesurer les débits et les apports en sédiments, surveiller les évolutions morphologiques du Rhône et de ses affluents, évaluer la qualité et le vieillissement des matériaux de structure, concevoir des projets à l'aide de modèles réduits physiques hydrauliques, contrôler le comportement des ouvrages hydrauliques, gérer la dynamique sédimentaire du fleuve et de ses retenues, et faire avancer l'innovation au service des projets, de l'exploitation et de la sûreté... Le CACOH possède également un laboratoire hydraulique expert en modèles réduits physiques destiné à concevoir, optimiser et valider des solutions techniques répondant à des problématiques naissantes. Pour remplir ces diverses tâches, c'est une cinquantaine d'ingénieurs, techniciens et chefs de projets de domaines divers et variés qui s'activent quotidiennement dans les locaux situés dans le port de Lyon, près de Gerland.

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 6 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	---------------------------

1.2 Objectifs et contexte du stage

Une des missions qui incombe à la CNR est de réaliser les campagnes de dragage nécessaires au maintien du bon fonctionnement du Rhône. Le travail actuel s'intéresse à la mission de dragage du bief de Logis-Neuf (localisation figure ?), qui concerne environ 370 000m³ de sédiments grossiers récoltés sur 2km. C'est plus particulièrement le devenir de ces sédiments qui va être considéré ici, puisqu'après le dragage deux possibilités existent : Les sédiments peuvent être extraits en intégralité et recyclés en dehors du Rhône, ou alors réinjectés en tout ou partie dans une zone du Rhône prédéfinie pour combler un déficit sédimentaire. Dans le cas du dragage de Logis-Neuf, une partie des sédiments pourrait potentiellement être réinjectée dans le Rhône, dans le Vieux-Rhône (portion du fleuve court-circuitée par les aménagements hydroélectriques) de Donzère-Mondragon (localisation figure ?).

L'objectif de ce travail est donc de déterminer, à l'aide d'équations de transport solide, le fonctionnement du transport sédimentaire dans l'endroit choisi pour la réinjection, afin de déterminer si oui ou non cette réinjection peut être effectuée sans créer de nouveaux problèmes par la suite. Il est effectivement nécessaire que les sédiments ne restent pas bloqués au droit de la zone de réinjection pour éviter différents impacts hydrauliques, mais il n'est pas non plus souhaitable que l'intégralité des matériaux réinjectés soit emmenée par la première crue et s'accumulent rapidement à l'amont du prochain barrage. Plusieurs problématiques se posent donc, dont les questions principales sont :

- A partir de quel débit les particules vont se mettre en mouvement dans la zone de réinjection ?
- A quelle vitesse ces particules vont se déplacer ?
- Où vont se redéposer les particules mises en mouvement ?

La détermination des tailles maximales des particules capables de se déplacer par charriage, et des capacités de transport solide du Rhône en aval du site de réinjection, permettront d'apporter des débuts de réponses à ces questions et d'avoir une discussion sur la faisabilité de la réinjection envisagée sur le site de Donzère-Mondragon. Les méthodes de calcul utilisées et expliquées plus loin sont basées sur les formules de Meyer-Peter, déjà utilisée à la CNR, et la méthode repose sur le travail de Marine Castel (2015), ancienne stagiaire CNR. Il sera possible de calculer les forces tractrices, les diamètres critiques de mise en mouvement des particules, la capacité de transport sédimentaire durant une crue de projet, ainsi que le mode de transport dominant des particules.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Sites d'étude

2.1.1 Bief de Logis-Neuf

Le Bief de Logis-Neuf (figure 1) est situé entre les villes de Valence et de Montélimar. Le barrage de Charmes représente sa délimitation amont, et le barrage du Pouzin et l'usine de Logis-Neuf montrent sa limite aval.

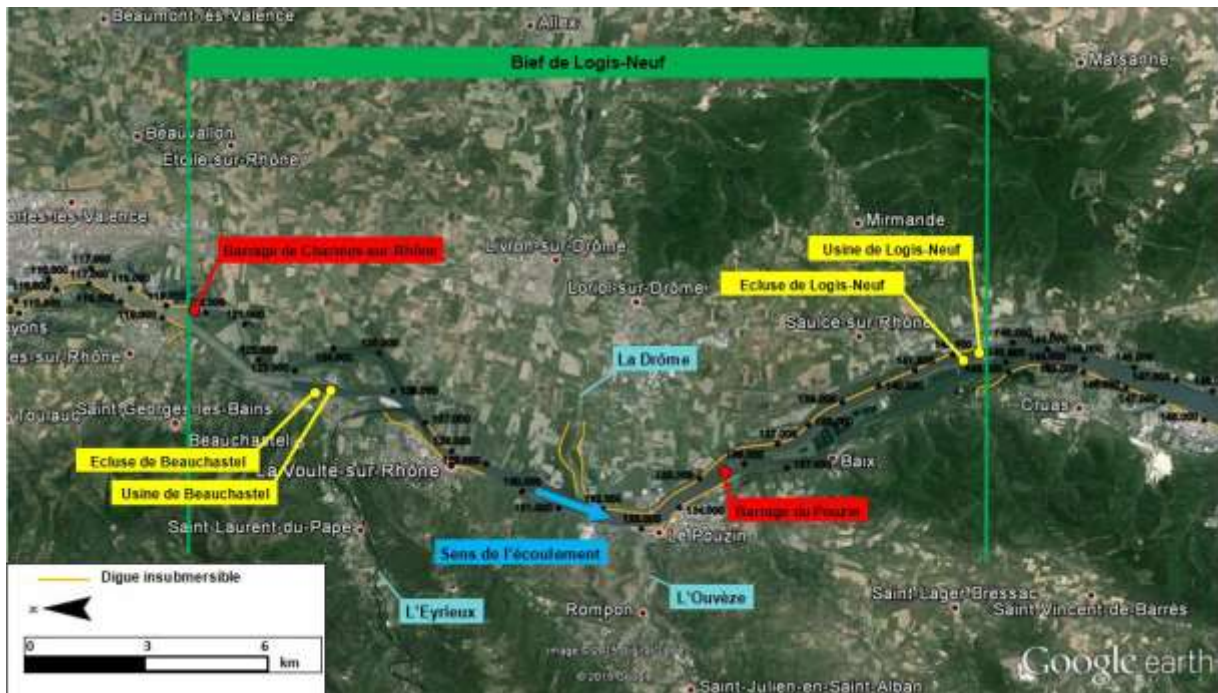


Figure 1 : Carte du Bief de Logis-Neuf

Il est prévu que le dragage soit effectué dans la retenue de Logis-Neuf, sur une distance de 2km environ (cercle rouge sur la figure 2) (du PK 133.500 à 135.700).

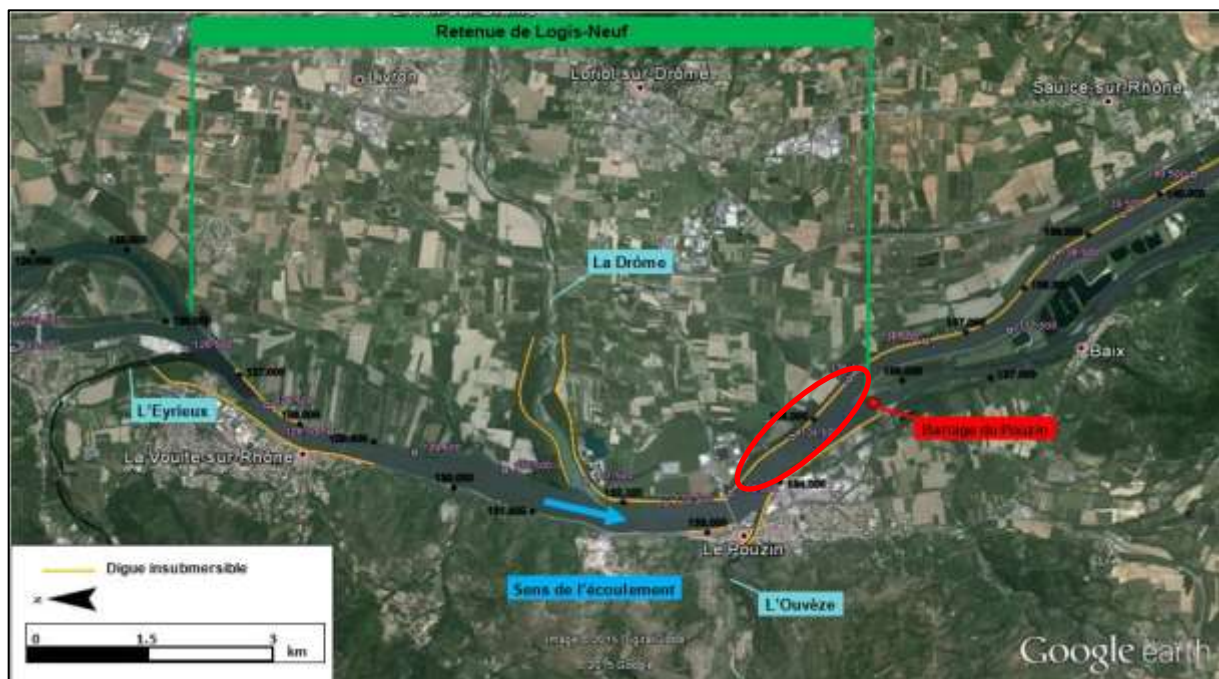


Figure 2 : Carte de la retenue de Logis-Neuf

2.1.2 Bief de Caderousse

Le bief de Caderousse est situé 50km à l'aval du bief de Logis-Neuf, à hauteur de Pierrelatte et Bourg-Saint-Andéol. Il est délimité à l'amont par le barrage de Donzère, et à l'aval par le barrage de Caderousse et l'usine de Caderousse.

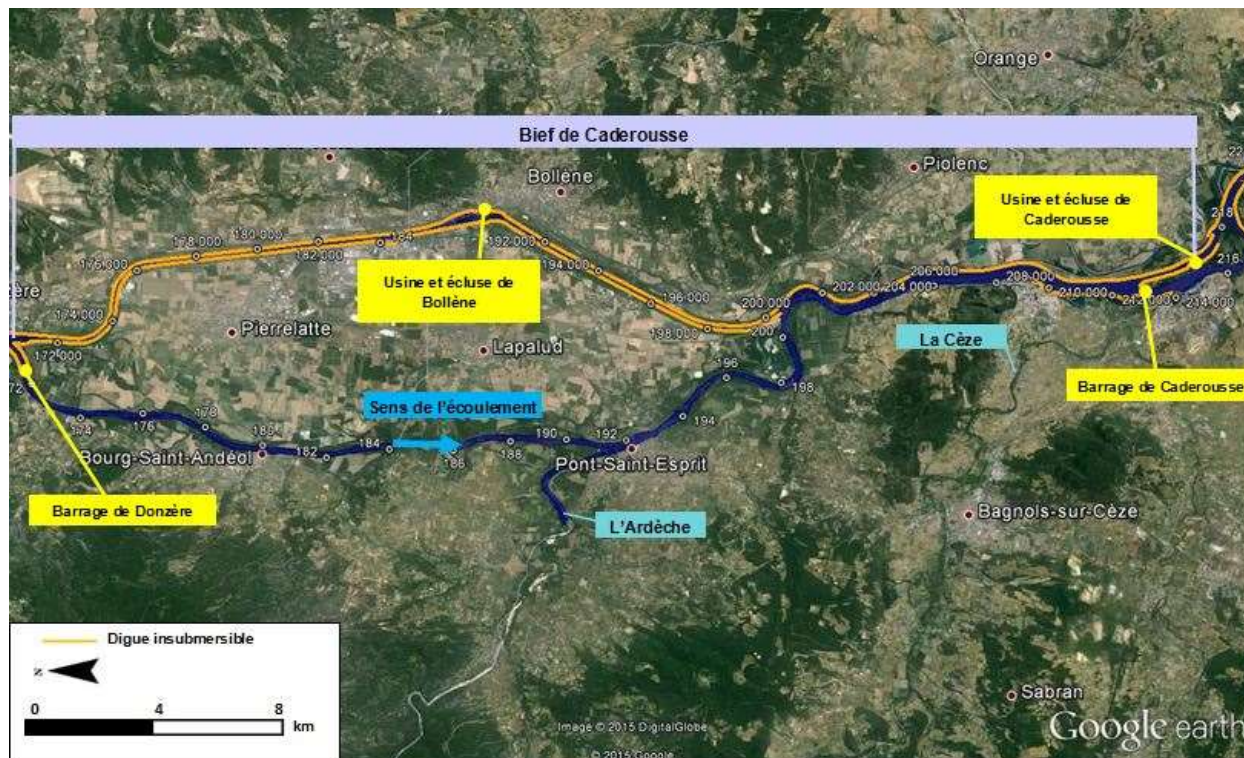


Figure 3 : Carte du bief de Caderousse

Dans le contexte de cette étude, on s'intéresse au Vieux-Rhône de Donzère (figure 4), situé dans le bief de Caderousse (figure 3), là où les sédiments dragués dans la retenue de Logis-Neuf pourraient potentiellement être réinjectés. On y trouve deux confluences, qui seront annotées sur les graphes de résultats : la confluence avec l'Ardèche au PK 190, et la restitution du Vieux-Rhône dans le canal d'amenée au PK 200.



Figure 4 : Carte du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 9 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	---------------------------

2.2 Logiciels utilisés

La plupart des données utilisées sont tirées du logiciel CrueX (Fudaa-Crue), logiciel développé en interne à la CNR. Fudaa-Crue est un logiciel de modélisation 1D des écoulements à surface libre, et permet de fournir différents paramètres (débits, hauteurs d'eau, charge hydraulique...) le long d'un domaine de calcul unidimensionnel représentant le cours d'eau. C'est le modèle mathématique du bief de Caderousse qui est utilisé ici pour extraire les données propres au Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon. (CNR, 2015). Les données obtenues sont ensuite traitées sous Excel.

2.3 Données de références de l'étude

Les données de références, représentées sous formes de graphes et extraites du modèle numérique de Donzère-Mondragon, sont disponibles dans les annexes de ce document (annexes 1 à 6). On y trouvera également les forces tractrices pour les débits d'étiage et semi-permanent, les diamètres critiques de mise en mouvement des particules pour les débits d'étiage et semi-permanent, et le mode de transport dominant pour les débits d'étiage, (annexe 7 à 11).

2.4 Méthodes de calcul

Différents paramètres, détaillés ensuite, seront calculés en suivant la méthode décrite par Marine Castel (2015), ancienne stagiaire CNR. Tous les calculs seront faits sur tout le linéaire du Vieux Rhône de Donzère, du PK (Point Kilométrique) 171 à 212.800. Pour une meilleure lisibilité, ces graphes sont coupés en deux parties, une allant du PK 171 au PK 190, l'autre du PK 190 au 212, qui comprend la confluence avec l'Ardèche et la restitution du Vieux-Rhône dans le canal d'amenée. Tous les paramètres seront calculés pour différentes occurrences :

- Pour le débit d'étiage, soit le débit minimal du cours d'eau.
- Pour un débit semi-permanent, soit le débit moyen journalier dépassé 6 mois dans l'année.
- Pour les Plus Hautes Eaux Navigables.
- Pour le débit de crue de fréquence décennal, noté Q10.
- Pour le débit de crue de fréquence centennal, noté Q100.
- Pour le débit de crue de fréquence millénial, noté Q1000.

2.4.1 Forces tractrices

Le calcul des forces tractrices (τ_0) permet, en les comparant à la contrainte critique (τ_c) de déterminer la mise en mouvement des sédiments à un endroit donné, grâce aux équations suivantes, sachant que les matériaux non-cohésifs sont mis en mouvement quand $\tau_0 > \tau_c$:

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J$$

$$\tau_c = A \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) d_{50}$$

Avec :

τ_0 : Force tractrice (N/m²)
 ρ : densité de l'eau (1000kg/m³)
 R_h : rayon hydraulique (m)
 J : pente de la ligne de charge (m/m)
 g : accélération de la pesanteur (m/s²)
 τ_c : contrainte critique (N/m²)
 ρ_s : densité des particules (kg/m³), ici 2600 kg/m³
 d_{50} : diamètre ou diamètre médian des particules (m)
 A : coefficient adimensionnel, variant de 0.03 à 0.07

La pente J est calculée à l'aide de la charge H et le linéaire x entre deux PK selon :

$$J = \frac{-\Delta H}{\Delta x}$$

La force tractrice étant dépendante du Rayon Hydraulique Rh, Il est possible de calculer :

- Une force tractrice maximale, en utilisant le rayon hydraulique maximale obtenu en soustrayant la côte du point le plus bas de la section d'écoulement (Zf) à la hauteur d'eau (Z)
- Une force tractrice minimale, en utilisant le rayon hydraulique minimal, obtenu en divisant la surface active par la largeur active.
- Une force tractrice moyenne, en utilisant un rayon hydraulique moyen obtenu en faisant une moyenne entre le rayon hydraulique maximal et le rayon hydraulique minimal.

Il est également possible de faire varier le paramètre adimensionnel A (Shields Entrainment Function, figure 5), qui fait lui varier la contrainte critique τ_c pour obtenir un τ_c maximal avec A = 0.07, minimal avec A = 0.03 et moyen avec A = 0.047

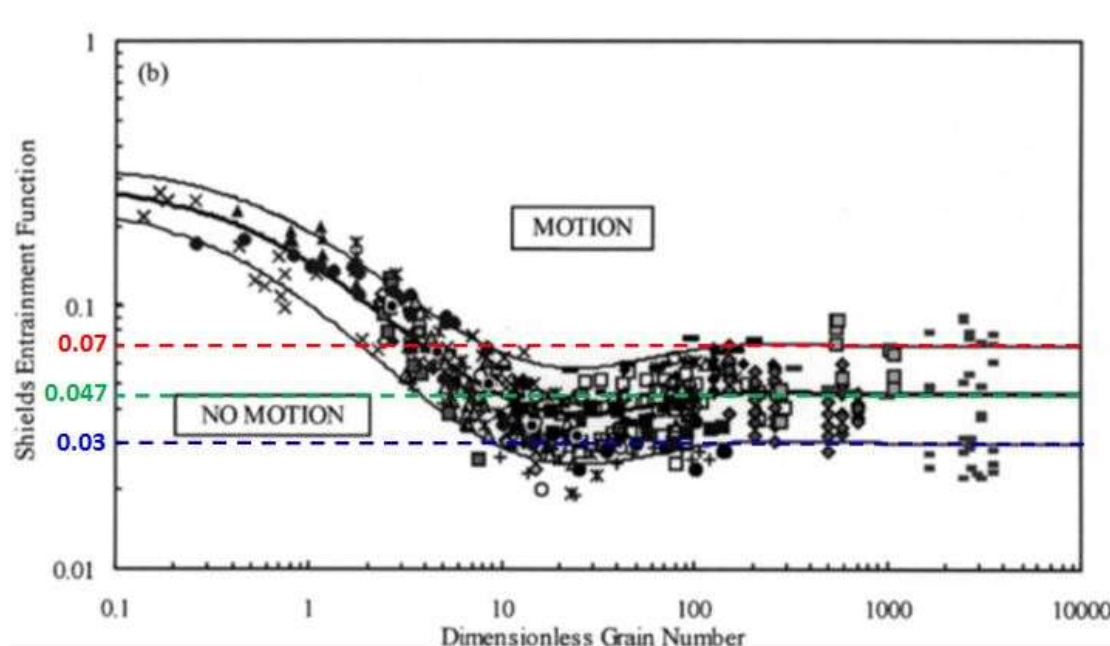


Figure 5 : Diagramme de Shields (CNR, 2014)

En associant les différentes valeurs de force tractrice et de contrainte critique possibles, on peut émettre trois hypothèses :

- Une hypothèse de transport minimum, où la force tractrice est minimale et la contrainte critique maximale. Le transport intervient pour des particules de diamètre relativement faible.
- Une hypothèse de transport maximal, où la force tractrice est maximale et la contrainte critique minimale. Le transport intervient pour des particules de diamètre relativement élevé.
- Une hypothèse de transport moyen, où la force tractrice et la contrainte critique sont moyennes. Le transport intervient pour des particules de diamètre moyen.

2.4.2 Diamètre critique de mise en mouvement des particules

On peut également déduire de l'équation de Meyer-Peter les tailles maximales des particules transportées par charriage, avec la relation suivante :

$$d_{50} = \frac{\tau_0}{A \cdot g \cdot (\rho - \rho_s)}$$

En faisant ici aussi varier A et τ_0 , il est possible de déterminer le diamètre critique de mise en mouvement des particules pour les trois hypothèses de transport précédemment décrites.

2.4.3 Capacité de transport pour une crue de projet

Il est intéressant de déterminer la capacité de transport durant une crue de projet, qui est la crue pour laquelle les ouvrages hydrauliques ont été dimensionnée, puisqu'on considère que si le volume de sédiment à réinjecter est supérieur ou égal au volume de sédiment pouvant être déplacé pendant la crue de projet, l'opération de réinjection n'aura pas d'impact sur le fonctionnement sédimentaire du Rhône.

Ici, on utilise comme référence la crue de 2003, à partir de laquelle on calcule la crue de projet Q1000 (débit de pointe : 10 000m³/s) par homothétie (figure 6).

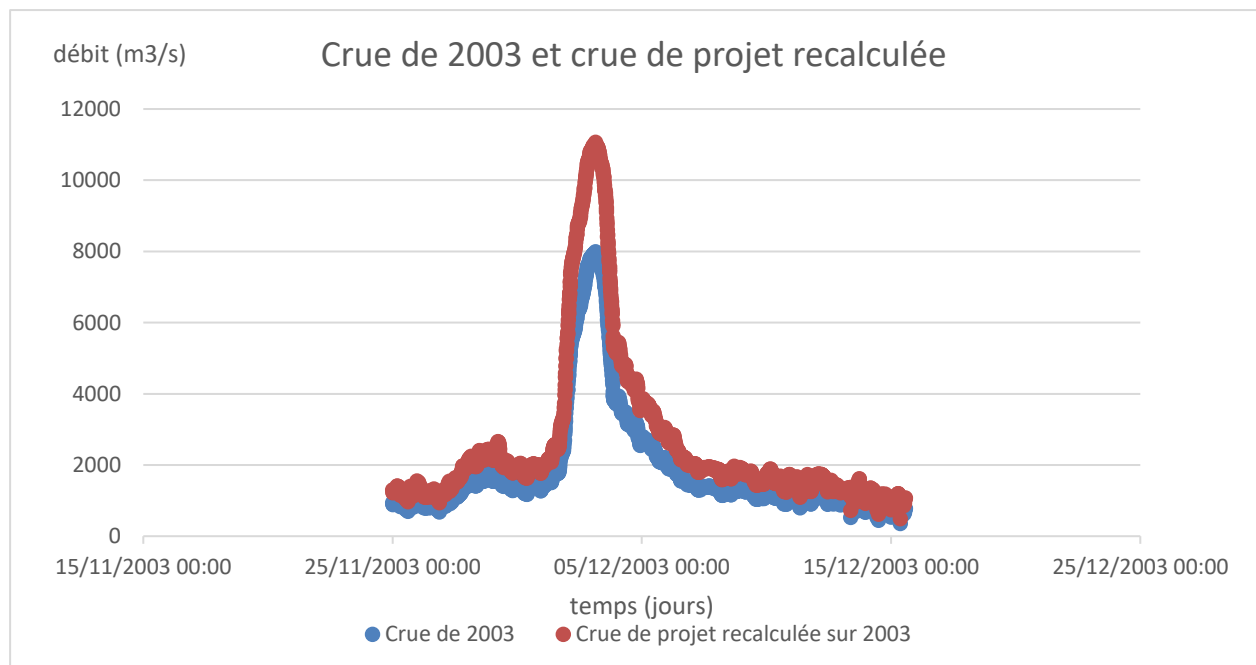


Figure 6 : Crue de 2003 et crue de projet recalculée

En parallèle sont calculés les débits solides pour chaque occurrence de crue, grâce à la formule de Meyer-Peter :

$$Q_s = \frac{32}{((\rho_s - \rho) \cdot g)^{\frac{3}{2}}} \cdot (\tau_0 - \tau_c)^{\frac{3}{2}} \cdot L$$

- τ_0 : contrainte ou force tractrice (N/m²)
- ρ : densité de l'eau (1000 kg/m³)
- Q_s le débit solide (m³/s de grain) ;
- L la largeur du lit (m) ;
- g : accélération de la pesanteur (m/s²)
- τ_c : contrainte critique (N/m²)
- ρ_s : densité des particules (kg/m³)

Sur la crue de projet nouvellement calculée sont marqués les débits totaux (tableau 1) dans le vieux Rhône de Donzère, pour chaque occurrence. A chaque occurrence est associée une durée de la crue par interpolation (figure 7), qui sera également associée au débit solide correspondant à l'occurrence. On peut ainsi obtenir le volume de sédiments déplacé lors de la crue de projet en multipliant le débit solide (en m3/s) par la durée associée, et en additionnant ensuite les volumes obtenus pour Q10, Q100 et Q1000, qui sont les trois occurrences apparaissant lors de la crue de projet (Figure 7)

Tableau 1 : débits de référence du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

Etat de référence	Débits (m3/s)		
	Barrage Donzère-Mondragon	Confluence de l'Ardèche	Total
Etiage	60	10	70
Qsemi-perm	60	20	80
QPHEN	1720	240	1960
Q10	4160	1200	5360
Q100	6600	1900	8500
Q1000	8600	2400	11000

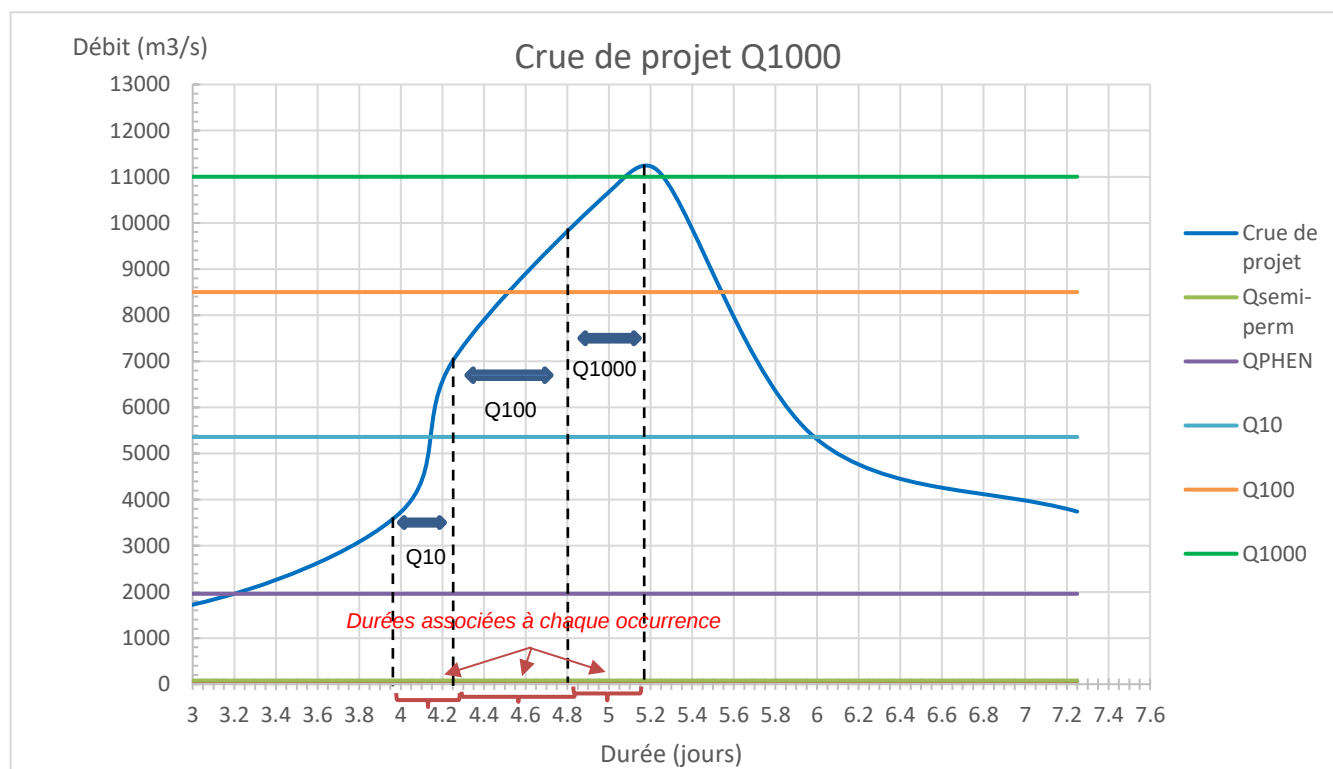


Figure 7 : Crue de projet et durées associées à chaque occurrence de crue survenant pendant la crue de Projet

Une fois le volume de sédiment transporté pendant la crue de projet obtenu, on le convertit en volume de grain réel, en supposant :

$$1 \text{ m}^3 \text{ en grain } (\gamma_{\text{réelle}} = 2.6) \leftrightarrow 1.3 \text{ m}^3 \text{ apparent } (\gamma_{\text{apparente}} = 2)$$

Pour trois diamètres ($d = 10\text{mm}$, $d = 20\text{mm}$, $d = 50\text{mm}$), les capacités de transport sont calculées pour une hypothèse de transport maximal et une hypothèse de transport minimal.

Ces calculs sont réalisés pour trois diamètres : 10 mm – 20mm – 50mm et pour deux hypothèses : transport minimal et transport maximal.

2.4.4 Mode de transport dominant : Nombre de Rouse

Il est possible, en plus de déterminer le seuil de mise en mouvement des particules, de déterminer les modes de transport dominants des sédiments en fonction du diamètre des particules : par charriage ou par suspension. Le nombre de Rouse, dont la valeur met en évidence un mode de transport dominant (figure 8), se note p , b ou Z , et se calcule de la manière suivante :

$$p = \frac{w_s}{\kappa u_*}$$

Avec

- w_s : vitesse de chute du sédiment (m/s)
- u_* : vitesse de frottement
- κ : constante de Von Kármán (0.408)

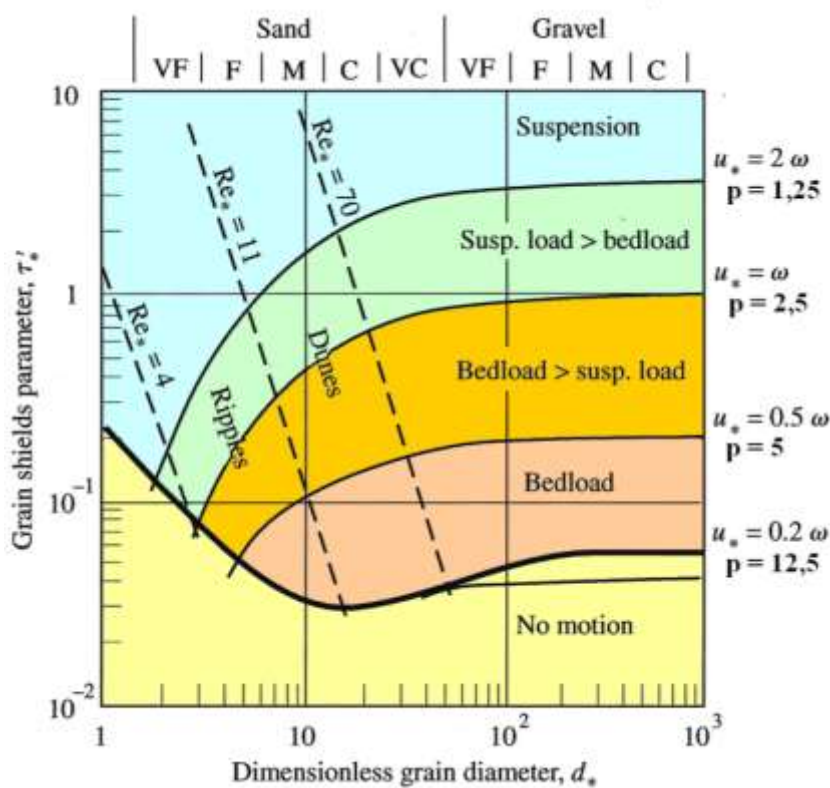


Figure 8 : Processus de transport dominant en fonction du nombre de Rouse (p)

Pour déterminer la vitesse de chute w_s , la formule de Soulsby (1997) a été appliquée :

$$w_s = \frac{v}{d} (\sqrt{10.36^2 + 1.049 D_*^3} - 10.36)$$

Où :

- D_* : diamètre adimensionnel des grains $D_* = \left(\frac{g(s-1)}{v^2} \right)^{1/3} d_{50}$
- v : viscosité cinématique de l'eau ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
- d ou d_{50} : diamètre ou diamètre médian des particules (mm)
- s : densité relative des particules dans l'eau (2.6)
- g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 14 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	----------------------------

La vitesse de frottement u^* est par ailleurs évaluée à partir de la relation suivante :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_w}} = \sqrt{g \cdot R \cdot i}$$

Où :

- τ_o : contrainte ou force tractrice (N/m²)
- ρ_w : densité de l'eau (1000 kg/m³)
- R : rayon hydraulique (m)
- i : pente d'écoulement (m/m)

Le régime de transport prédominant est ensuite déterminé en considérant les valeurs seuils du nombre de Rouse et illustrées précédemment (figure 8) :

- Si $p > 12.5$ les particules ne sont pas mobiles,
- Si $5 < p < 12.5$ le transport des particules intervient uniquement par charriage,
- Si $2.5 < p < 5$ le transport des particules intervient majoritairement par charriage et dans une moindre mesure par suspension,
- Si $1.25 < p < 2.5$ le transport des particules intervient majoritairement par suspension et dans une moindre mesure par charriage,
- Si $1.25 < p$ le transport des particules intervient uniquement par suspension.

On notera que le critère de mise en mouvement par charriage défini par cette approche est certainement encore plus incertain que celui donné par la courbe de Yalin-Shields. Les résultats obtenus pour le charriage sont donc à considérer avec un certain recul.

Les calculs ont été réalisés pour la gamme de diamètre suivante : 1mm – 2mm – 4mm – 8mm – 16mm – 20mm – 30mm – 40mm – 50mm – 60mm – 70mm – 80mm – 90mm – 100mm.

3. RESULTATS

3.1 Forces tractrices

Les graphes ci-dessous représentent les forces tractrices retrouvées dans le Vieux-Rhône de Donzère, soit la force permettant de déterminer la mobilisation des particules présentes sur le fond.

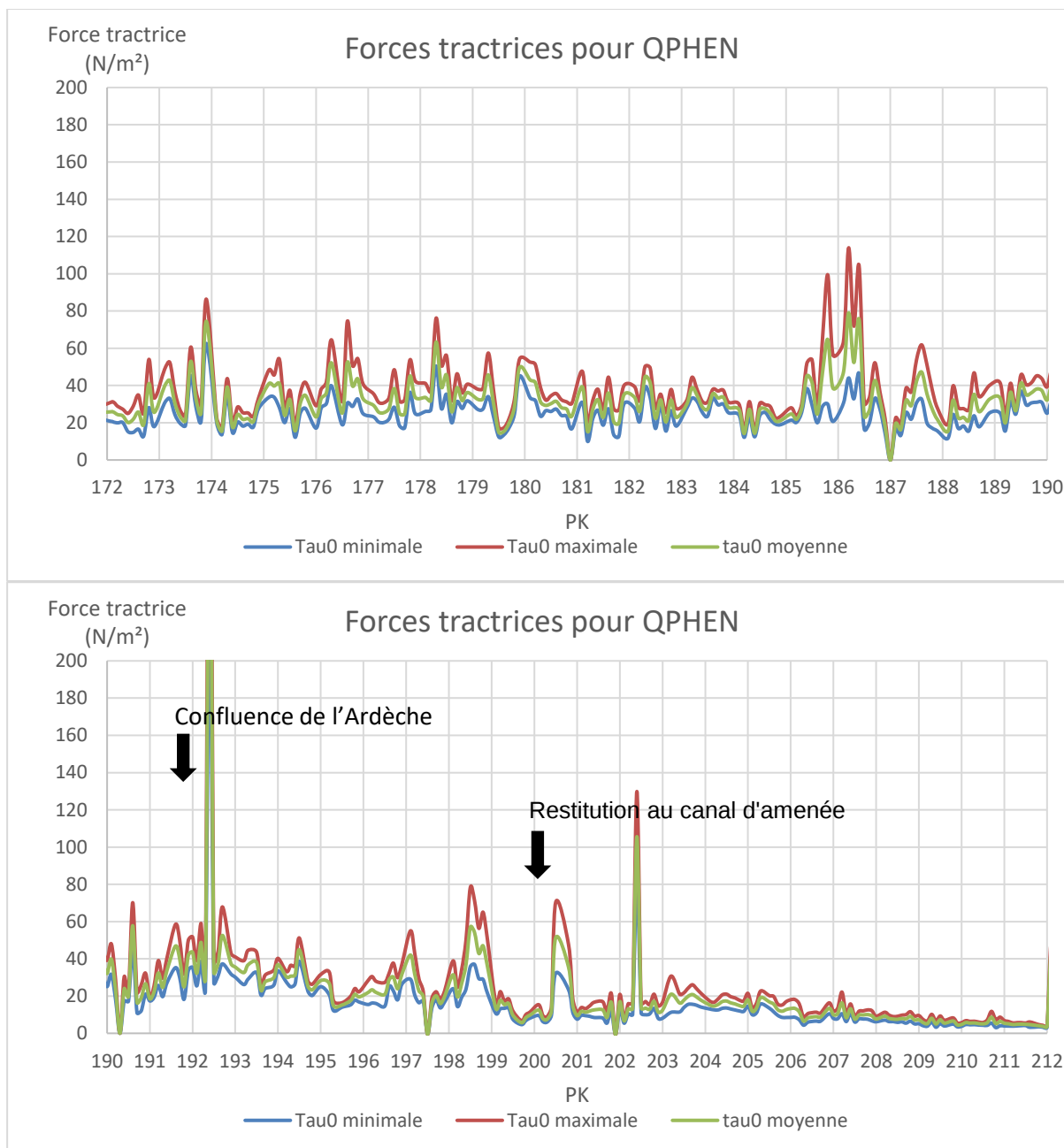


Figure 9 : Forces tractrices pour les Plus Hautes Eaux Navigables

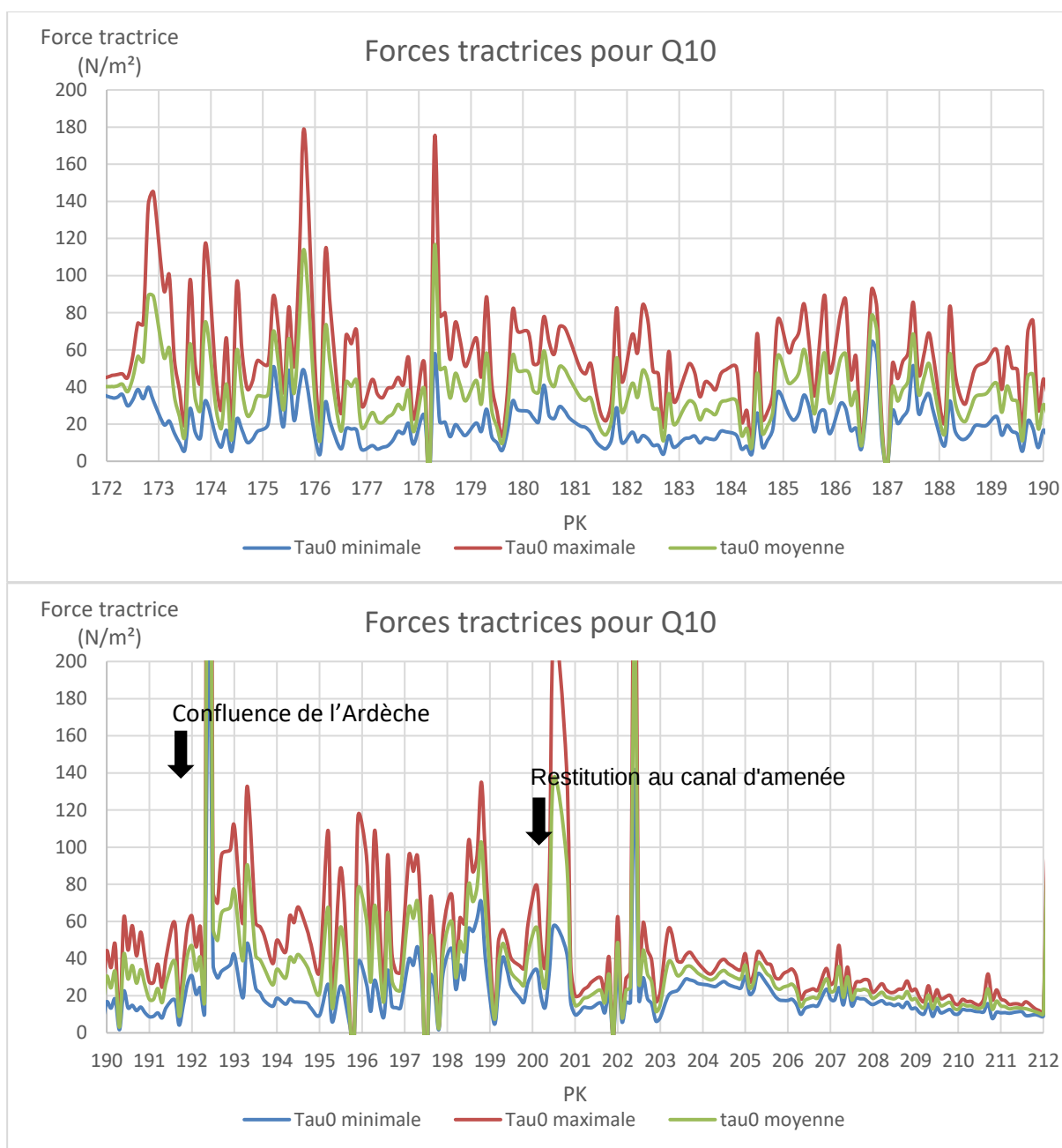


Figure 10 : Forces tractrices pour les débits de crue Q10

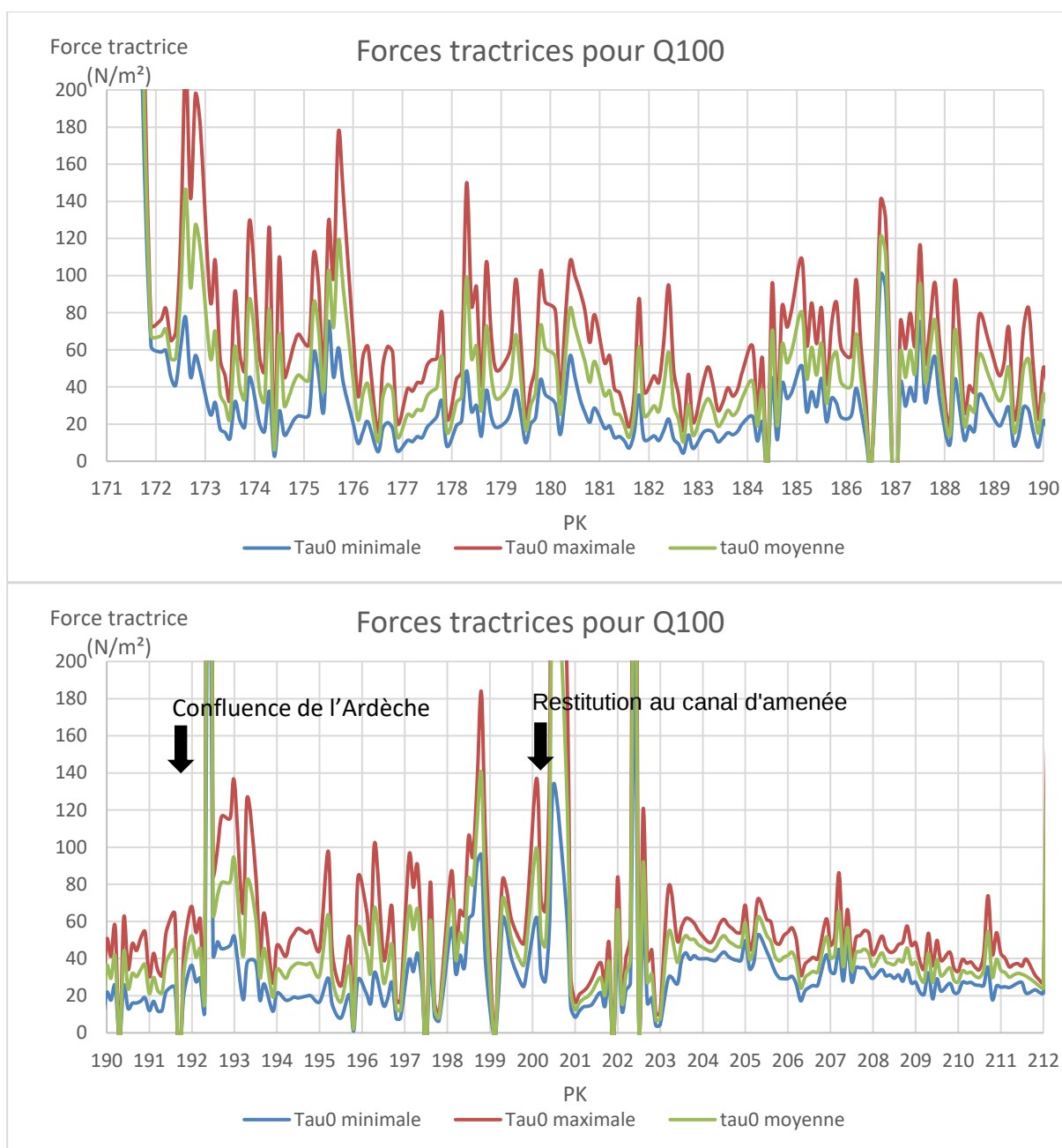


Figure 11 : Forces tractrices pour les débits de crue Q100

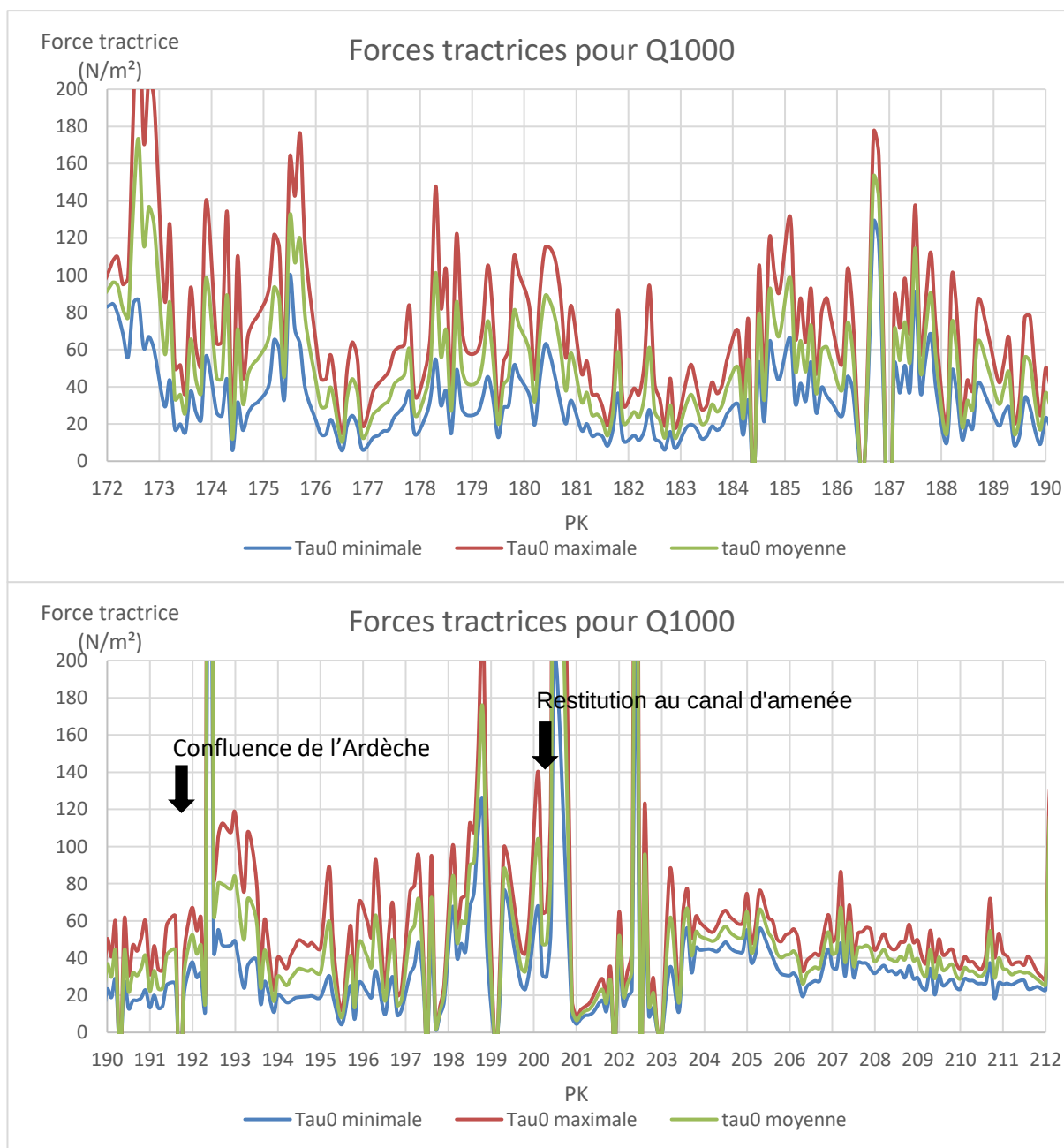


Figure 12 : Forces tractrices pour les débits de crue Q1000

On remarque plusieurs phénomènes récurrents concernant les forces tractrices :

- Une augmentation des forces tractrices à l'aval des deux confluences (avec l'Ardèche au pk 191 et avec le canal d'amenée au PK 200), expliqué par l'augmentation soudaine des débits (visible Annexe 6)
- Un phénomène de diminution des forces tractrices après la restitution dans le canal d'amenée, surtout visible pour les débits faibles (étiage et semi-permanent, annexes 7 et 8) et Plus Hautes Eaux navigables et Q10 (figure 9 et 10) et s'atténuant à partir de Q100 et Q1000 (figures 11 et 12)

3.2 Diamètre critique de mise en mouvement des particules

Les graphiques ci-dessous représentent les diamètres critiques de mise en mouvement des particules dans le Vieux-Rhône de Donzère. Ces graphiques peuvent également servir à tenter de définir où les sédiments vont se redéposer. La droite violette à 0.02m représentant le D50 des sédiments réinjectés, on considère que ceux-ci sont mis en mouvement lorsque les courbes passent au-dessus de la droite D50, et se déposent lorsque les courbes passent en dessous du D50. Dans la mesure où la mise en mouvement des particules nécessite plus d'énergie que leur dépôt, on peut considérer que la mise en mouvement se lit grâce à la courbe d'hypothèse de transport minimal (en vert), et le dépôt se lit avec l'hypothèse de transport maximal (en bleu).

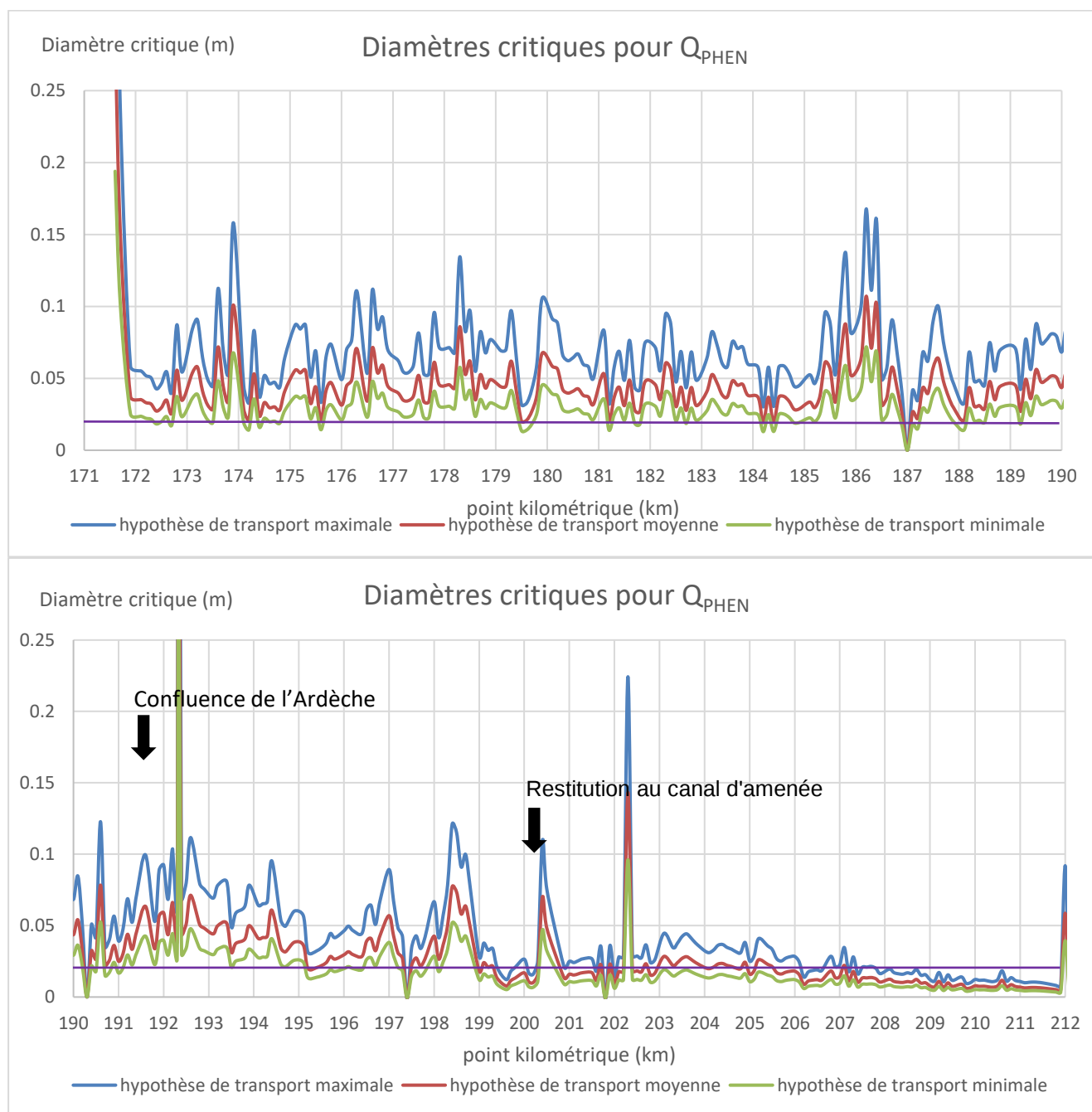


Figure 13 : diamètre critique pour les Plus Hautes Eaux Navigables

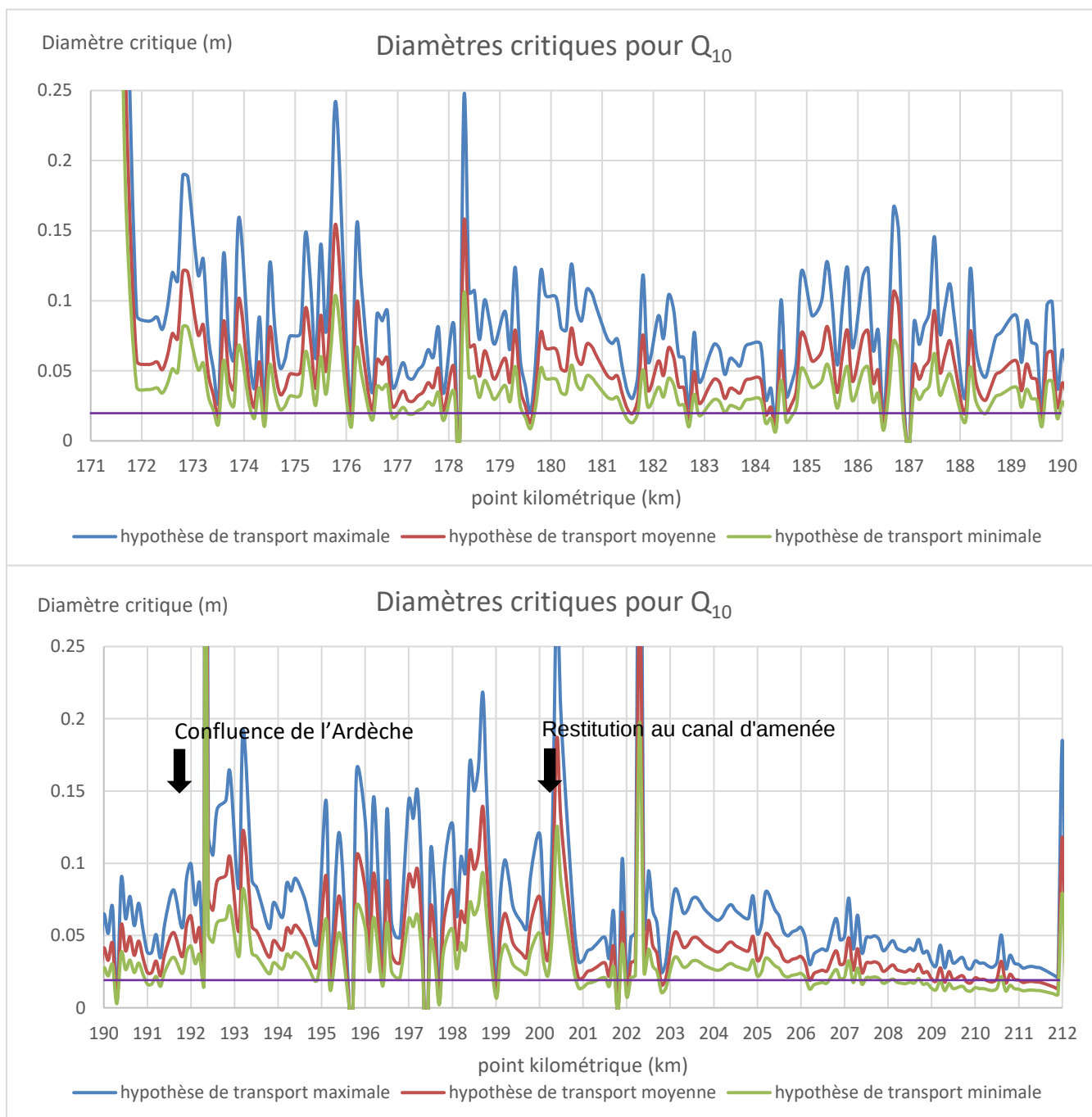


Figure 14 : diamètre critique pour les débits de crue Q_{10}

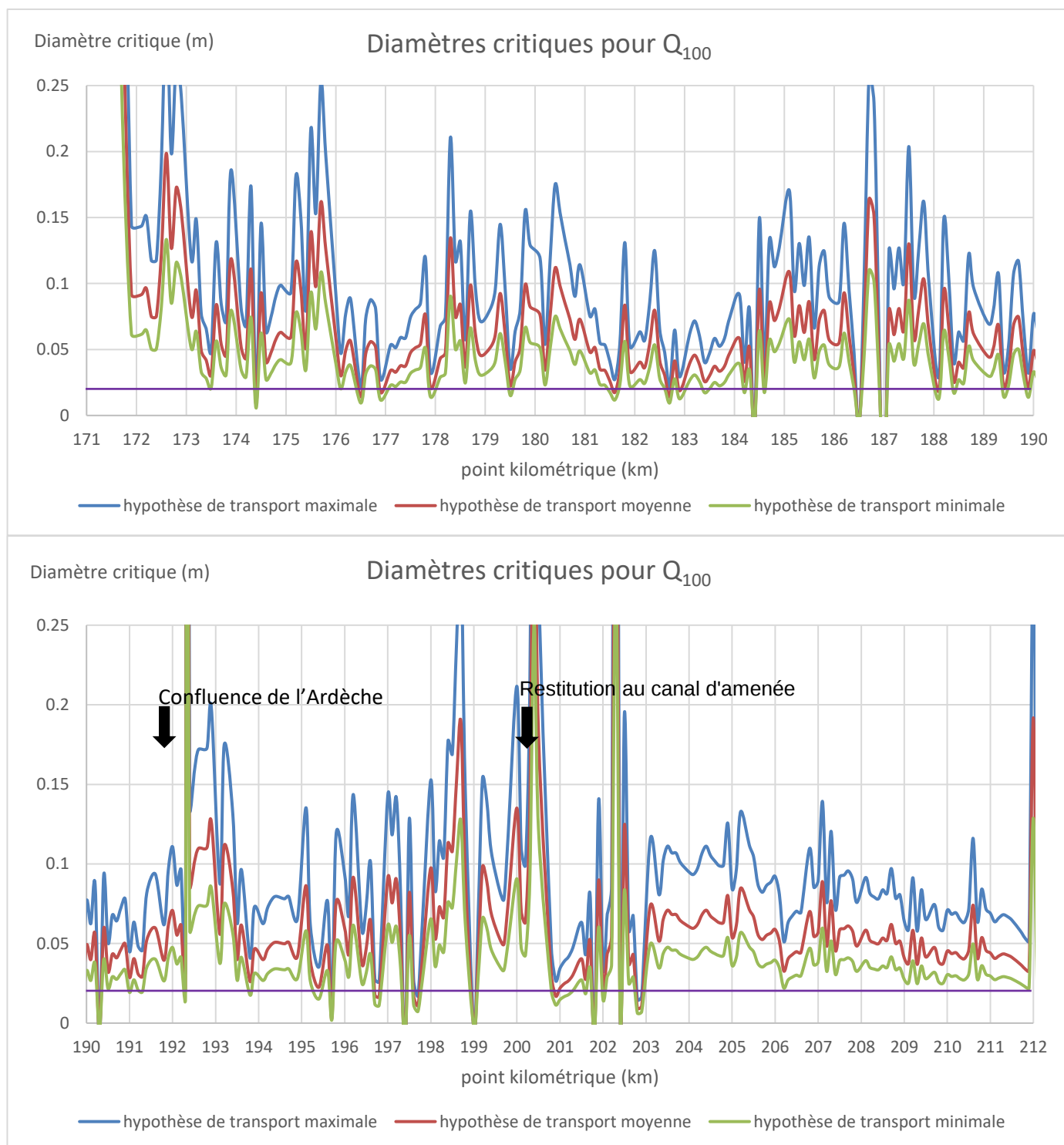
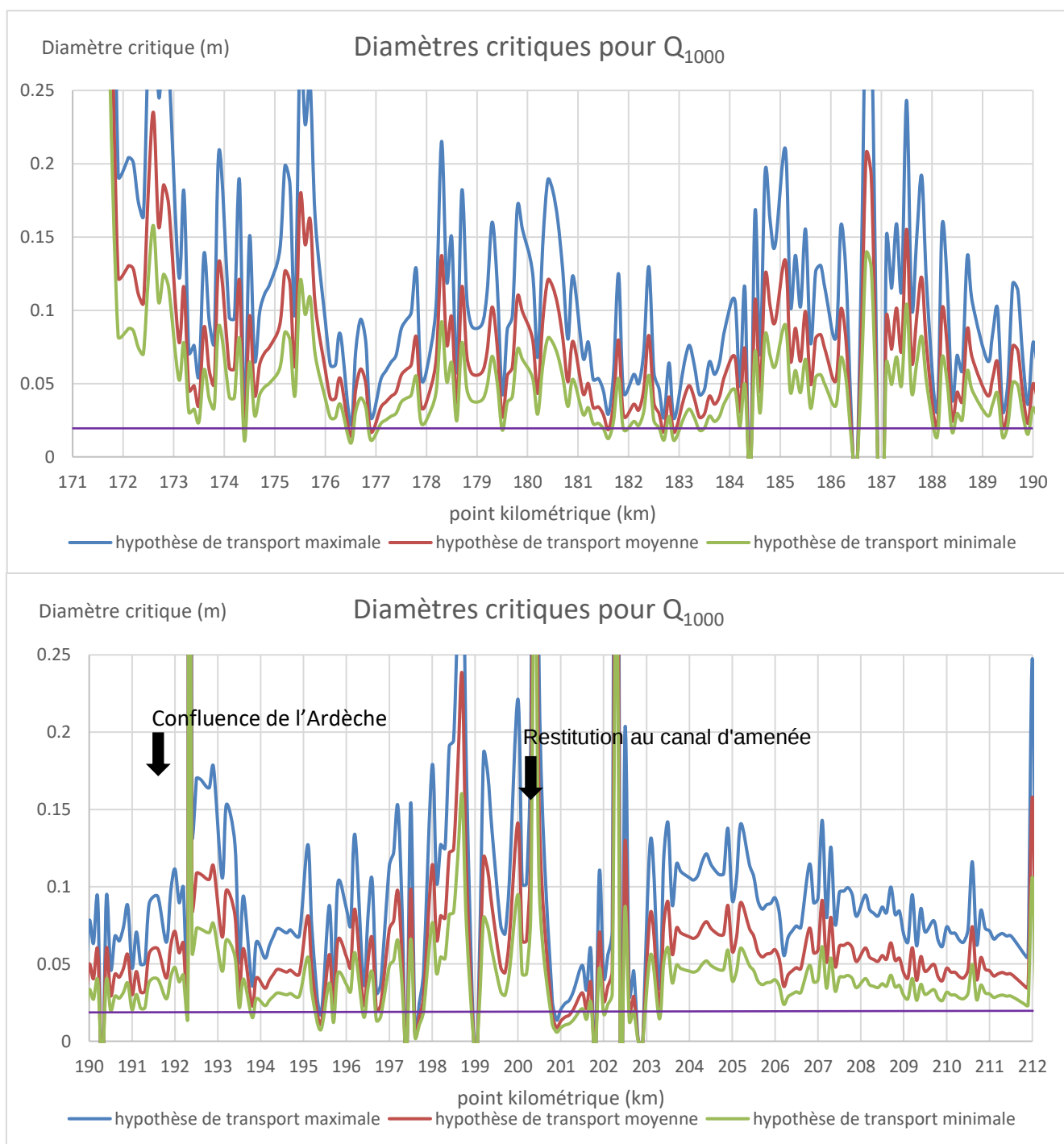


Figure 15 : Diamètre critique pour les débits de crue Q_{100}

**Figure 16 : diamètre critique pour les débits de crue Q1000**

Les sédiments sont très peu mobilisés pour les débits faibles (étiage et semi-permanent, annexes 9 et 10). On observe un début de mobilisation des sédiments de 20mm pour les débits à partir des Plus Hautes Eaux Navigables (figure 13). Pour les PHEN, Q10, Q100 et Q1000, (figure 14, 15, 16), les sédiments paraissent globalement pouvoir être mis en mouvement tout le long du Vieux-Rhône, sauf en quelques points précis comme au PK176-177, au PK 181-184, et au PK 201 à 203, à la restitution, et entre les PK 205 et 212 pour les PHEN et Q10, où les sédiments ne sont probablement plus mobilisés. Concernant le dépôt des sédiments, ceux paraissent rester en mouvement une fois mobilisés, sauf au PK 201 à l'aval de la restitution, où ils pourraient peut-être se redéposer.

3.3 Capacité de transport pour une crue de projet

Les graphiques ci-dessous représentent le volume total de sédiment transporté pendant une crue de projet, pour deux hypothèse (transport minimal et transport maximal), et pour trois diamètres de particules (10, 20 et 50mm). Pour rappel

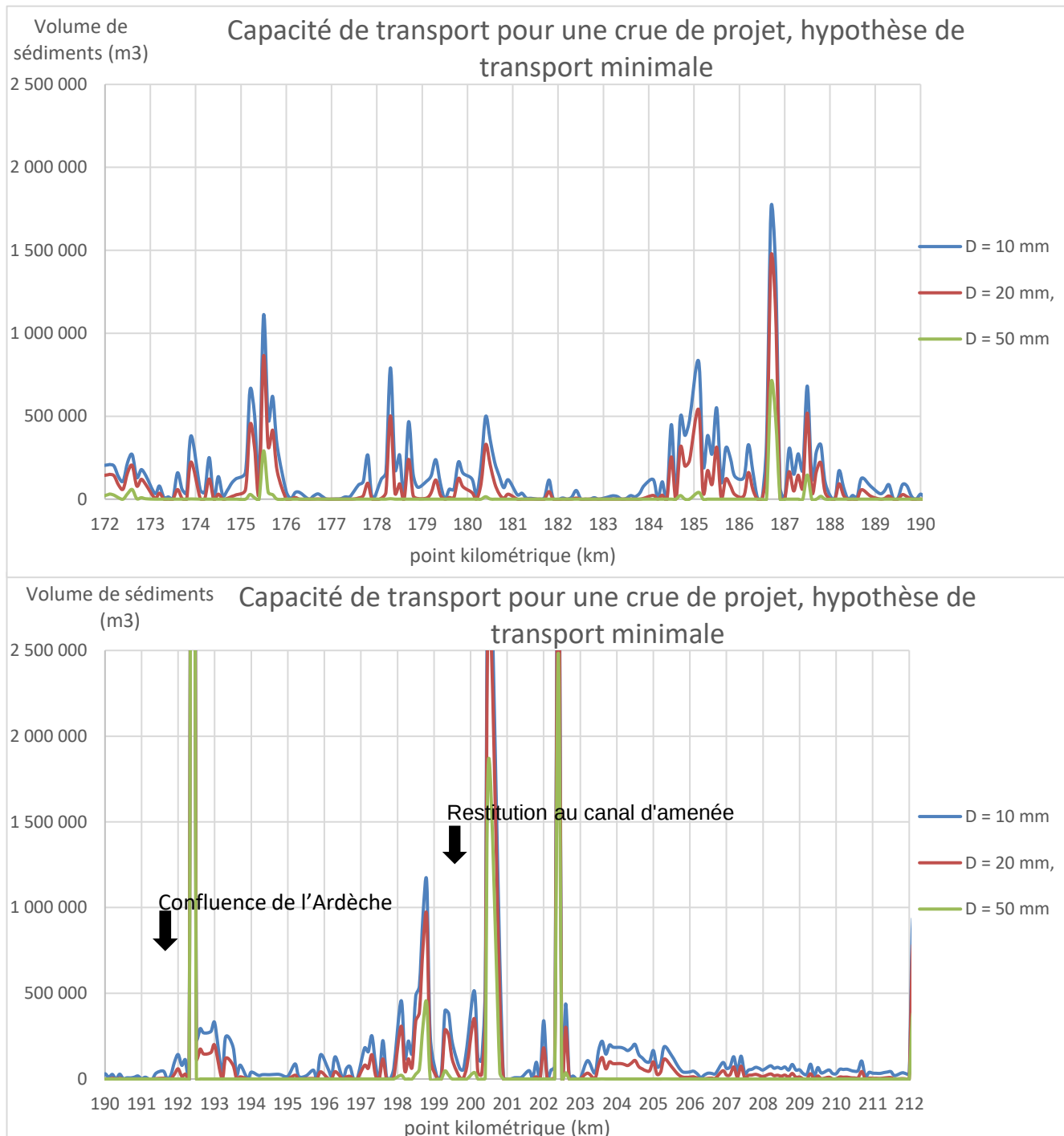


Figure 17 : Capacité de transport pour une crue de projet, hypothèse de transport minimal

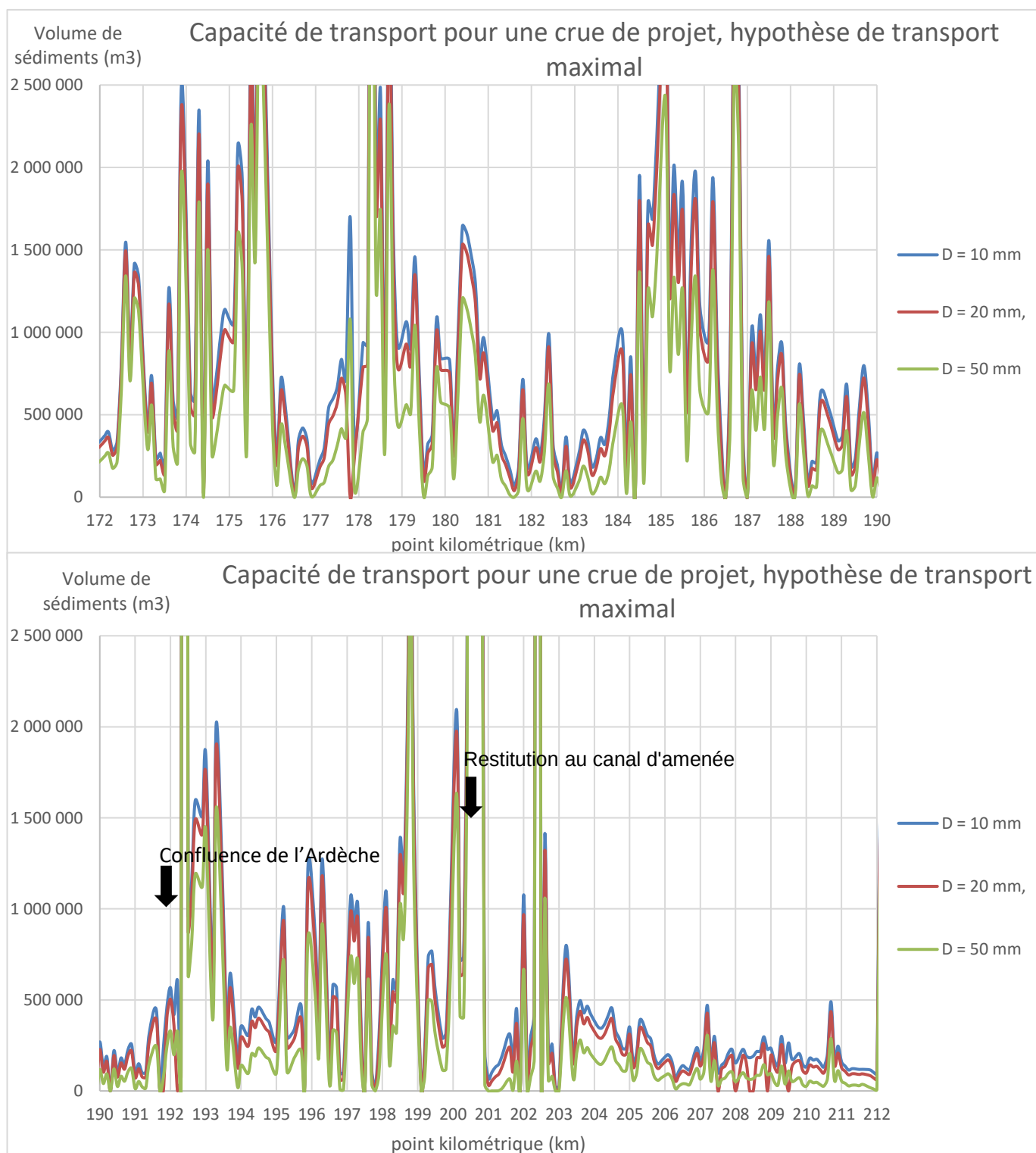


Figure 18 : Capacité de transport pour une crue de projet, hypothèse de transport maximal

On remarque vite qu'une grande différence est visible entre les deux hypothèses de transport (figures 17 et 18), qui restent néanmoins cohérentes avec les résultats observés pour le calcul des diamètres critiques de mise en mouvement des particules. Les zones où les volumes de sédiments transportés sont les plus faibles correspondent aux zones où le diamètres critique en-dessous duquel les particules peuvent être mises en mouvement est le plus faible, comme aux PK 176-177, 181-184, 201, et de 205 jusqu'à la fin.

3.4 Mode de transport dominant : nombre de Rouse

On peut lire sur les graphiques suivants le mode de transport dominant dans le Vieux-Rhône de Donzère, depuis l'absence de transport jusqu'à la suspension, en passant par le charriage, et ce pour toute une gamme de diamètres de particules.

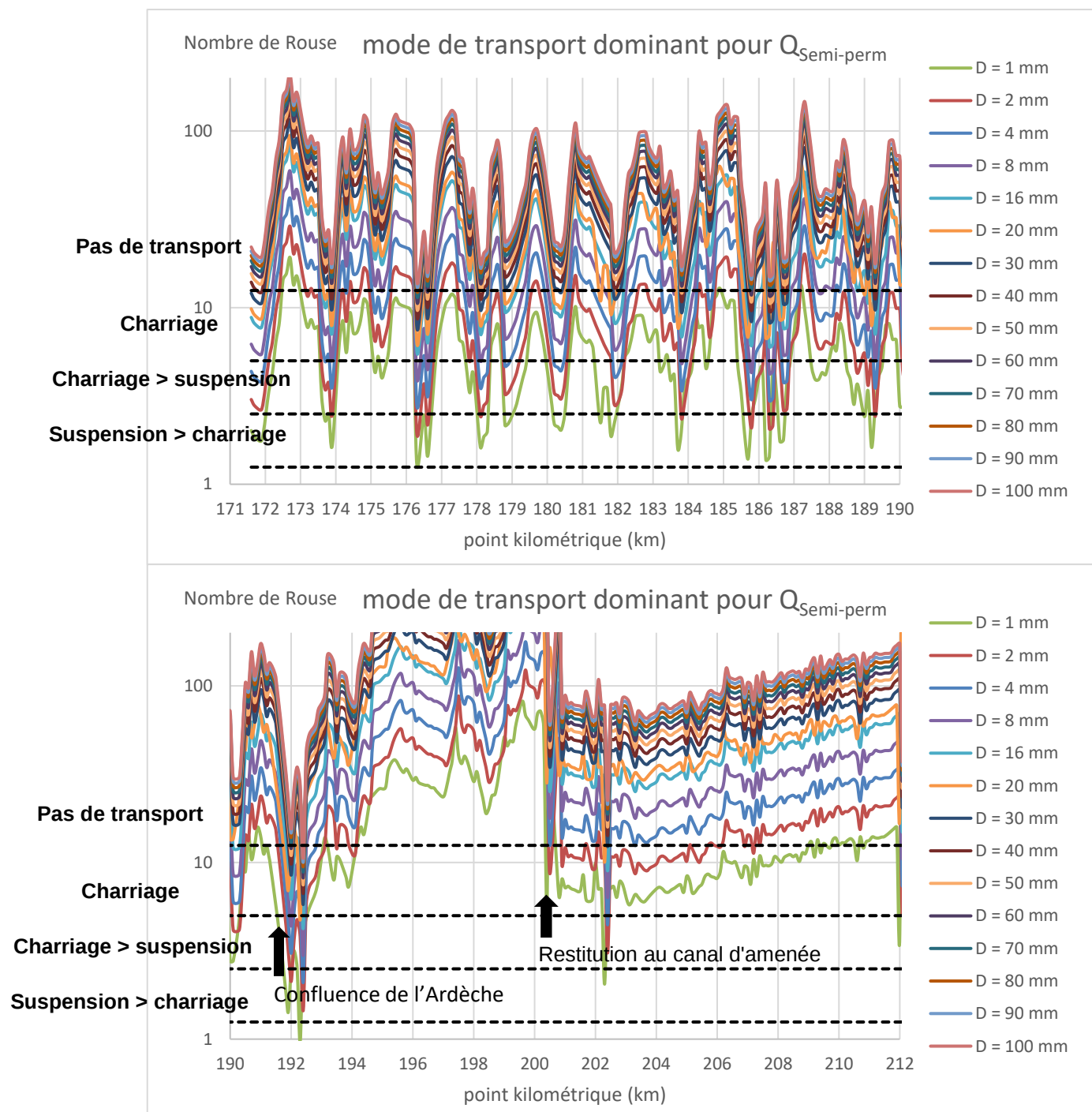


Figure 19 : Mode de transport dominant pour les débits semi-permanents

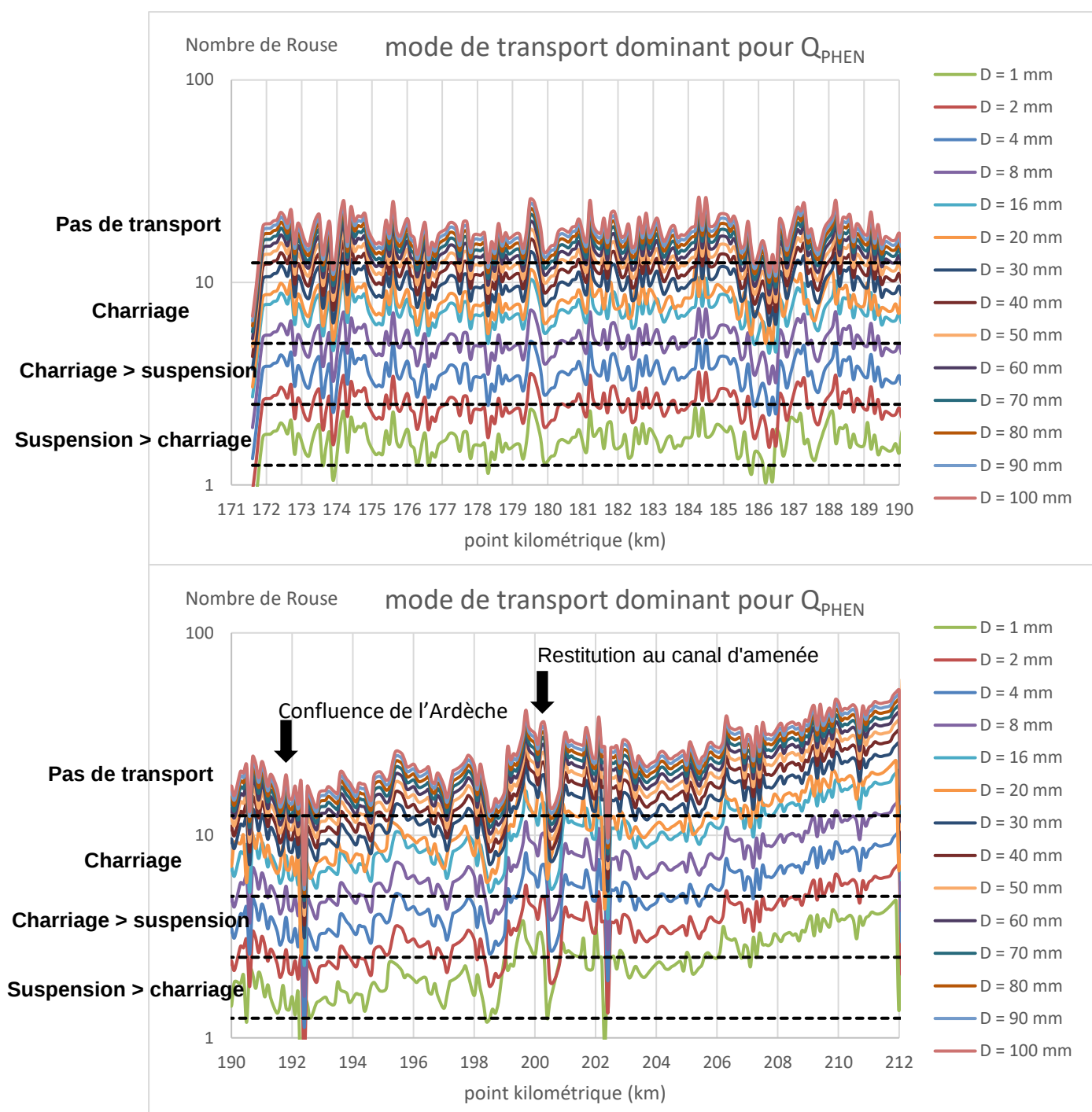


Figure 20 : Mode de transport dominant pour les Plus Hautes Eaux Navigables

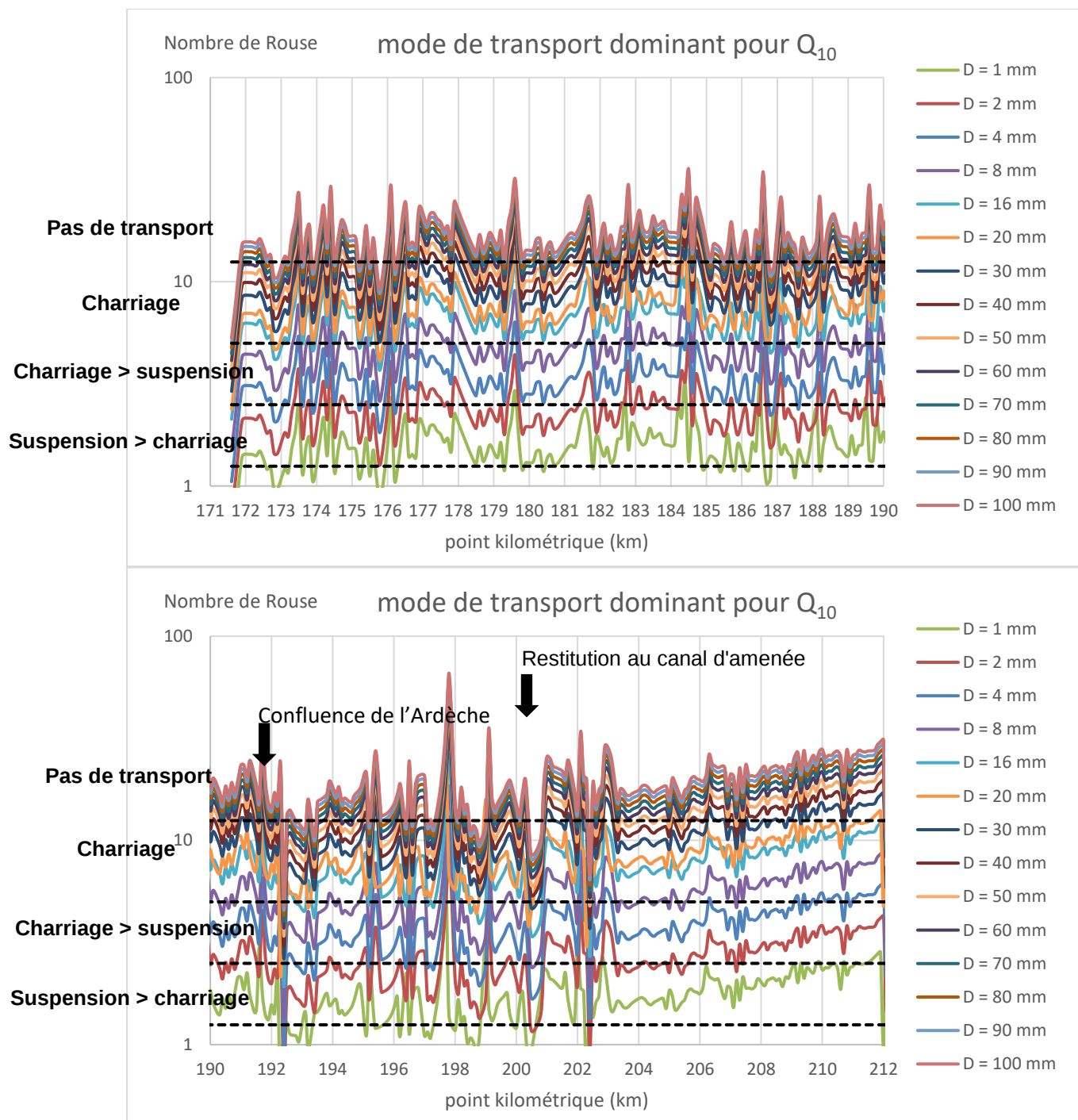


Figure 21 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q_{10}

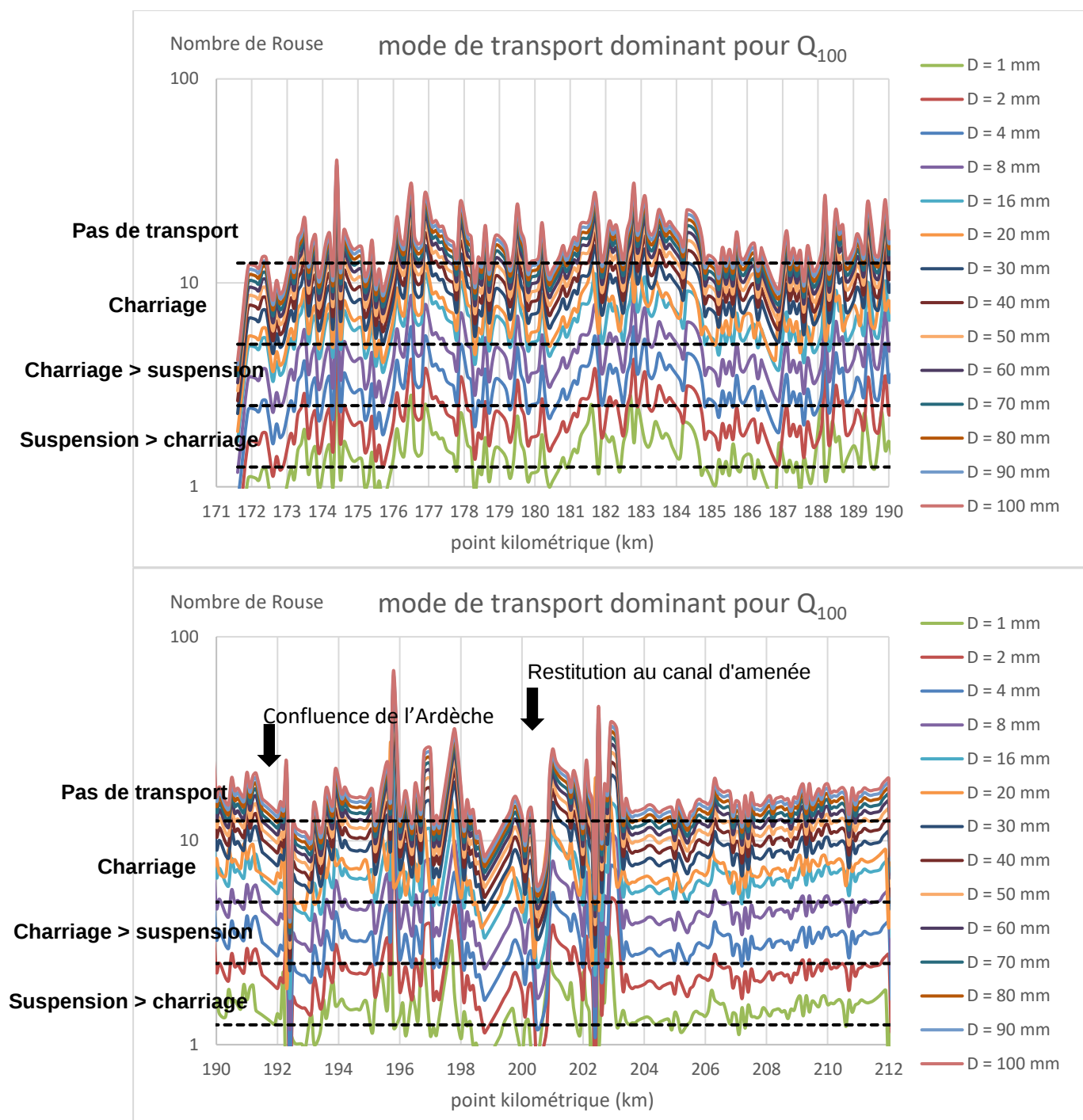


Figure 22 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q_{100}

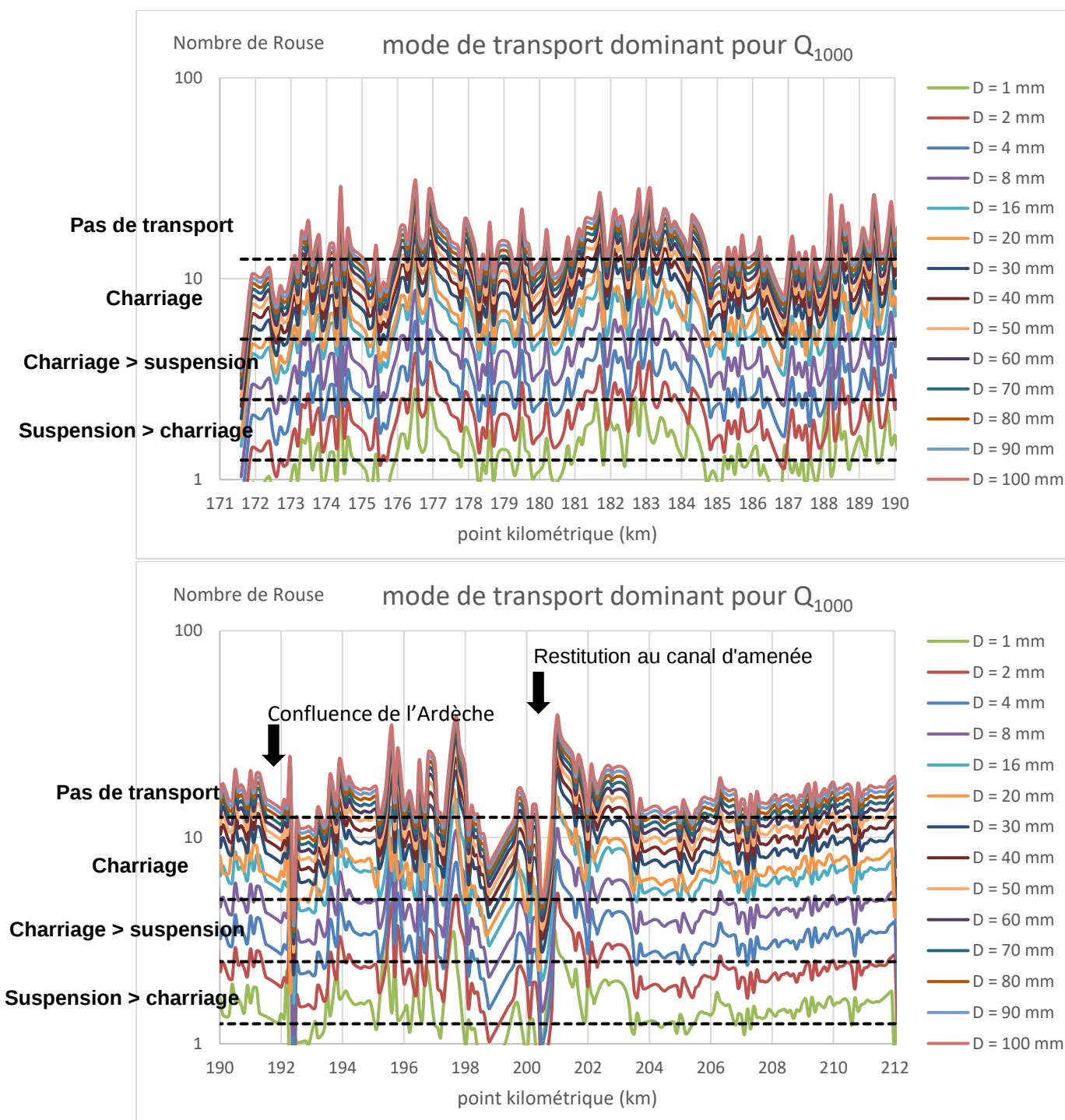


Figure 23 : Mode de transport dominant pour les débits de crue Q1000

En considérant les particules de diamètre 20mm, qui est la D50 des sédiments dragués à Logis-Neuf et potentiellement restitués dans le Vieux-Rhône de Donzère, on voit que les résultats sont globalement cohérents avec les graphiques des diamètres critiques de mise en mouvement des particules. Les particules de 20mm restent globalement immobiles pour les débits d'étiage (annexe 11) et semi-permanent (figure 19), et commencent à être mobilisées par charriage pour les Plus Hautes Eaux Navigables (figure 20) jusqu'au PK 206 où il n'y a nouveau plus de charriage. Pour Q10, Q100 et Q1000 (figure 21, 22 et 23), les particules de 20mm paraissent être mobilisées en continu, se déplaçant la grande majorité du temps par charriage, et passant en suspension pour Q10 et Q100 au PK 202, et au PK 200-201 pour Q1000, juste après la restitution, pour repasser en charriage ensuite.

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 30 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	----------------------------

4. DISCUSSION

La caractérisation du mode de transport sédimentaire s'est divisée en deux processus :

- Dans le cas des différentes occurrences de débits annuels.
- Durant une crue de projet.

Pour les critères calculés pour les différentes occurrences de débits annuels, donc les forces tractrices, diamètres critiques de mise en mouvement des particules et le mode de transport dominant, les résultats sont cohérents entre eux et paraissent tendre vers une mobilisation assez générale des sédiments du Vieux-Rhône de Donzère dans le cas d'une granulométrie homogène de $d_{50} = 20\text{mm}$. Cette observation est valable pour les débits les plus importants (PHEN, Q10, Q100, Q1000) avec toutefois quelques points récurrents où les sédiments ne sont probablement plus mobilisés (PK 177, 181-184, 201 à 203). On observe également de manière générale une baisse du transport sédimentaire à partir des PK205-206, après la restitution du Vieux-Rhône dans le canal d'amenée. Selon le critère de Rouse, le transport paraît se faire majoritairement par charriage, avec un passage en suspension entre les PK 198 et 201, qui correspondent à des zones de forces tractrices relativement élevées. Cela dit, il est nécessaire de garder à l'esprit que le critère de Rouse est encore plus incertain que celui de Yalin-Shield, et doit être considéré avec un certain recul.

Concernant les capacités de transport pendant une crue de projet, il est surtout intéressant ici de regarder l'ordre de grandeur du volume de sédiments déplacés par rapport au volume de sédiments réinjectés. Dans les résultats présentés ici, la différence entre l'hypothèse de transport maximal et minimal est relativement importante, mais on remarque dans les deux cas des zones où les capacités de transport sont supérieures au volume de sédiments réinjectés (300 000m³ au maximum), et d'autres comme aux PK 190-192 ou encore après le PK 206 où les capacités de transport sont relativement faibles, ce qui serait synonyme de dépôt des matériaux réinjectés à ces endroits.

5. CONCLUSION

De manière générale, même si les résultats tendent vers une probabilité de mobilisation assez globale des sédiments réinjectés dans le Vieux-Rhône de Donzère Mondragon, les faisceaux de résultats obtenus entre les hypothèses de transport minimal et maximal restent très larges, et la seule utilisation de ces équations de transports solide ne suffit pas à conclure sur la faisabilité de la réinjection des sédiments dans cette partie du Rhône. Des études complémentaires, notamment sur le terrain pour compléter les modélisations purement théoriques, seront probablement nécessaires.

Ce stage à la Compagnie Nationale du Rhône a été très formateur sur le plan professionnel comme personnel. J'ai pu y approfondir mes compétences en traitement de données, découvrir des techniques de modélisation mathématiques nouvelles pour moi, et échanger avec de nombreuses personnes très compétentes, tant en gestion sédimentaire qu'en hydraulique. Etant ma première expérience en grosse entreprise (tous mes précédents stages ayant été réalisés en laboratoires de recherche publics), ce stage m'a permis de découvrir une nouvelle manière de travailler et des objectifs et contraintes différents de ce que j'avais pu voir jusqu'ici. Cela m'a confortée dans l'idée de continuer à travailler avec eux, puisque la CNR a accepté de signer un contrat de professionnalisation avec moi à partir de septembre 2020 jusqu'à août 2021.

CNR – DPFI-DDCP (référence)	ETUDE TRANSPORT SEDIMENTAIRE(TITRE PRINCIPAL) Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon	Page 31 / 39 18/08/2020
---------------------------------------	--	----------------------------

6. BIBLIOGRAPHIE

CNR, (2014). Analyse des conditions d'exploitation de Génissiat favorables au transit des flux solides issus du Haut-Rhône - Rapport d'étude provisoire DI-SFA 2014-223-01 pour DPFI-DDCP.

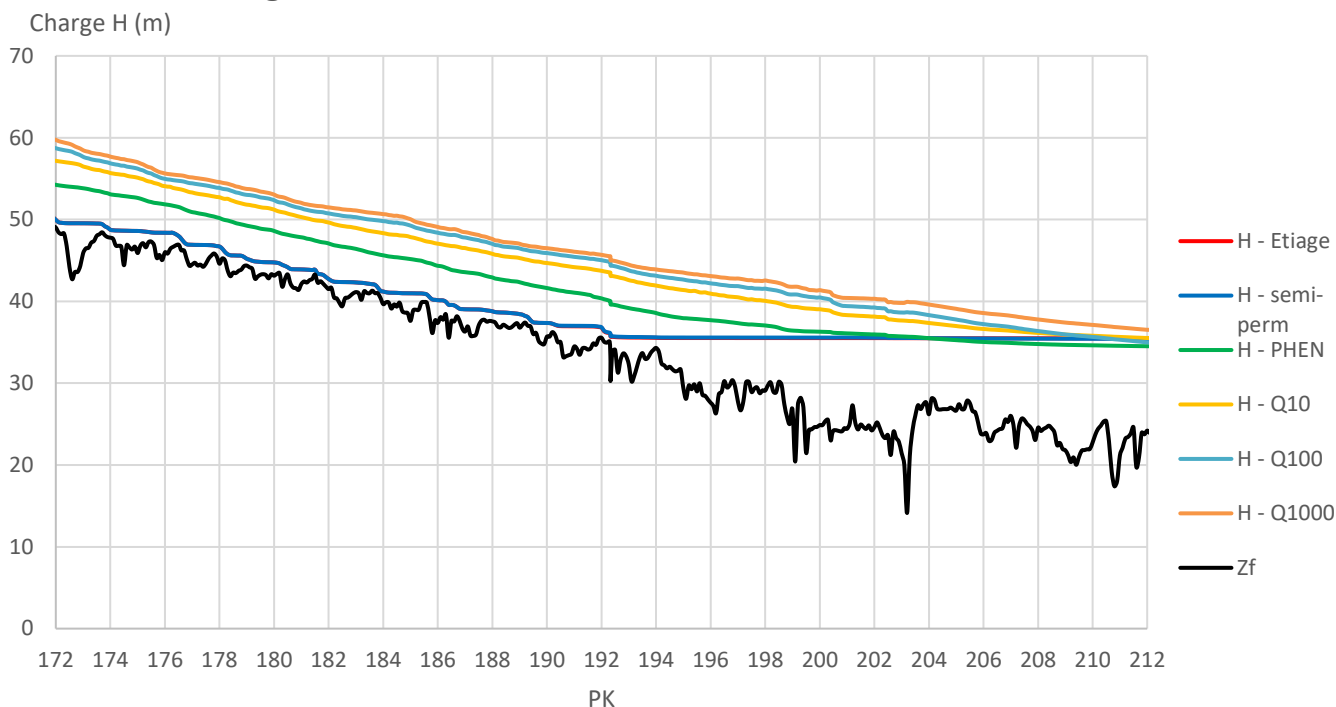
Castel, M. (2015). Retenues de Baix le Logis-Neuf et Montélimar : Etude du transport sédimentaire, dragage de la Drôme.

CNR, (2015). Surveillance et entretien du lit du Rhône et de ses affluents : Actualisation du modèle mathématique de Caderousse.

7. ANNEXES

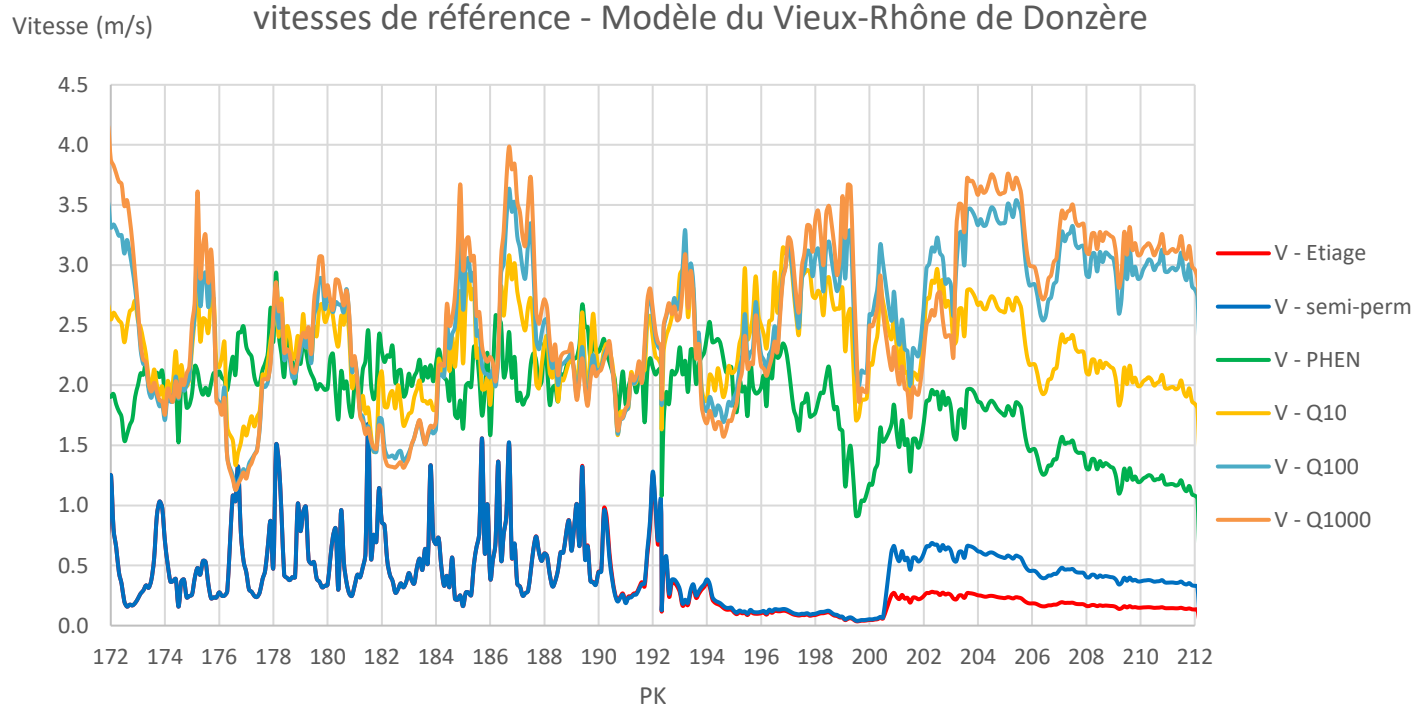
ANNEXES 1 : Charge H de référence – Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon

Charge H de référence - Modèle du Vieux Rhône de Donzère

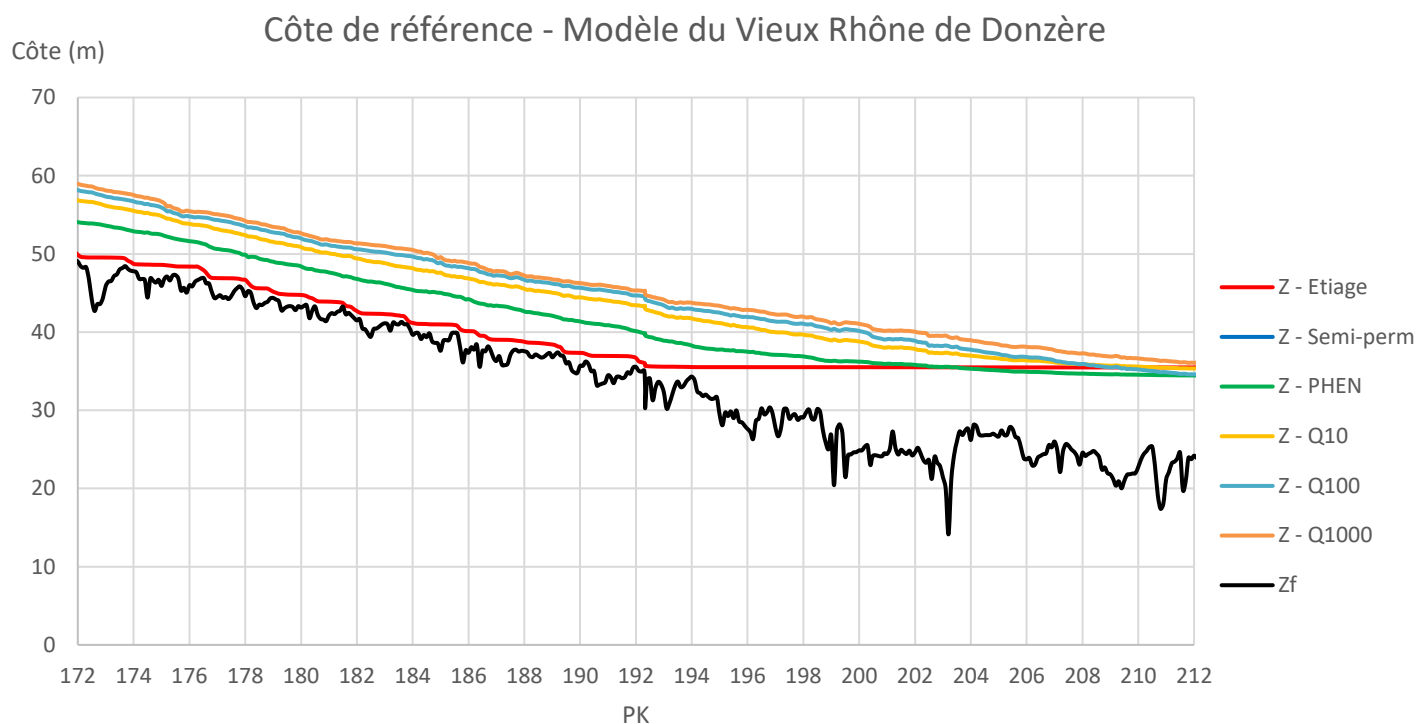


ANNEXES 2 : Vitesse de référence – Vieux Rhône de Donzère

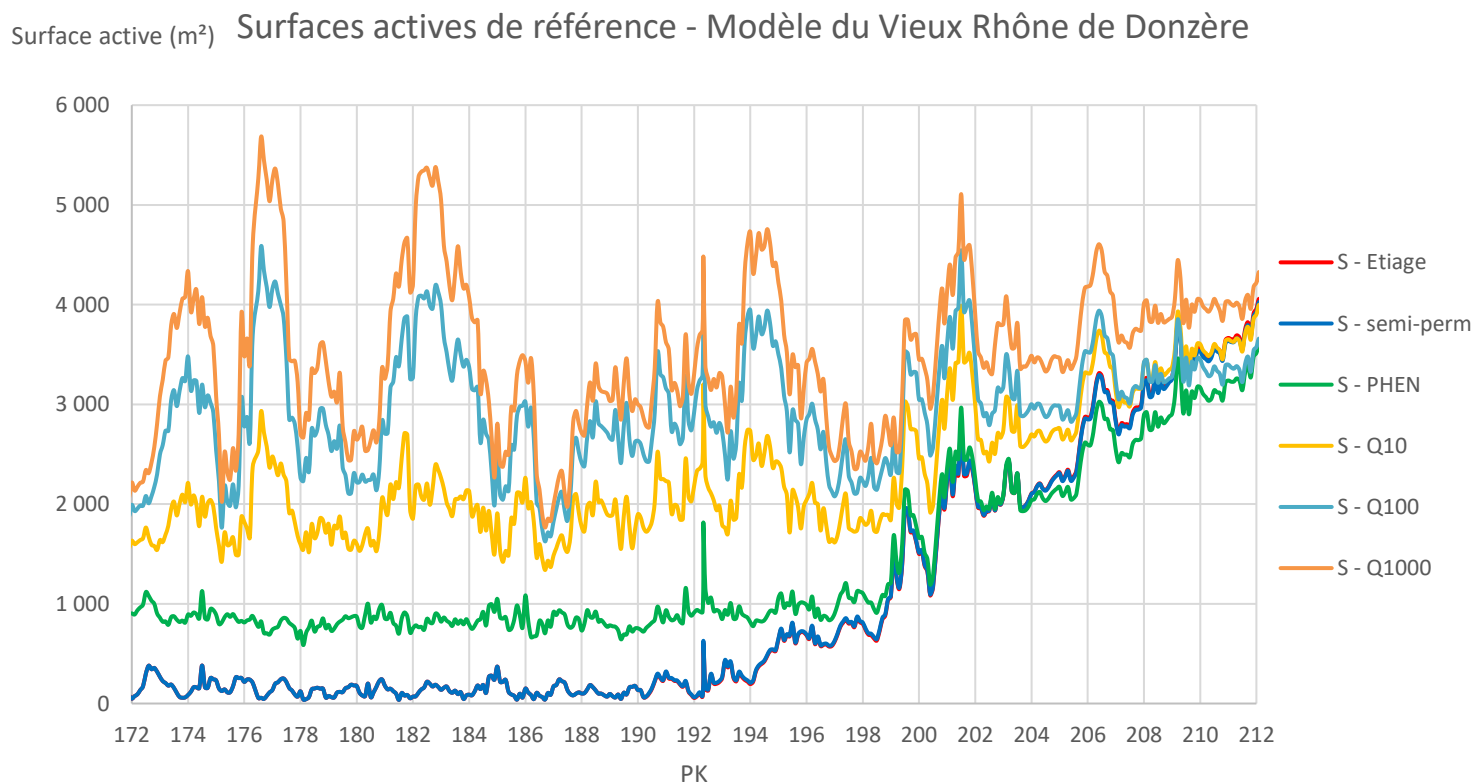
vitesses de référence - Modèle du Vieux-Rhône de Donzère



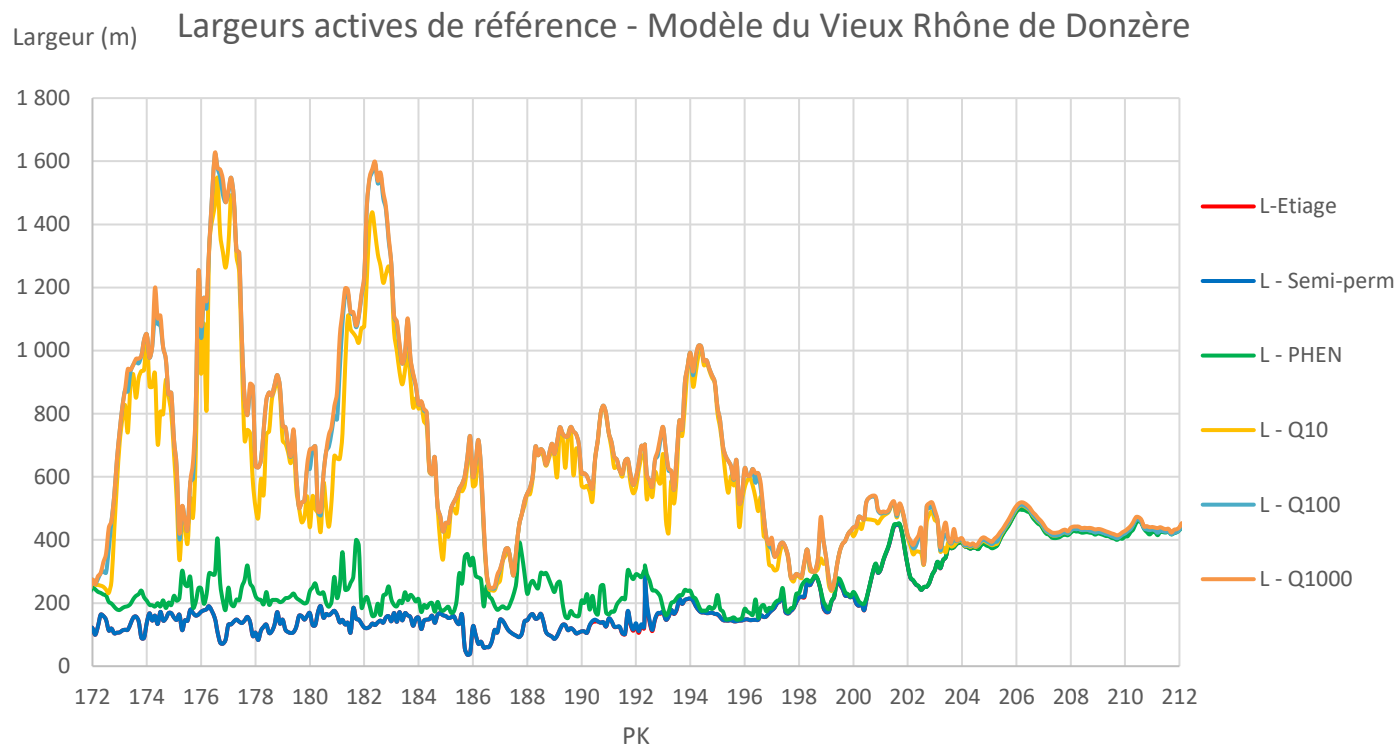
ANNEXES 3 : Cote de référence – Vieux Rhône de Donzère



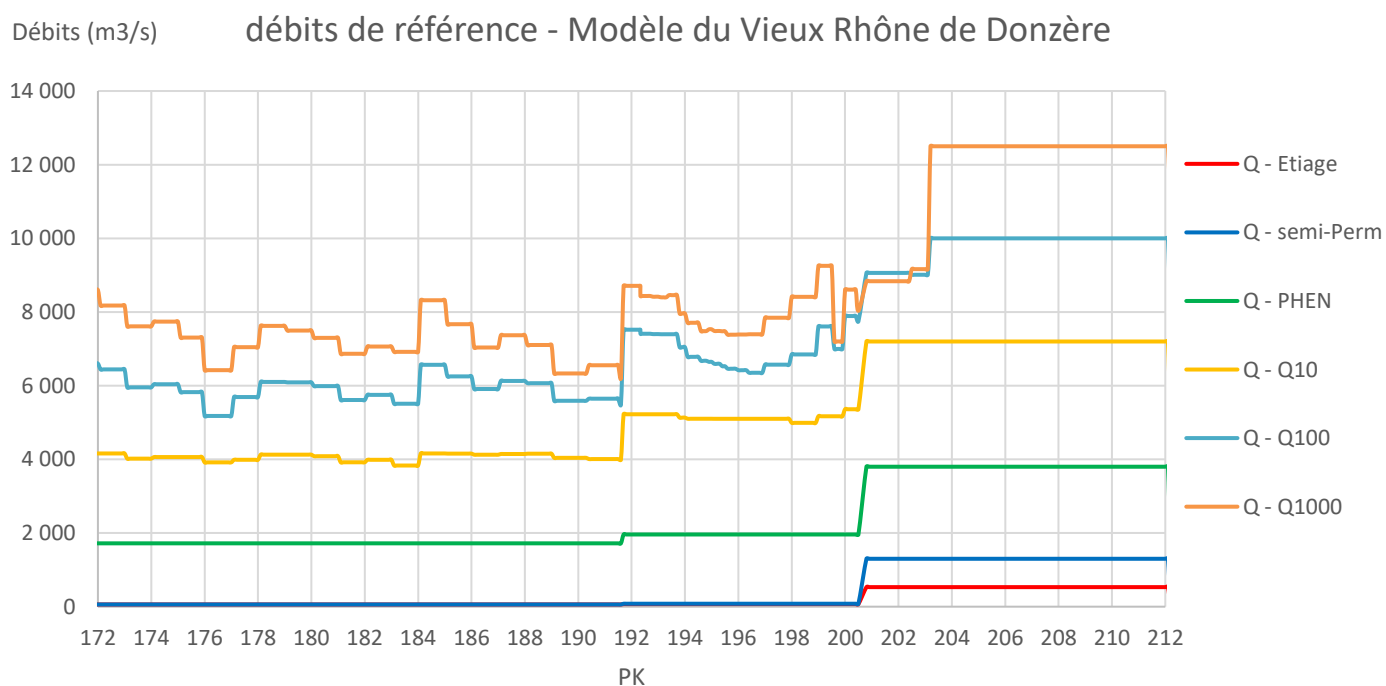
ANNEXES 4 : Surfaces active de référence – Vieux Rhône de Donzère



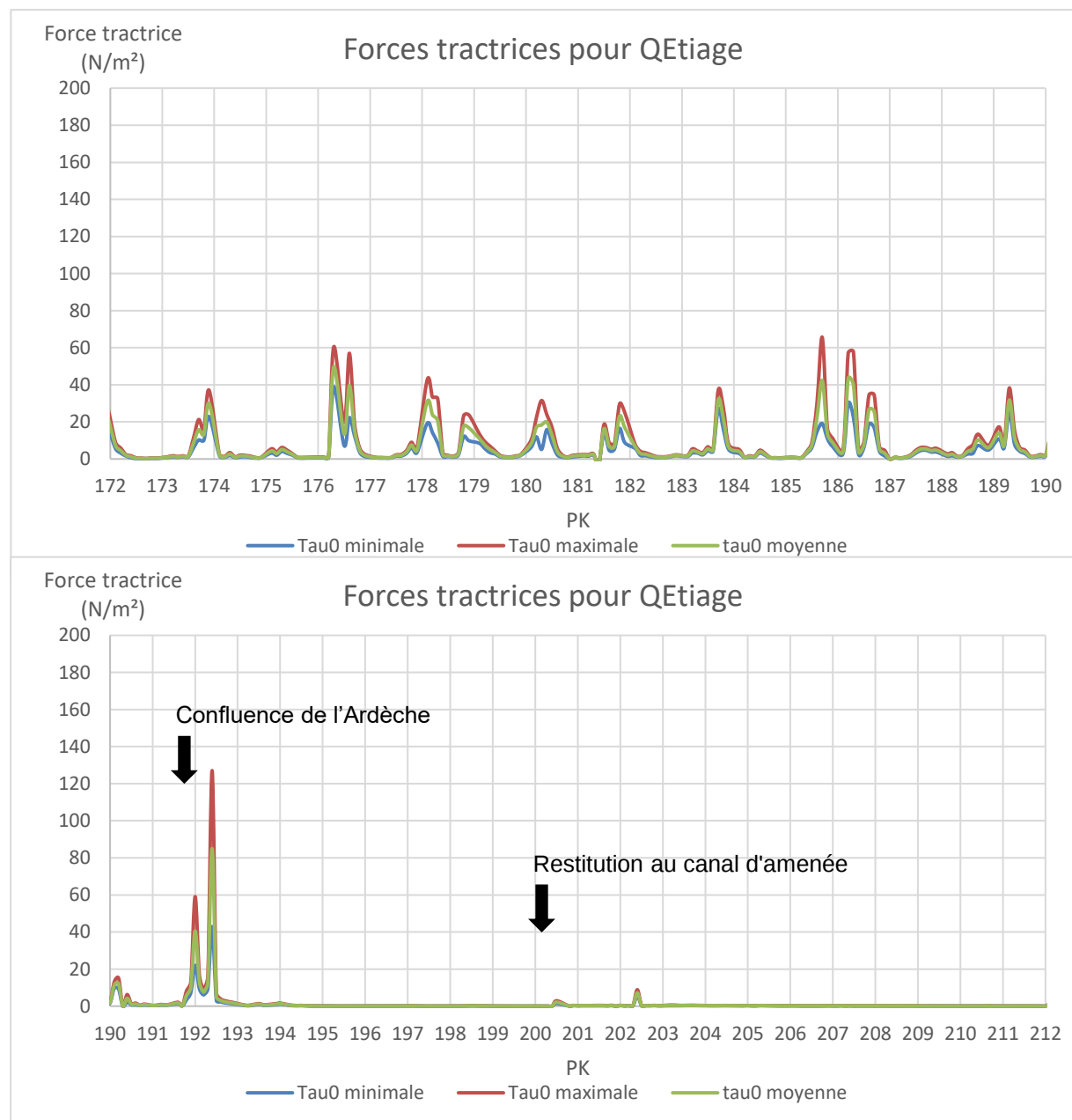
ANNEXES 5 : Largeur active de référence – Vieux Rhône de Donzère



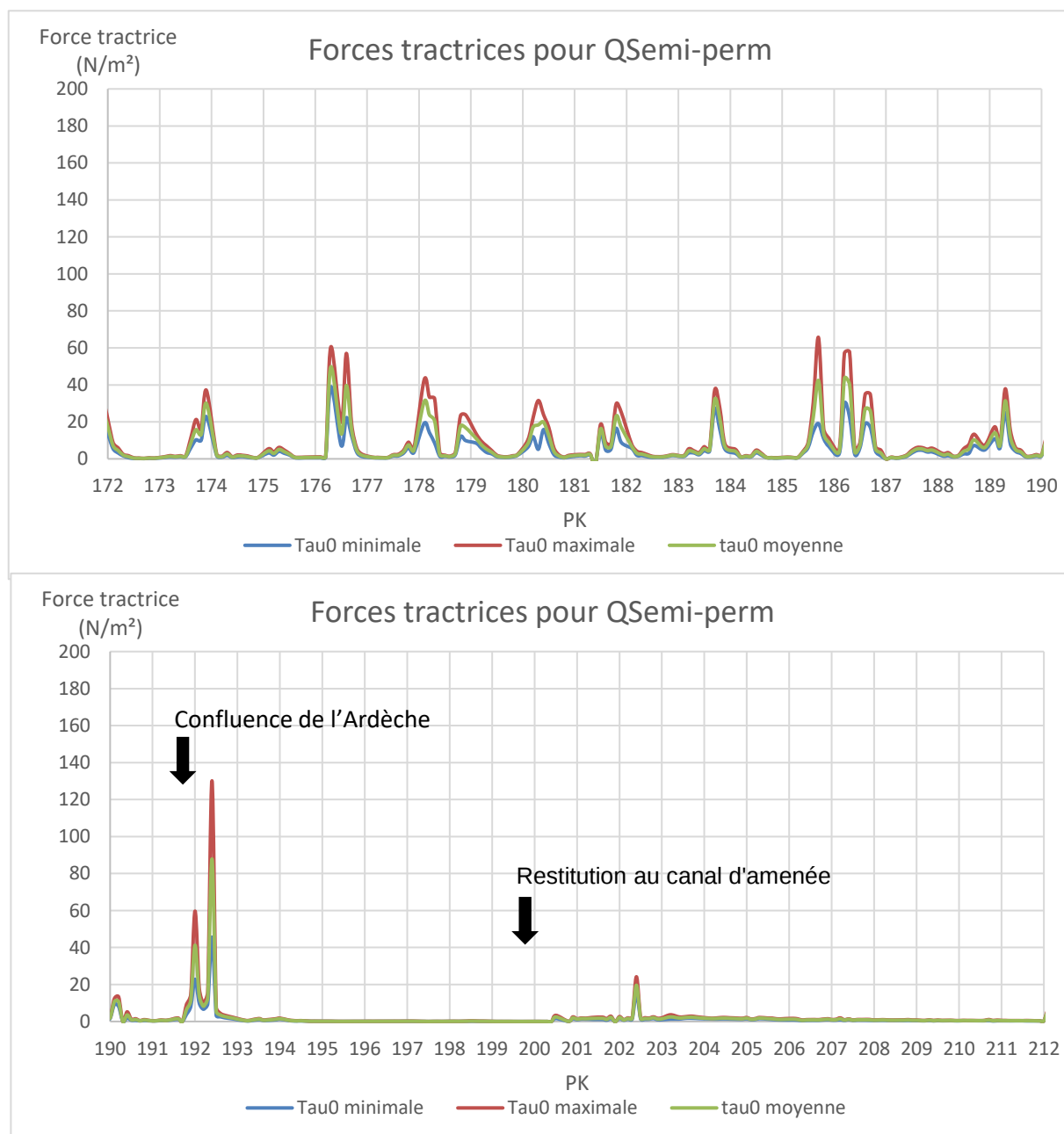
ANNEXES 2 : Débits de référence – Vieux Rhône de Donzère



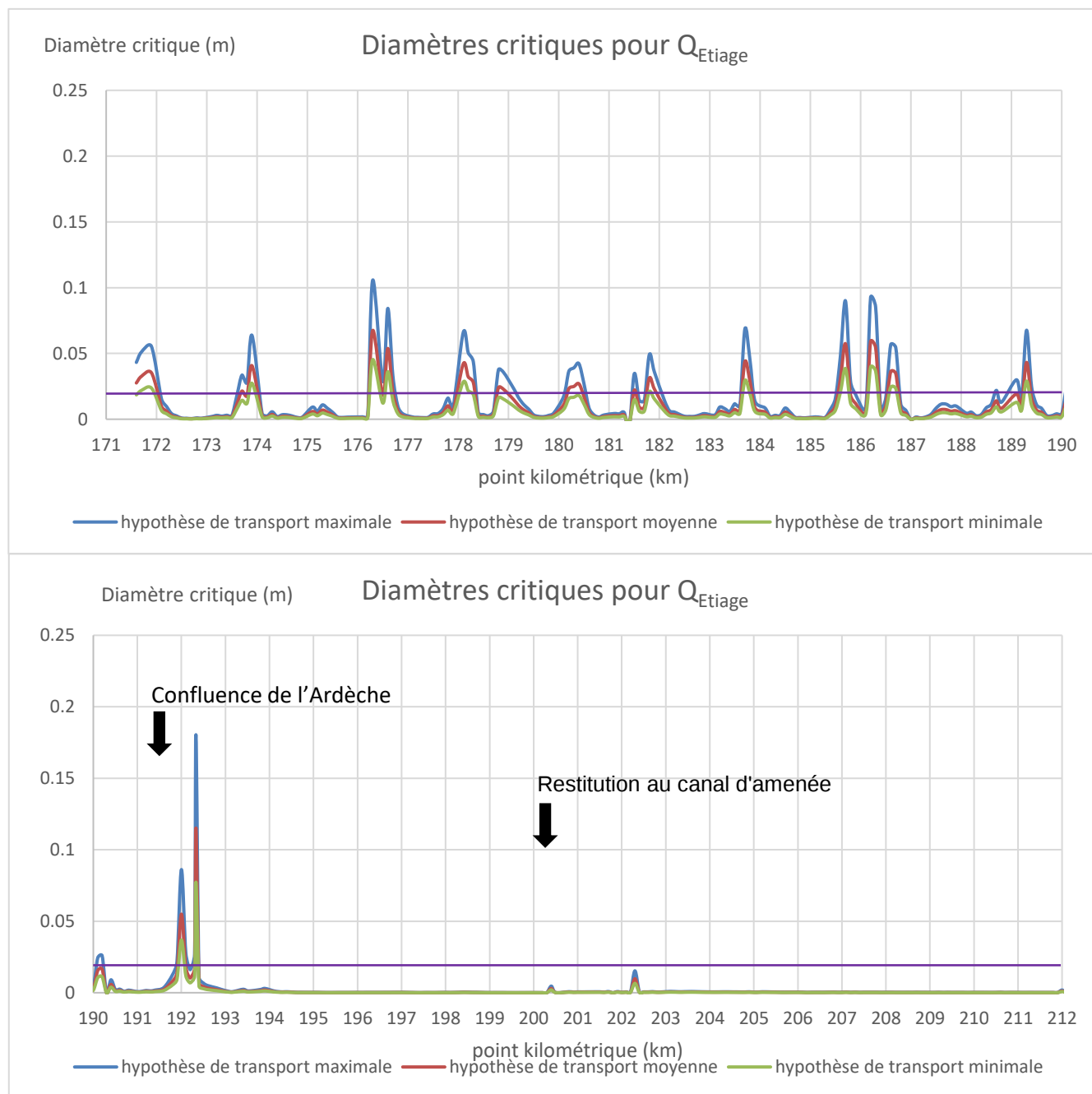
ANNEXES 7 : Forces tractrices pour les débits d'étiage



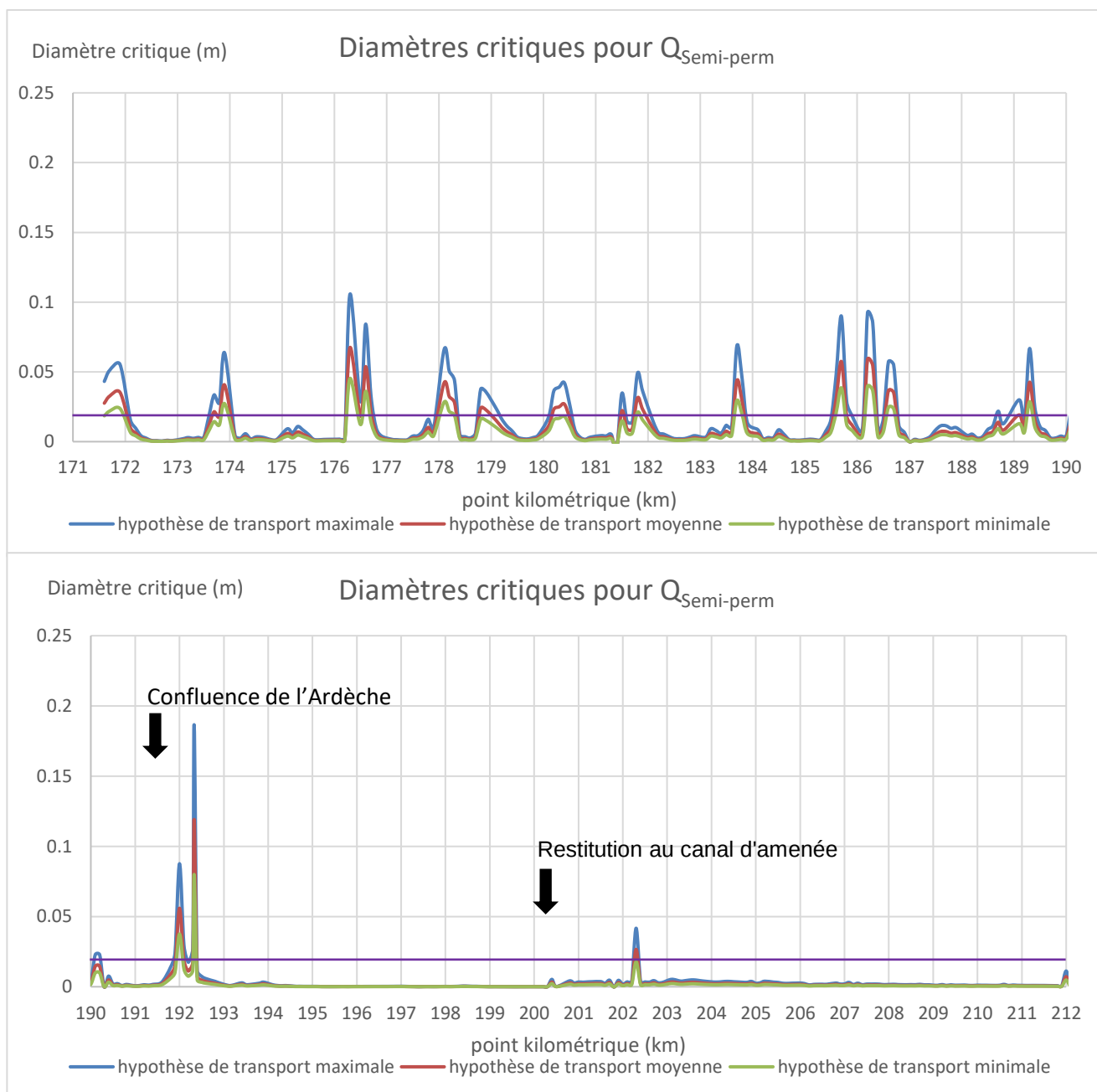
ANNEXES 8 : Forces tractrices pour les débits d'étiage



ANNEXES 9 : Diamètres critiques pour les débits d'étiage



ANNEXE 10 : Diamètres critiques pour les débits d'étiage



ANNEXES 11 : Mode de transport dominant pour les débits d'étiage

