



HAL
open science

Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM)

Hossein Ghaffarian, Hervé Piégay, Gabrielle Seignemartin, Fanny Arnaud,
Jérôme Le Coz

► To cite this version:

Hossein Ghaffarian, Hervé Piégay, Gabrielle Seignemartin, Fanny Arnaud, Jérôme Le Coz. Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM). [Rapport de recherche] CNRS UMR 5600 - EVS; INRAE. 2021. hal-03293545

HAL Id: hal-03293545

<https://hal.science/hal-03293545>

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
Sédiments
du Rhône

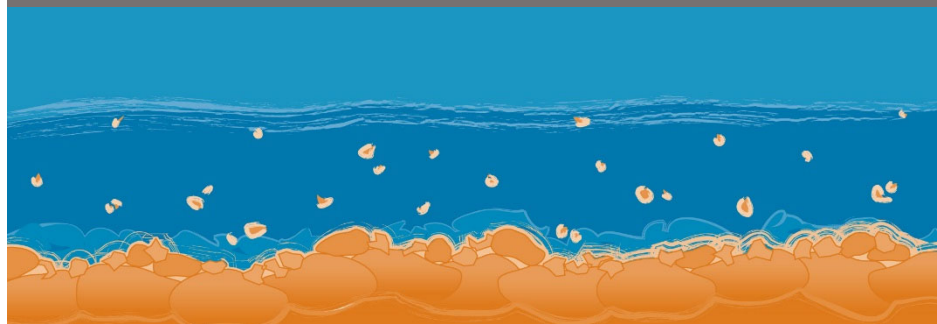
Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM)

OSR5 2018-2020

Rapport final



Plan ~
Rhône



Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM)

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe C	Approfondissement des connaissances pour établir le diagnostic de l'état fonctionnel du Rhône
Action C4	Morphodynamique du chenal
Sous-Action C4.1	Evaluation des effets hydrauliques/hydrologiques de l'évolution morphologique du lit (approche rétrospective et prospective)

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Hossein Ghaffarian	EVS UMR 5600
Hervé Piégay	EVS UMR 5600
Gabrielle Seignemartin	EVS UMR 5600
Fanny Arnaud	EVS UMR 5600
Jérôme Le Coz	INRAE

Pour citer ce document :

Ghaffarian H., Piégay H. Seignemartin G., Arnaud F., Le Coz J. (2021). *Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM)*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions, 29 p.

Résumé

Dans ce travail, nous avons tenté d'évaluer les effets respectifs des deux phases d'aménagement qui vont agir successivement dans le cas du Rhône : (i) la correction du chenal qui repose sur la construction à la fin du 19ème siècle et au début du 20ème siècle d'une série de digues submersibles et d'épis connus sous le nom de Casiers Girardon et (ii) la régulation du débit résultant de la construction d'un canal de dérivation pour produire de l'énergie hydroélectrique entre les années 1950 et la fin des années 1980. Pour se faire, deux tronçons court-circuités du Rhône (Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon) ont été modélisés et comparés. Pour cette modélisation, nous avons établi trois stratégies : (i) étudier l'évolution des changements hydrauliques du Rhône à la suite des différentes phases d'aménagement (i.e. Casiers Girardon et dérivation), (ii) analyser l'effet des ouvrages hydrauliques (qui correspondent au barrage, seuil et canal de dérivation) sur les caractéristiques hydrauliques du chenal au cours de la période récente (géométrie et rugosité récentes), et (iii) vérifier la sensibilité de la débitance du chenal principal avec et sans bras secondaires. Les résultats montrent un comportement différent sur chacun des sites en réponse aux deux phases d'aménagement (casiers Girardon et dérivation) en termes de différents éléments hydrauliques tels que l'élévation de la ligne d'eau, la vitesse d'écoulement et la rugosité du lit. En général, PDR a été principalement modifié lors de la première phase d'aménagement (casiers Girardon) tandis que les changements de DZM peuvent être liés principalement à la deuxième phase d'aménagement (dérivation). Notre analyse souligne que l'évolution morphologique du lit du Rhône et les aménagements ne semblent pas avoir significativement modifié les lignes d'eau pour la crue décennale ou des crues plus courantes encore à DZM et PDR. La dérivation d'une partie du débit dans le canal hydroélectrique réduit en outre très significativement les fréquences d'inondation pour les crues de Q5 (DZM) à Q10 (PDR).

Mots-clés

OSR ; Rhône ; débitance ; sédimentation des marges ; végétalisation ; lignes d'eau ; vitesses d'écoulement ; fréquence d'inondation

1. INTRODUCTION	4
1.1. Sites d'étude et les ouvrages d'endiguements	5
2. MATERIEL ET METHODES	6
2.1. Moteur de modélisation MAGE.....	6
2.2. Base de données	7
2.3. Les stratégies de modélisation	9
2.3.1. Évolution des changements hydrauliques au cours du temps	11
2.3.2. Effet des ouvrages hydrauliques sur les conditions hydrauliques au cours de la période récente.....	13
2.3.3. L'effet de la déconnexion du bras latéral.....	14
3. RESULTATS	15
3.1. Les résultats initiaux.....	15
3.2. Evolution des conditions hydrauliques au cours de temps.....	17
3.3. Effet des ouvrages dans la situation actuelle.....	19
3.4. Effet hydraulique du bras de la Platière.....	20
4. DISCUSSION	21
5. CONCLUSION	27
6. BIBLIOGRAPHIE	29

1. INTRODUCTION

Le Rhône est l'un des plus grands fleuves d'Europe de l'ouest et le plus important du bassin versant méditerranéen après le Nil. Le bassin du Rhône est le troisième plus grand bassin de France, drainant une superficie totale de 98,500 km² (90 500 km² en France). Le débit annuel moyen à la station de jaugeage la plus en aval (Beaucaire) est de 1 720 m³/s (Olivier et al., 2009). Les débits les plus élevés ont été récemment enregistrés en décembre 2003. Le débit était alors de 11 500 m³/s à Beaucaire tandis que la crue centennale (Q₁₀₀) est estimée à 10 300 m³/s (Provansal et al., 2012), et le niveau le plus élevé enregistré est de 13 000 m³/s lors de la crue historique de 1840 (Bravard, 2010).

Au cours des deux derniers siècles, le Rhône a été fortement modifié. Les modifications du chenal ont commencé dans la seconde moitié du XVIII^{ème} siècle avec la construction de digues longitudinales insubmersibles pour protéger la population des inondations (Fruget, 1992 ; Guerrin, 2015). L'aménagement fluvial s'est poursuivi pendant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle avec la première grande phase de travaux correspondant à la correction du chenal. Cette correction est basée sur un ensemble de modifications telles que la construction de champs d'épis, chaque épi étant relié aux autres par des digues submersibles presque continues de Lyon à Arles. Ces champs d'épis sont à l'origine de milieux riverains artificiels appelés « Casiers Girardon » et d'une déconnexion des chenaux secondaires. Ces infrastructures ont été construites pour concentrer les flux dans un lit unique et étroit afin de favoriser la navigation (Fruget, 1992). Les ouvrages ont contraint la dynamique fluviale, favorisant des changements morphologiques rapides (Roditis and Pont, 1993 ; Parrot, 2015).

Du milieu à la seconde moitié du XX^e siècle, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), qui est en charge de l'aménagement du Rhône, a construit de nombreux barrages (19 en France entre le lac Léman et la mer Méditerranée), dont 17 d'entre eux suivent le cours historique de la rivière avec un canal parallèle dérivant l'eau pour la production hydroélectrique. Le Rhône court-circuité (RCC) ne reçoit qu'un débit résiduel (entre 30 et 150 m³/s), qui augmente lors des crues, lorsque le débit d'exploitation maximum de l'usine est dépassé. Actuellement, les aménagements hydroélectriques du Rhône représentent environ 25 % de la production hydroélectrique nationale (Riquier, 2015).

Ces deux phases d'aménagement ont induit des modifications morphologiques importantes. Parrot (2015) a également montré que l'incision du chenal et l'armurage du fond du lit se sont produits lors de cette phase d'aménagement. Räßple (2018), Tena et al. (2020) ont également souligné un processus de végétalisation des casiers Girardon. L'incision s'est prolongée également dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle sur certains sites du fait des activités extractives.

L'objet du présent rapport est d'étudier les incidences de ces changements sur les conditions hydrauliques du chenal.

Deux sites ont été sélectionnés pour conduire ce travail : les sections court-circuitées de Péage de Roussillon et de Donzère dont les changements morphologiques sont bien connus. Il est à noter que nous étudions les crues relativement fréquentes et non les crues extrêmes avec de grands débordements, que le modèle hydraulique OSR ne pouvait pas représenter dans son état actuel. Le modèle a donc été exécuté pour une gamme de débits de 500 à 4700 m³/s (Q₁₀ à PDR) et à 6179 m³/s (Q₁₀ à DZM) dans le Rhône total.

1.1. Sites d'étude et les ouvrages d'endiguements

Dans cette étude, deux des tronçons court-circuités situés sur le cours moyen du Rhône ont été examinés : Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM). Ils ont été court-circuités à des dates différentes, en 1977 à PDR et en 1952 à DZM. Les débits maximums exploités par les usines hydroélectriques sont de 1600 m³/s à PDR, 1850 m³/s et à DZM. Comme on le voit sur la Figure 1, à Péage-de-Roussillon l'ouvrage de dérivation se situe au PK 51 en amont du site, le canal de dérivation étant en rive gauche et un seuil est observé sur le vieux Rhône au PK 60.5 à l'aval du site. À Donzère-Mondragon le barrage se situe au PK 171.5 en amont du site avec un canal de dérivation en rive gauche également. Le tronçon court-circuité présente également une particularité avec la confluence avec l'Ardèche au PK 191.5.

Tableau 1 Sites d'étude de Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon

Site	Point kilométrique (PK)	Longueur (km)	Pente (m/km)	Débit réservé (m ³ /s)	Débit maximal dérivé (m ³ /s)	Fréquence des crues			
						Q2	Q5	Q10	Q100
Péage-de-Roussillon (PDR)	50 - 63	13	0.61	85	1600	3296	4066	4700	6100
Donzère-Mondragon (DZM)	170 - 200	30	0.84	60	1850	4547	5575	6179	7734

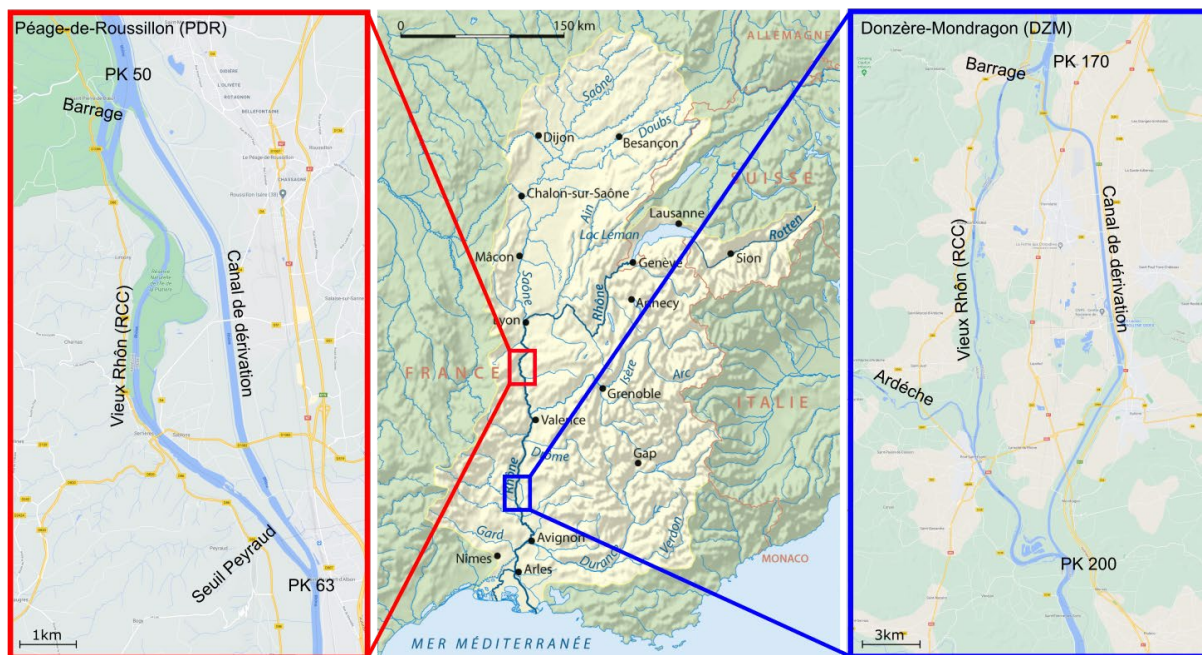


Figure 1. Sites d'étude de Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon

A PDR, 178 ouvrages d'endiguement types (sans compter les seuils et les casiers de lônes) ont été recensés, ce qui équivaut à une moyenne de 14,2 ouvrages par kilomètre linéaire, couvrant une emprise spatiale cumulée de plus de 66 hectares, soit 15,7 kilomètres de linéaire endigué (les deux

rives cumulées). Les casiers et les champs d'épis y ont, respectivement, une aire moyenne de 0,7 et 0,38 hectare et sont situés en moyenne à 2,34 et 1,2 mètres au-dessus de la ligne d'eau (Figure 2). A DZM, on recense 272 ouvrages types (sans compter les seuils et les casiers de lônes), ce qui équivaut à une moyenne de 8,8 ouvrages par kilomètre linéaire, 247 hectares étant couverts (emprise spatiale cumulée), 38,2 kilomètres de linéaire étant corrigés (les deux rives cumulées). Les casiers et les champs d'épis y ont, respectivement, une aire moyenne de 1,58 et 0,44 hectares et sont situés en moyenne à 3,57 et 2,45 mètres au-dessus de la ligne d'eau (Figure 2).

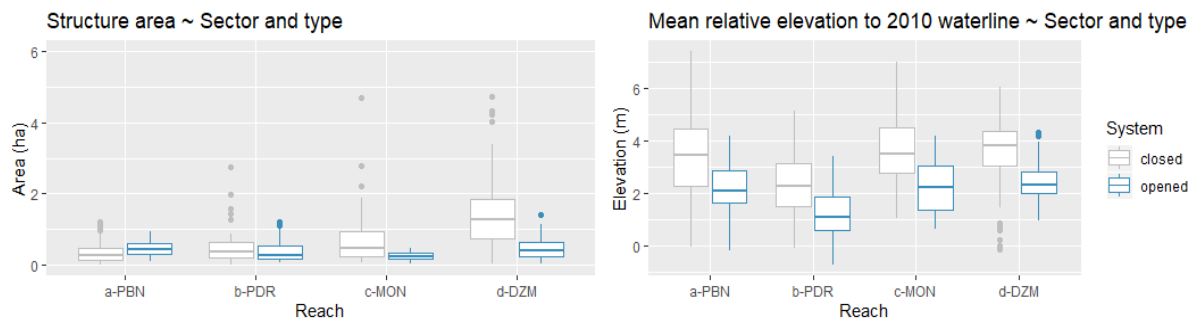


Figure 2. Surface (a) et hauteur moyenne au-dessus de la ligne d'eau (b) des casiers Girardon

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Moteur de modélisation MAGE

MAGE est un logiciel de simulation monodimensionnelle d'écoulement en rivière en régime transitoire. Son domaine d'application privilégié est la simulation des crues et des zones inondées et les simulations sur de grands domaines et de longues périodes car les calculs sont particulièrement rapides. Les équations utilisées sont les équations de Barré de Saint-Venant avec la formule de perte de charge de Manning-Strickler. La discrétisation des équations de Saint-Venant est faite selon un schéma aux différences finies semi-implicite à quatre points (schéma de Preissmann).

MAGE prend en compte la géométrie réelle du lit de la rivière définie par des profils en travers et utilise une modélisation géométrique de la rivière en lit composé – mineur, moyen (ou majeur actif) et majeur de stockage (« casiers » au sens hydraulique) – avec calcul de la répartition des débits. La possibilité de définir des casiers accroît encore la souplesse de modélisation des échanges entre zones d'écoulement et zones de stockage. La topologie du réseau peut être maillée ce qui permet de représenter des défluent (îles) et des conditions aval multiples (deltas).

D'autre part MAGE est particulièrement adapté à la simulation de la gestion des ouvrages d'un réseau hydraulique complexe. La possibilité offerte à l'utilisateur expérimenté d'inclure au code de base ses propres routines permet de simuler des règles de gestion aussi complexes qu'il est nécessaire.

2.2. Base de données

Deux sources de cartes ont été utilisées pour reconstituer la géométrie du modèle : (i) des cartes de 1897 et (ii) des données LIDAR en 2015. Les cartes de 1897 qui ont été établies juste après la construction des digues sont constituées de lignes topographiques de 25 à 50 cm tandis que les données LIDAR ont une précision spatiale de 10 cm. Bien que précises, les cartes de 1897 présentent des zones non renseignées dans certaines parties du lit moyen (absence de données topographiques). Pour résoudre ce problème, nous comparons d'abord les cartes de 1891 avec les sections transversales que l'on a tous les kilomètres (ainsi que les cartes les plus proches de celles de 1897 mais qui présentent une moindre précision) avec les données récentes du LIDAR pour vérifier l'évolution de la rivière. Parmi 188 points répartis le long des sections étudiées, nous avons trouvé en moyenne une différence de 17 ± 50 cm (17 cm est la différence moyenne et ± 50 cm est la différence entre le premier et troisième quartile de la distribution) entre les cartes de 1891 et les données LIDAR récentes. Par conséquent, en supposant une marge d'erreur de 17 cm, les données LIDAR ont été utilisées dans les endroits où les données des cartes de 1897 font défaut.

Les autres données utilisées correspondent aux lignes d'eau utilisées pour calibrer le modèle. Nous avons utilisé les lignes d'eau de différentes époques et avec différents débits (Tableau 2). Ces lignes d'eau sont réparties sur différentes périodes : crue de 1856 et étiage de 1902-1903 nommé « l'étiage Fascicule Armand » avant les Casiers Girardon, crue de 1928 et étiage de 1945-1946 entre les Casiers Girardon et la dérivation et les quatre lignes d'eau de la CNR après la dérivation.

Tableau 2 Lignes d'eau utilisées pour calibrer le modèle

	Crue de 1856	Étiage de 1902-1903	Crue de 1928	Étiage de 1945-1946	Les lignes d'eau CNR			
Débit à PDR	6300	370	5120	370	2576	2835	3210	4635
Débit à DZM	8700	550	6480	550	1093	3297	3595	4200
Période de temps	Avant les Casiers Girardon		Entre les Casiers Girardon et la dérivation		Après la dérivation			

Pour transformer les coordonnées Bortaloué en NGF IGN 69 et analyser les changements de talweg, qu'il y ait eu incision ou sédimentation, trois lignes de talweg pour 1900, 1960 et 2000 ont été utilisées (Thèse E. Parrot) (cf. Figure 3). A PDR, l'évolution moyenne du fond du lit du Rhône est de -1.07 m, avec un maximum d'incision observé de -4.4 m au niveau du PK 65 et une aggradation de +3.9 m au niveau du PK 51. A DZM, il y a un maximum d'incision atteignant -5.01 m au niveau du PK 197 et un maximum d'aggradation de + 1.57 niveau du PK 204 avec une évolution moyenne de -0.64 m.

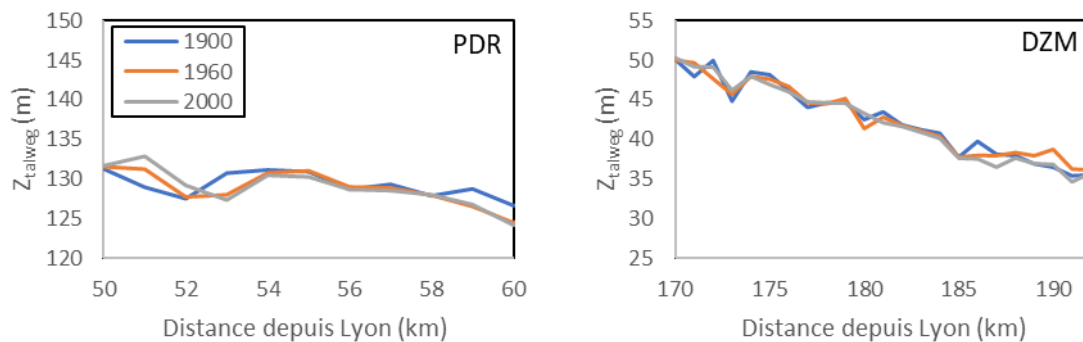


Figure 3. Altitude du fond du lit pour 1900, 1960, and 2000 (données de E.Parrot, 2015)

Nous avons utilisé le fond du lit de 1900 pour la période avant les Casiers Girardon, celui de 1960 pour la période entre les Casiers Girardon et la dérivation et celui de 2000 pour la période après la dérivation. Pour expliquer l'évolution du talweg au cours de ces trois périodes, la Figure 4 montre la moyenne de l'altitude du talweg le long du site d'étude pour les trois dates. Comme on le voit, il y avait une incision marquée à PDR de 1900 à 1960, puis le talweg a ensuite peu évolué. En revanche à DZM il y a eu une légère sédimentation de 1900 à 1960 puis une incision de 1960 à 2000.

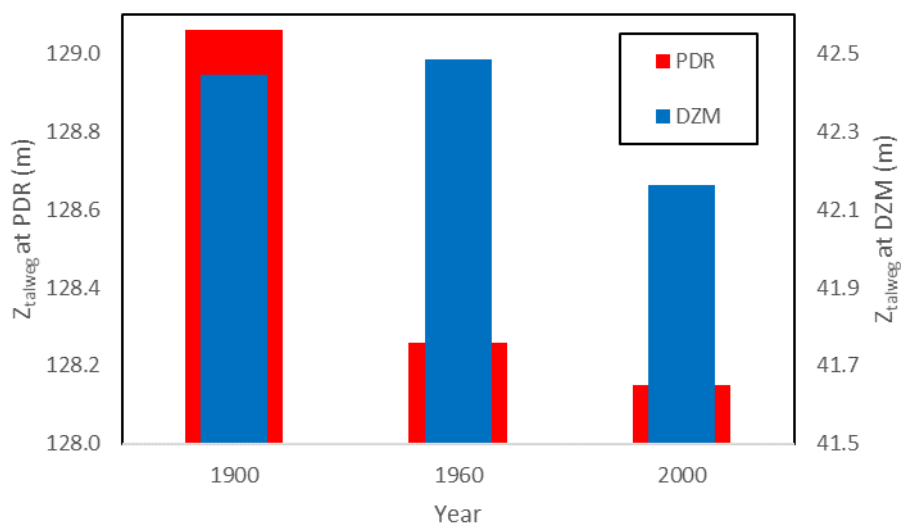


Figure 4 Altitude moyenne du fond du lit aux 3 dates observées pour chacun des RCC étudiés.

Enfin, les paramètres hydrauliques (Strickler et coefficients de débit) ont été calculés à partir des données enregistrées sur le terrain, ils sont contrôlés à partir du modèle 1D du Rhône (OSR) validé par INRAE et les mesures de granulométrie de subsurface, rendant compte de la rugosité de la rivière lors de la construction des Casiers Girardon, et de surface, rendant compte de la rugosité récente de la rivière.

Tableau 3 Coefficient de Strickler moyen le long du bief d'étude, utilisé dans le modèle

		Crue de 1856 et l'étiage de 1902-03	Crue de 1928 et l'étiage de 1945-46	Les lignes d'eau CNR
PDR	Lit mineur	39	39	34
	Lit majeure	27	22	24
DZM	Lit mineur	38	38	35
	Lit majeure	28	25	19

2.3. Les stratégies de modélisation

Dans l'optique de bien discerner l'impact des différents aménagements, trois approches ont été développées. Il s'agit ainsi d'étudier successivement (i) les changements hydrauliques du Rhône à la suite des différentes phases d'aménagement (i.e. Casiers Girardon et dérivation), (ii) l'effet des ouvrages hydrauliques (i.e. barrage, seuil et canal de dérivation) sur les caractéristiques hydrauliques au cours de la période récente et (iii) la sensibilité de l'hydraulique de la rivière à la présence de bras secondaires. La Figure 5 montre schématiquement les différents scénarios qui sont retenus pour étudier ces trois effets et chacun de ces scénarios est expliqué en détail dans la suite du rapport.

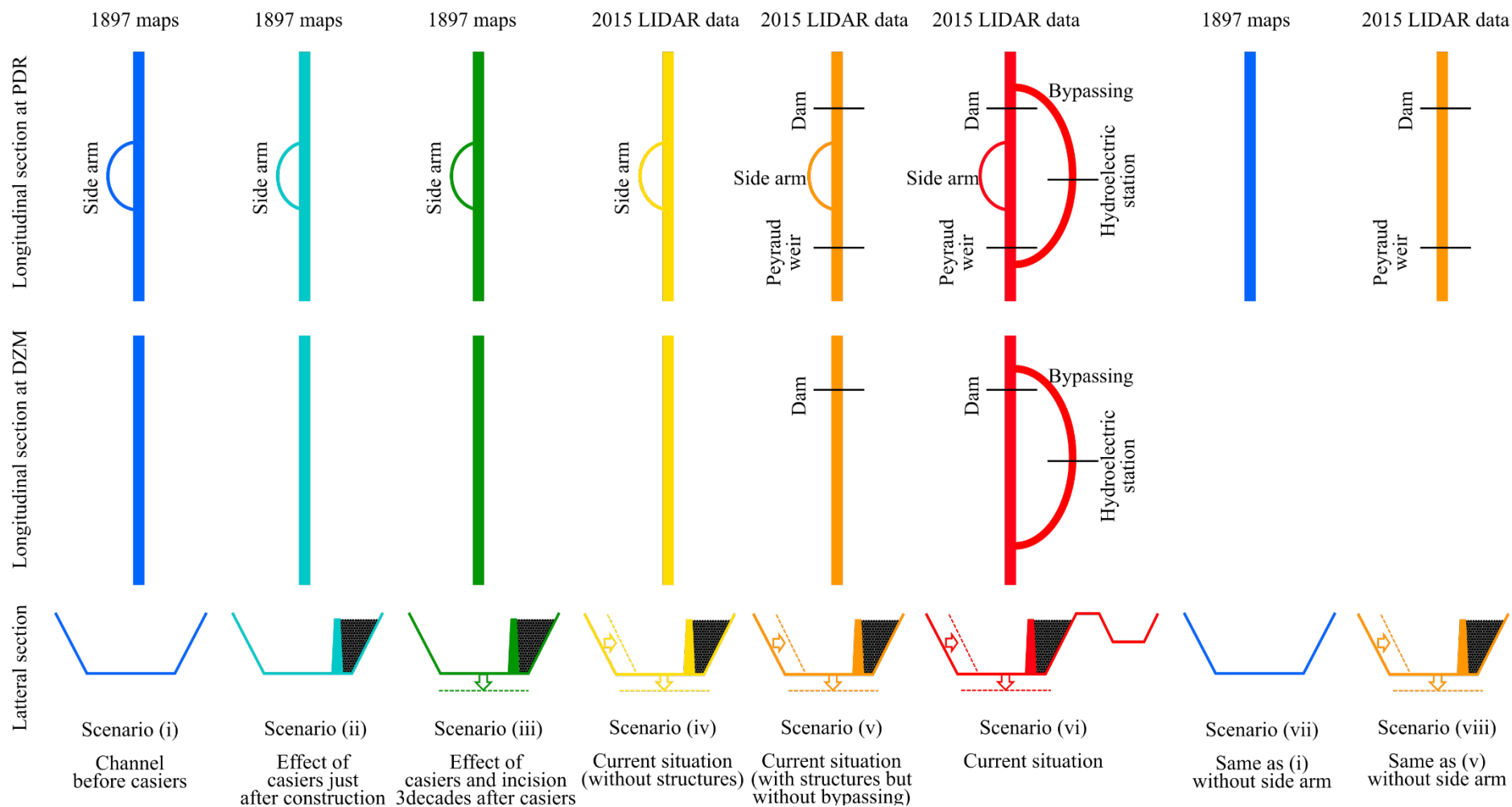


Figure 5. Vue schématique des différents scénarios appliqués à l'étude des changements hydrauliques

2.3.1. Évolution des changements hydrauliques au cours du temps

Le but de cette première approche est d'étudier l'effet des changements morphologiques (e.g. rétraction, incision ou changements de rugosité) sur les conditions hydrauliques (altitude de la ligne d'eau, profondeur et vitesse d'écoulement). Il est à noter que nous étudions les crues relativement fréquentes et non les crues extrêmes avec de grands débordements, que le modèle hydraulique OSR ne pouvait pas représenter dans son état actuel. Donc, le modèle a été exécuté pour une gamme de débits de 500 à 4700 m³/s à PDR et de 500 à 6179 m³/s à DZM dans le Rhône total, le débit maximal retenu sur chacun des RCC correspondant au débit décennal. Pour ce faire, quatre scénarios ont été comparés :

Dans le **premier scénario**, le chenal principal « avant implantation des casiers Girardon » a été considéré. Pour ce scénario, les cartes de 1897 ont été utilisées comme référence. Comme mentionné, ces cartes ont été relevées juste après la construction des digues et, par conséquent, on suppose qu'à ce stade, la zone intra-digue n'avait pas encore eu le temps de sédimenter ; que la rivière n'a pas encore subi de changement morphologique majeur. Ainsi, en supprimant manuellement les ouvrages Girardon des cartes, nous avons la géométrie du chenal pour ce scénario. Ensuite, la rugosité a été calculée sur la base de l'étiage de 1902-1903 (lit mineur) et de la crue de 1856 (lit moyen) (cf. Tableau 3). Ce modèle a ensuite été validé en utilisant les mêmes lignes d'eau que celles illustrées sur la Figure 6.

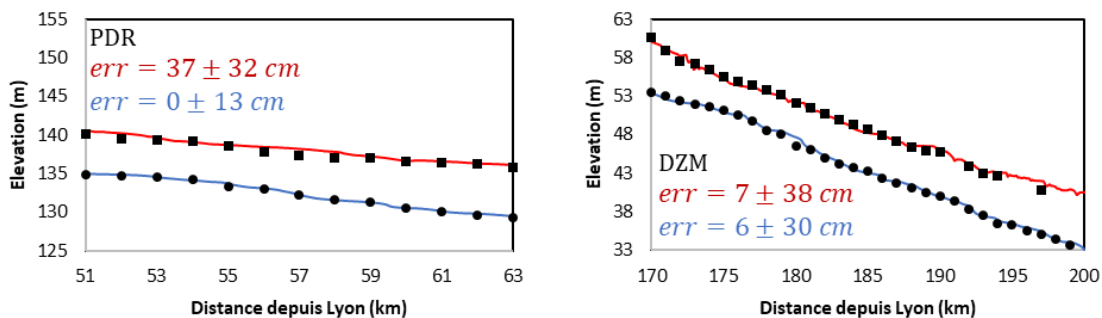


Figure 6 Validation du scénario i (avant les Casiers Girardon). Les courbes montrent les résultats du modèle qui se comparent avec l'étiage de 1902-1903 (cercles) au lit mineur et la crue de 1856 (carrés) au lit moyen.

Le **deuxième scénario** correspond à la situation « tout de suite après la construction des casiers » (voir Figure 5). Par conséquent, dans ce scénario, le seul changement a été l'ajout des casiers, sans variation du talweg et de la rugosité (cf. Tableau 3). En effet, nous ne disposons pas de ligne d'eau pour valider directement ce scénario. Ainsi, cela correspond à la condition « juste après le premier scénario » mais dans une configuration intégrant la présence des casiers. De ce fait, les conditions de validité de ce scénario sont les mêmes que le premier scénario.

Le **troisième scénario** correspond à la période entre la construction des Casiers Girardon et avant la dérivation. Les casiers ayant été construits vers 1900, ce modèle renvoie à la situation trois à quatre décennies plus tard (validation avec la crue de 1928 et l'étiage de 1945-46). Comme les digues sont représentées sur les cartes de 1897 et que les relevés sont précis, ces cartes sont utilisées pour ce scénario. Remarquons que dans ce cas de figure, trois processus majeurs doivent être pris en compte : (i) rétraction, (ii) incision et (iii) changements de rugosité du fait de la présence des ouvrages. Pour reproduire l'effet de la rétraction, la zone à l'intérieur des digues a été considérée comme une zone

morte. A noter que bien qu'il y ait encore de l'eau dans l'emprise délimitée par les digues, cette zone ne fait pas partie du chenal principal (et ce, tant que le niveau d'eau ne dépasse pas la hauteur des digues). Pour calculer l'effet de l'incision, nous comparons d'abord le niveau de l'étiage de 1902-03 et 1945-46 pour ainsi calculer le déplacement vertical de cette ligne. Comme on le voit dans le Figure 7, alors qu'il y a une incision presque homogène sur PDR, les changements verticaux de la rivière ne sont pas homogènes sur le tronçon de DZM. En effet, on observe une incision dans la première moitié du tronçon et un exhaussement dans la seconde moitié. Ces changements verticaux ont ensuite été appliqués à la géométrie à l'intérieur du lit mineur.

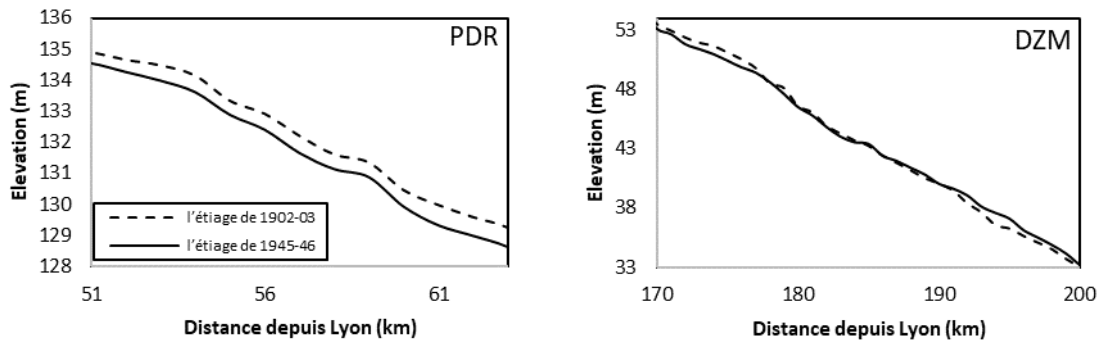


Figure 7 Comparaison entre les lignes d'eau d'étiage de 1902-03 et 1945-46 pour calculer l'incision dans le chenal principal.

Enfin, la rugosité a été calculée à partir de la ligne d'eau d'étiage de 1902-03 pour le lit mineur et de la crue de 1928 pour le lit moyen (cf. Tableau 3). Ce modèle a ensuite été validé avec les mêmes lignes d'eau que celles présentées sur la Figure 8.

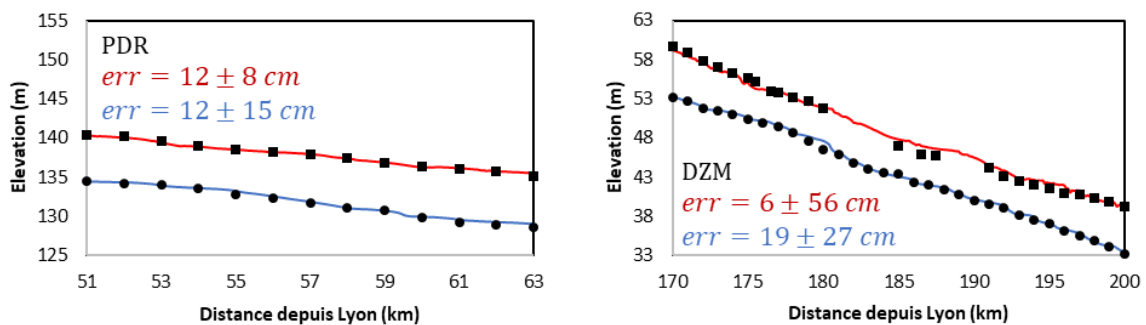


Figure 8 Validation du scénario iii (intégrant les Casiers Girardon avant la dérivation). Les courbes montrent les résultats du modèle qui se comparent à l'étiage de 1902-1903 (cercles) au lit mineur et à la crue de 1928 (carrés) au lit moyen.

Le quatrième scénario est un scénario théorique correspondant à la situation actuelle de la rivière, mais sans aucun ouvrage (c'est-à-dire barrage, seuil et canal de dérivation), (cf. Figure 5). Notez que comme ce scénario est théorique, il n'a pas été possible de le valider directement. De ce fait, la géométrie, la rugosité et les conditions de validité de ce scénario sont celles issues du cinquième scénario (situation actuelle). Celle-ci sera développée dans la section suivante.

2.3.2. Effet des ouvrages hydrauliques sur les conditions hydrauliques au cours de la période récente

Le but de cette approche est de vérifier l'effet des différents ouvrages (i.e. barrage, seuil et canal de dérivation) sur les conditions hydrauliques. Pour ce faire, la seule différence entre les différents scénarios concerne les ouvrages hydrauliques, tandis que la géométrie et la rugosité considérées demeurent les mêmes. Les scénarios qui correspondent à cette stratégie sont :

- (i) Le Rhône sans ouvrage (décrit dans la section précédente),
- (ii) Le Rhône avec des ouvrages sur le RCC (barrage amont sur les deux sites et seuil de Peyraud en aval de PDR),
- (iii) Le Rhône avec des ouvrages sur le RCC et un canal de dérivation (cf.
- (iv) Figure 5).

Pour construire la géométrie correspondant à ces scénarios, les données LIDAR ont été utilisées et les paramètres hydrauliques (rugosité et coefficient de débit) ont été calculés à partir des lignes d'eau fournies par CNR (cf. Tableau 3). C'est selon ces conditions que le cinquième scénario a été validé. Rappelons que les scénarios iv et v correspondent à des conditions théoriques et qu'il n'a donc pas été possible de les valider avec des observations.

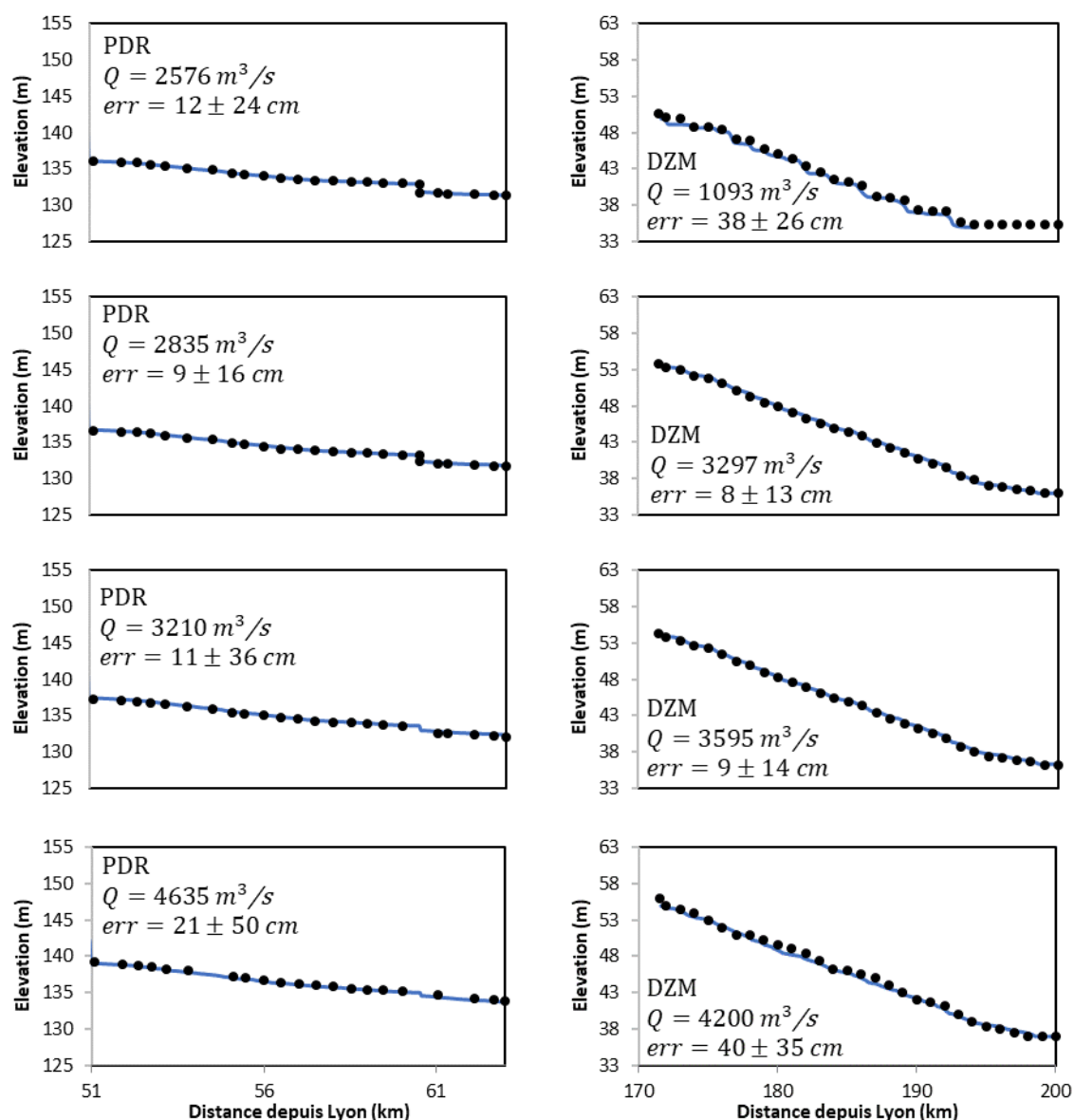


Figure 9 Validation du scénario vi (après dérivation). Les courbes montrent les résultats du modèle qui se comparent aux lignes d'eau CNR (cercles).

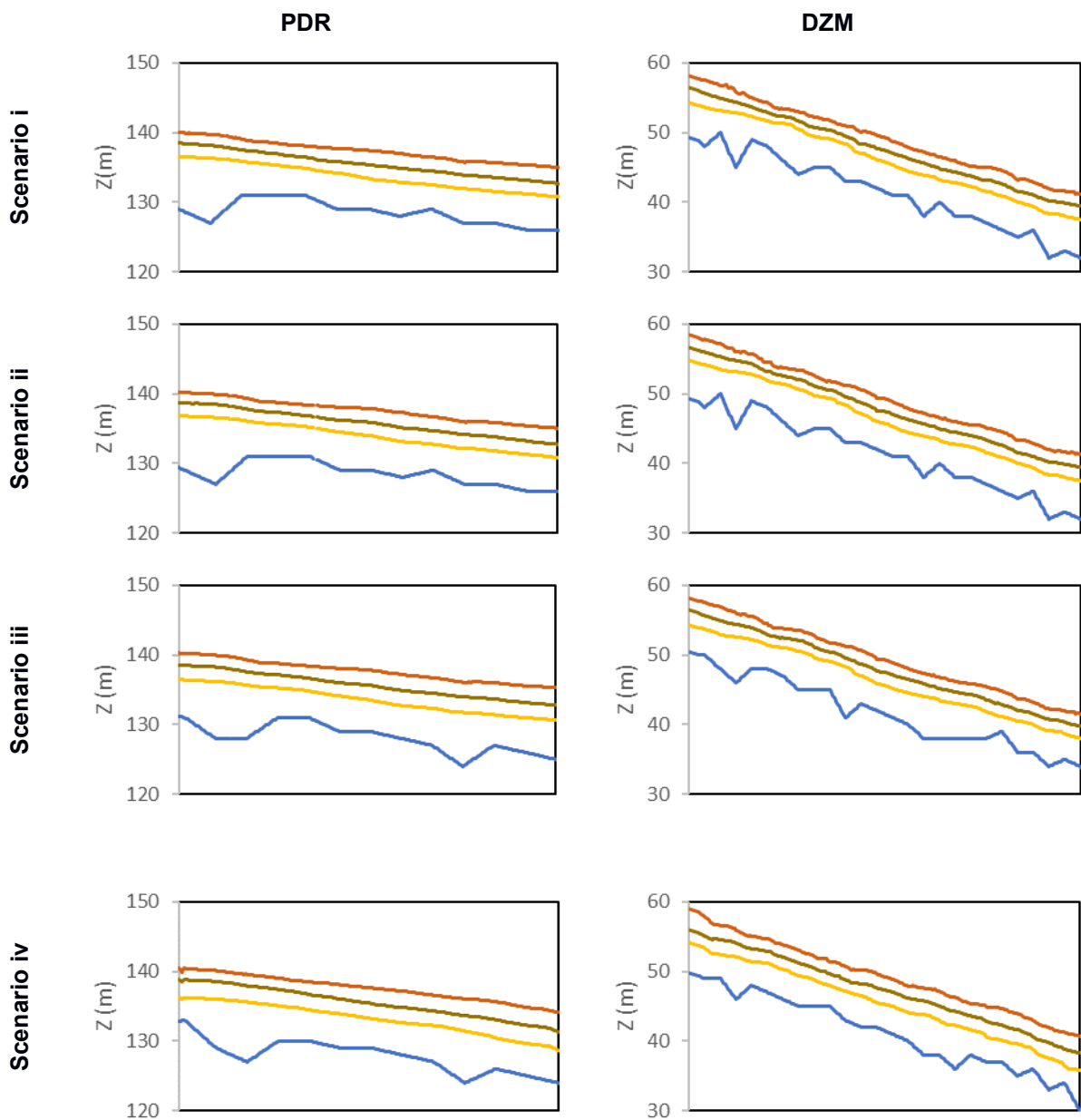
2.3.3. L'effet de la déconnexion du bras latéral

La variation de la débitance du Rhône n'est pas seulement liée au changement de sa géométrie, mais aussi à la réduction du nombre de bras. Ainsi, dans la troisième stratégie de modélisation, cet effet de déconnexion du bras latéral de la Platière a également été analysé. Pour ce faire, la rivière a été modélisée, selon quatre scénarios ; les deux premiers scénarios étaient les mêmes (i et v) et les deux autres (vii et viii) ressemblaient aux scénarios (i et v) mais sans bras latéral (cf. Figure 5).

3. RESULTATS

3.1. Les résultats initiaux

Pour les deux premières stratégies, après avoir validé les scénarios i à v, le modèle a été exécuté pour une gamme de débits dans le Rhône total de 500 à 4700 m³/s à PDR et de 500 à 6179 m³/s à DZM, le débit maximal retenu sur chacun des RCC correspondant au débit décennal afin de calculer deux paramètres hydrauliques, l'altitude de la ligne d'eau et la vitesse d'écoulement. La Figure 10 montre à titre d'exemple le profil en long de la ligne d'eau modélisé pour trois débits (Q = 1000, 2500 et 4500 m³/s).



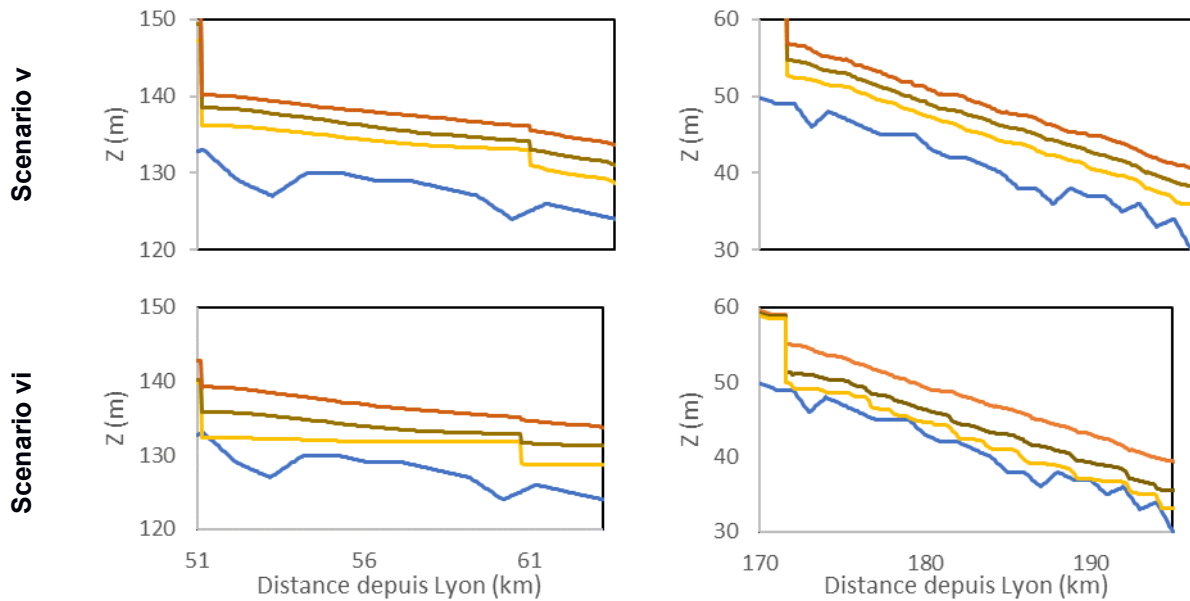


Figure 10 Modélisation de la ligne d'eau pour $Q = 1000$ (jaune), 2500 (marron) et 4500 (rouge) m^3/s avec talweg en bleu.

Nous présentons ensuite la variation moyenne de ces paramètres en fonction de la période de retour des débits, sur le continuum de chaque site étudié (cf. Figure 11). A PDR, cette valeur moyenne est calculée sur le tronçon qui s'étend du barrage au seuil (PK 51 à PK 60.5) et pour DZM sur le tronçon qui s'étend du barrage jusqu'à la confluence avec l'Ardèche (PK 171.5 à PK 191.5).

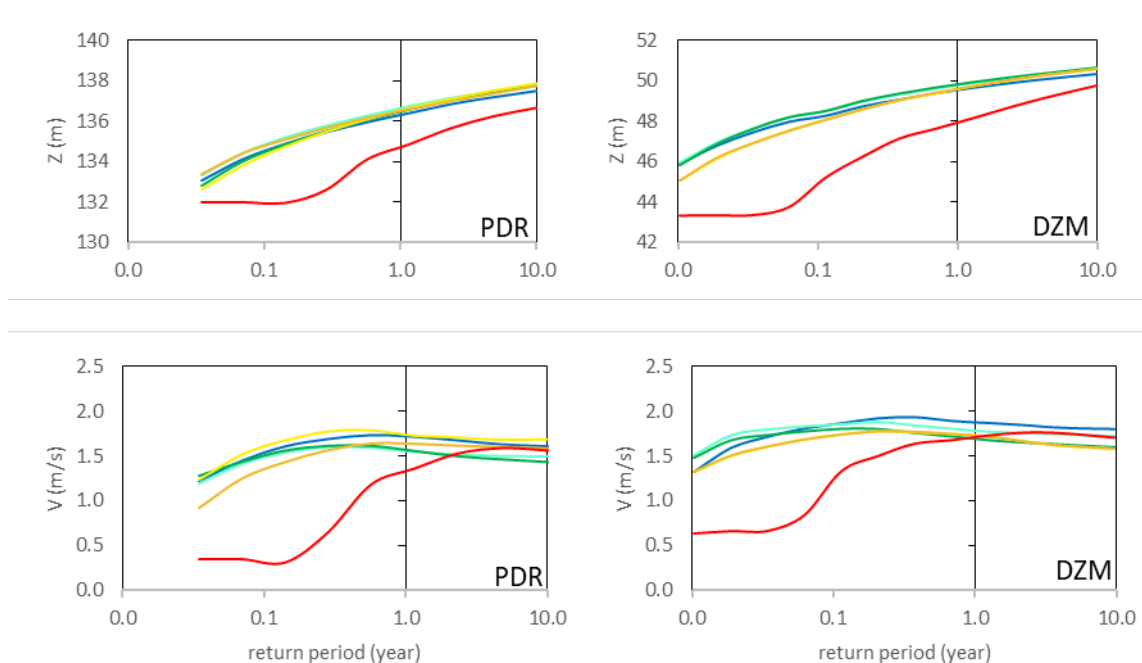


Figure 11 Variation moyenne des deux paramètres hydrauliques retenus (hauteur d'eau Z et vitesse moyenne V) en fonction de la période de retour des débits. Les couleurs correspondent aux scénarios présentés en Figure 5

Puis, pour vérifier l'évolution de ces indicateurs hydrauliques, l'état de la rivière avant l'implantation des Casiers Girardon a été considéré comme étant l'état initial. En rapport à cet état, les différences selon les scénarios ont été calculées (cf. Figure 12).

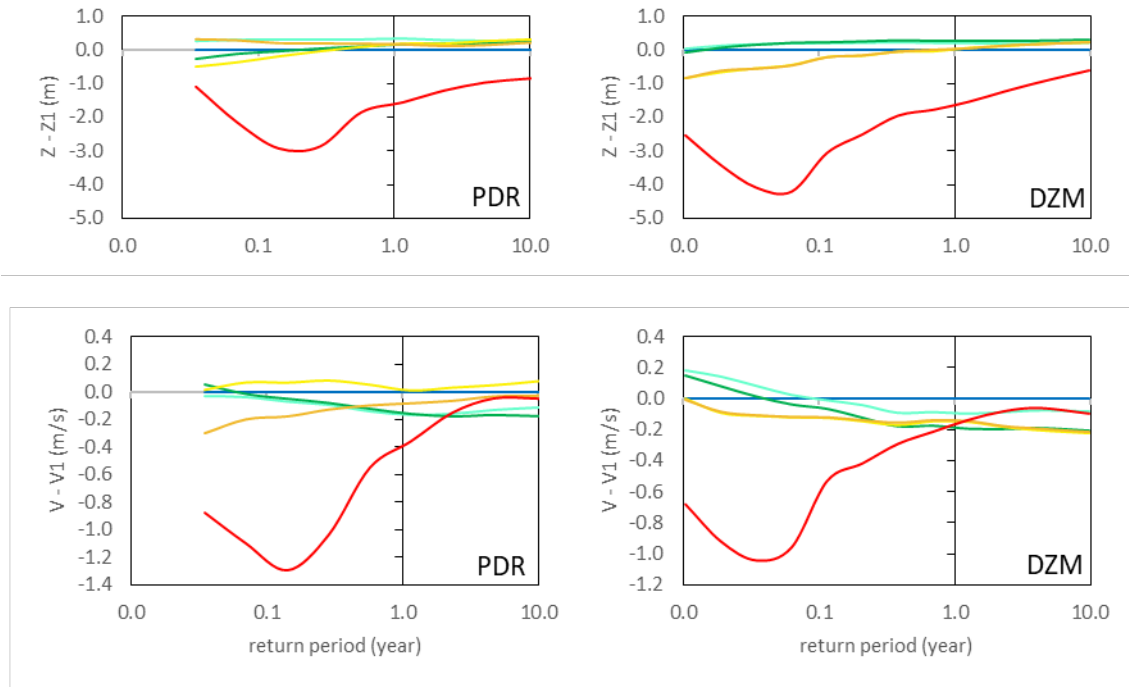


Figure 12 Variation des scénarios (ii à vi) avec le scénario (i) comme état initial. Dans ce scénario, Z1 et V1 sont respectivement l'altitude de la ligne d'eau et la vitesse moyenne. Les couleurs correspondent aux scénarios de la Figure 5

Des différences significatives d'évolution peuvent être observées entre ces scénarios (cf. Figure 12). Par exemple à DZM, au cours de la période récente (Figure 12.b, lignes jaunes, oranges et rouges), l'élévation de la ligne d'eau est généralement inférieure à la condition initiale tandis qu'à PDR s'il n'y avait pas de dérivation (Figure 12.a, lignes jaunes ou orange), la ligne d'eau serait plus proche de celle observée à l'état initial. Afin d'éviter toute erreur d'interprétation imputable à des variations du débit entre les scénarios et pour pouvoir comparer ces évolutions et les interpréter, les valeurs moyennes de tous les débits présentés en Figure 12 (de 500 à 4700 m³/s à PDR et de 500 à 6179 m³/s à DZM dans le Rhône total) pour chaque scénario ont donc été modélisées (cf. Figure 13 à Figure 15).

3.2. Evolution des conditions hydrauliques au cours de temps

Comme mentionné en section 2.3.1, notre premier objectif était d'évaluer l'évolution des conditions hydrauliques au cours de différentes périodes de temps. Pour ce faire, la Figure 13 montre l'évolution des deux principaux paramètres hydrauliques que sont **l'altitude de la ligne d'eau** et la **vitesse de l'eau**. Afin de pouvoir interpréter les changements hydrauliques, les valeurs d'incision, de rugosité et la largeur de la rivière sont également présentées.

- L'incision est le changement moyen de l'élévation du talweg pour chaque scénario par rapport au premier scénario,
- La rugosité est la moyenne du coefficient de Manning calculée sur le lit mineur et le lit moyen, normalisée par la rugosité du premier scénario,
- La largeur de la rivière est la largeur moyenne de la rivière au lit mineur, normalisée par la largeur du premier scénario.

Selon la Figure 13, dans le **deuxième scénario**, l'élévation de la ligne d'eau augmente rapidement (28 cm), ce qui souligne la réponse de la rivière aux 21 % de rétraction moyenne de la bande active suite à l'implantation des ouvrages Girardon. Cette augmentation de la profondeur d'eau entraîne également une diminution de la vitesse d'écoulement (-11 cm/s). Trois décennies après la construction des Casiers – cas du **troisième scénario** - une incision importante est observée à PDR (-80 cm). En parallèle, la ligne d'eau s'enfonce de 28 cm (dans le **deuxième scénario**) à 6 cm (dans le **troisième scénario**). Au cours du **quatrième scénario**, il y a un peu plus d'incision (-91 cm) associée à une légère diminution de l'élévation de la ligne d'eau (1 cm). Cela signifie que la profondeur de l'écoulement est presque constante de iii à iv, alors que comme on le voit, la vitesse augmente. Cette augmentation de la vitesse de iii à iv pourrait être due à la rétraction de 5 % (de -21 % à -26 %) de iii à iv (cf. Figure 13).

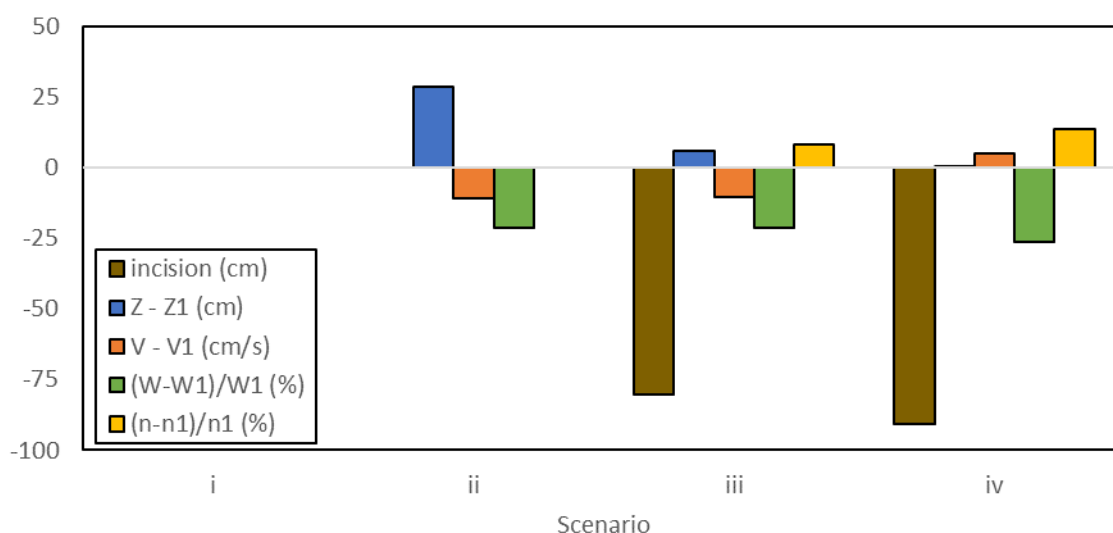


Figure 13 Évolution générale des paramètres principaux observés à PDR au cours des différentes périodes de temps : i) avant les Casiers Girardon, ii) tout de suite après les Casiers Girardon iii) entre les Casiers et la dérivation et iv) après la dérivation.

A DZM (Figure 14), au cours du **deuxième scénario**, la rétraction de -23% tout de suite après la construction des casiers semble jouer directement sur l'élévation de la ligne d'eau (18 cm). En revanche, pour le **troisième scénario**, un exhaussement de 4 cm est associé à une augmentation de 3 cm de l'altitude de la ligne l'eau pour la gamme de débits étudiés. Cela signifie que la profondeur d'écoulement ne change pas (presque 18 cm pour les scénarios ii et iii), tandis qu'une diminution de 9 cm/s de la vitesse d'écoulement est observée. Cela pourrait être lié à la légère augmentation de la rugosité. Pour le **quatrième scénario**, en parallèle avec l'incision de 28 cm, l'élévation de la ligne d'eau diminue de 19 cm, ce qui signifie que la profondeur de l'eau augmente de 9 cm par rapport au premier scénario (elle a diminué de 9 cm par rapport aux scénarios ii, iii). Cette augmentation de la profondeur de l'eau ainsi que l'augmentation de la rugosité par rapport au premier scénario, induisent une augmentation de la vitesse d'écoulement.

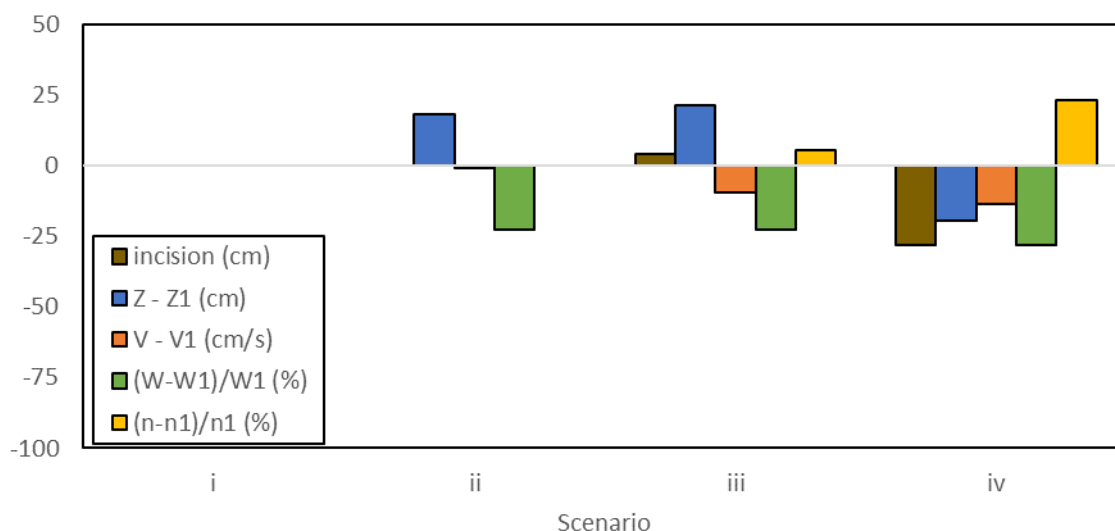


Figure 14 Évolution générale des paramètres hydrauliques principaux observés à DZM au cours de différentes périodes de temps : i) avant les Casiers Girardon, ii) tout de suite après les Casiers Girardon iii) entre les Casiers et la dérivation et iv) après la dérivation.

3.3. Effet des ouvrages dans la situation actuelle

Notre deuxième objectif était d'évaluer l'effet des ouvrages sur les conditions hydrauliques actuelles. Pour ce faire, la Figure 15 présente l'évolution générale de ces deux paramètres principaux, pour les scénarios iv, v et vi, tous issus de la géométrie actuelle du fleuve, mais avec des conditions d'aménagement différentes.

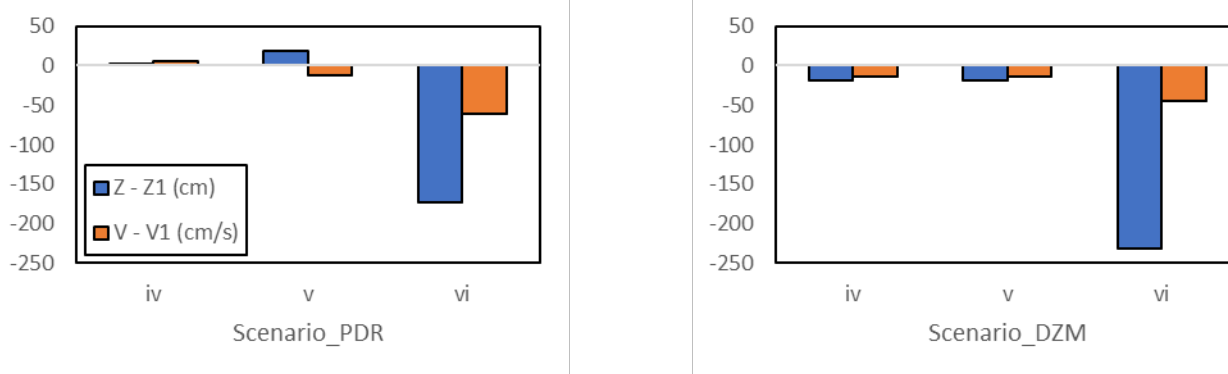


Figure 15 Comparaison des deux paramètres principaux (z et v) pour 3 scénarios avec et sans ouvrages hydrauliques sur le RCC et le canal de dérivation à PDR (à gauche) et DZM (à droite).

La comparaison entre les scénarios iv, v sur les deux sites révèle que tandis qu'à DZM la différence d'élévation de la ligne d'eau et de vitesse d'écoulement était négligeable, à PDR de iv à v, l'élévation de la ligne d'eau augmente d'environ 20 cm, ce qui entraîne une diminution de la vitesse d'écoulement d'environ 15 cm/s. Un paramètre clé de cette grande différence à PDR (entre les scénarios iv, v) pourrait être associé à la présence du seuil de Peyraud. Celui-ci est situé dans la partie aval du secteur de PDR et semble être un paramètre structurant de l'hydraulique d'écoulement en amont.

L'effet le plus significatif correspond à celui du canal de dérivation (scénario vi). Celui-ci explique une diminution de 1,7 à 2,3 m de la profondeur d'eau ; ce qui est plus que logique puisqu'une grande partie du débit est dérivée vers ce canal (cf. Tableau 1).

3.4. Effet hydraulique du bras de la Platière

Le dernier objectif de cette étude était de vérifier l'effet de la déconnexion du bras secondaire présent sur PDR. Pour comprendre cet effet, deux paramètres ont été étudiés, l'altitude de la ligne d'eau et la part du débit d'eau qui est dévié vers le bras secondaire (cf. Figure 16).

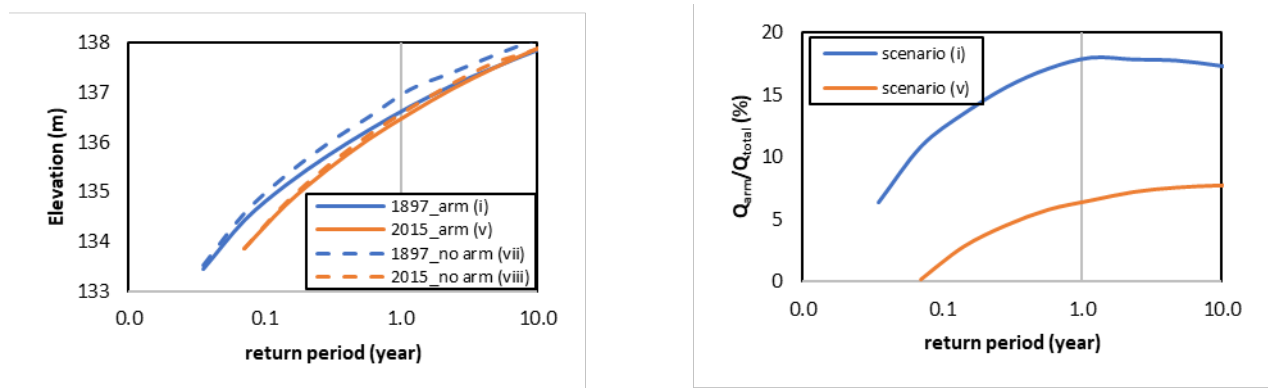


Figure 16 Comparaison entre les scénarios (i, v) canal avec le bras secondaire et les scénarios (vii, viii) canal sans le bras secondaire. a) L'altitude moyenne de la ligne d'eau, prise le long du site d'étude, en fonction de la période de retour des débits dans le canal principal et le bras secondaire. b) La part du débit d'eau dérivée vers le bras secondaire (en %).

En comparant les lignes en pointillés et en traits pleins (Figure 16), on constate qu'avant l'implantation des casiers Girardon, la présence du bras latéral a davantage d'effet sur l'altitude de la ligne d'eau que dans les conditions actuelles. De plus, comme on le voit sur la Figure 16.b, il y avait beaucoup plus de débit dans le bras en 1897 que maintenant et lorsque le débit est inférieur à 1000 m³/s (~Q0.1), le bras latéral est aujourd'hui déconnecté alors qu'avant les Casiers Girardon ce bras était connecté pour des débits inférieurs à 500 m³/s (~Q0.03).

4. DISCUSSION

Nos résultats montrent que les différentes phases d'aménagement sur le Rhône entraînent des changements à la fois morphologiques (e.g. rugosité, incision) et hydrauliques (e.g. profondeur de l'eau, vitesse) d'intensité différente sur les deux sites (PDR et DZM).

Comme mentionné dans la section 2.2, nous disposons de données de granulométrie de surface et de subsurface sur une vingtaine de points. La Figure 17 témoigne ainsi de l'évolution de la rugosité de la rivière au cours de différentes périodes en lien avec ces observations de terrain. Pour calculer la rugosité, deux équations ont été utilisées : Strickler ($n = d_{50}^{1/6}/21.1$) et Meyer-Peter & Muller ($n = d_{90}^{1/6}/26$). Sur lequel n est le coefficient de Manning, et d_{50} et d_{90} correspondent aux 50ème et 90ème percentiles de la distribution des tailles des particules (axe-B). Comme on le voit, les valeurs utilisées dans le modèle sont dans la plage des mesures de terrain, ce qui atteste des valeurs retenues dans le modèle. Sur la base de ces chiffres, sur le bief de PDR, il y avait un changement léger mais constant de la rugosité qui s'observe sur toute la période étudiée. A DZM, les changements de rugosité induits par la dérivation ont été plus importants que ceux induits par l'implantation des casiers Girardon.

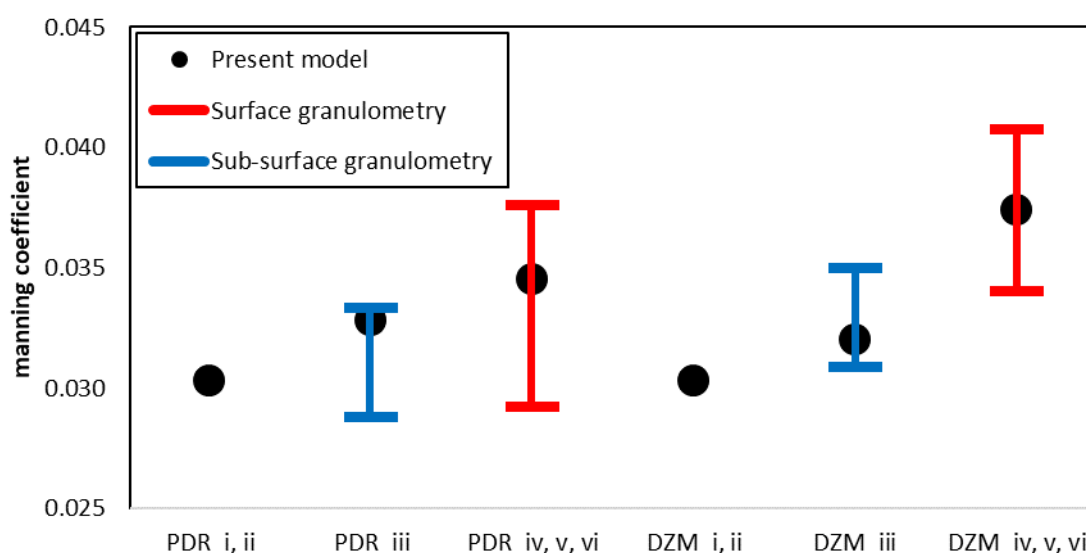


Figure 17 La rugosité change au cours des différentes périodes. Les points montrent les valeurs qui sont utilisées dans le modèle et les barres d'erreur montrent la plage des valeurs de rugosité en fonction des valeurs de granulométrie mesurées sur le terrain. On suppose que la granulométrie de surface correspond à la rugosité récente et que les valeurs de sub-surface se rapportent aux périodes plus anciennes, avant la dérivation.

Suite à la seconde phase d'aménagement, on observe un changement plus marqué de rugosité à DZM. Or, comme le montre la Figure 18, le taux d'atterrissement des casiers augmente dans les deux sites mais ce changement a été plus marqué à DZM qu'à PDR. Or, cet atterrissement est caractérisé par une phase de végétalisation qui a pour conséquence d'augmenter la rugosité des marges alluviales. Dès lors, ceci pourrait expliquer l'augmentation plus marquée de la rugosité à DZM. Il est à noter que cet effet jouerait plutôt sur le Manning du lit moyen comme on le voit dans le Tableau 3.

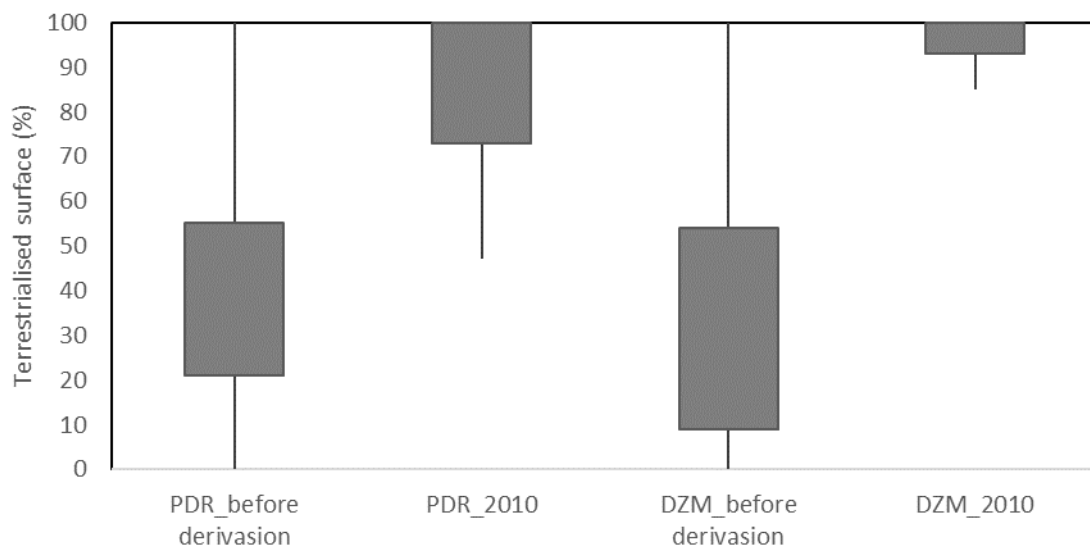


Figure 18 Variation de la surface atterrie des Casiers avant et après la dérivation

Entre outre, les mesures de terrain et les photos aériennes viennent appuyer les résultats du modèle. En effet, Seignemartin (2020) montre que suite à la seconde phase d'aménagement du fleuve à PDR (dérivation), on observe fréquemment au sein des casiers des patrons d'atterrissement à motif concentrique semi-aquatique soulignant une bonne fréquence de connexion maintenant des zones encore en eau dans les casiers. Or, grâce au modèle hydraulique (Figure 20.a), on constate que l'altitude de la ligne d'eau reste quasi constante (augmentation de moins de 0.1 m) entre la situation précédant Girardon et celle actuelle. Ainsi, à PDR, un grand nombre de casiers présentent des points de connexions hydrologiques favorisés par des points bas (brèches au niveau des digues) et par cette ligne d'eau qui ne s'est peu ou pas enfoncée. De ce fait, des flux d'eau peuvent rentrer à l'intérieur des casiers, provoquant de l'affouillement et favorisant ainsi, la formation de mouilles de surcreusement situées au centre du motif de sédimentation concentrique (figure 19). Ainsi, la connectivité hydrologique accrue des casiers de PDR explique la forte occurrence et le maintien de ces entités encore aquatiques (par rapport à d'autres secteurs où la ligne d'eau s'est enfoncée).



Figure 19 : exemple de points bas dans les digues et motifs concentriques à PDR (Source : Seignemartin, 2020)

A noter que globalement, les pourcentages d'atterrissement dans les casiers, sur la période « après la dérivation-2000 », n'évoluent pas beaucoup à PDR (Figure 18), ce qui suggère que sur ce site, les conditions de connectivité hydrologique des marges permettent l'entretien d'une mosaïque de zones aquatiques et terrestres. En outre, PDR présente des champs d'épis dont l'altitude relative est encore faible en 2010 (Seignemartin, 2020). La dérivation du gros du débit a exposé des surfaces auparavant en eau mais, les marges sur PDR étant « relativement plus basses » sont plus « dynamiques », leur fréquence de submersion est plus élevée dans les ouvrages Girardon. En outre, les champs d'épis sont assez fortement terrestres mais restent très « dynamiques » morphologiquement (par exemple, sur la Figure 20.b, c, rive gauche).

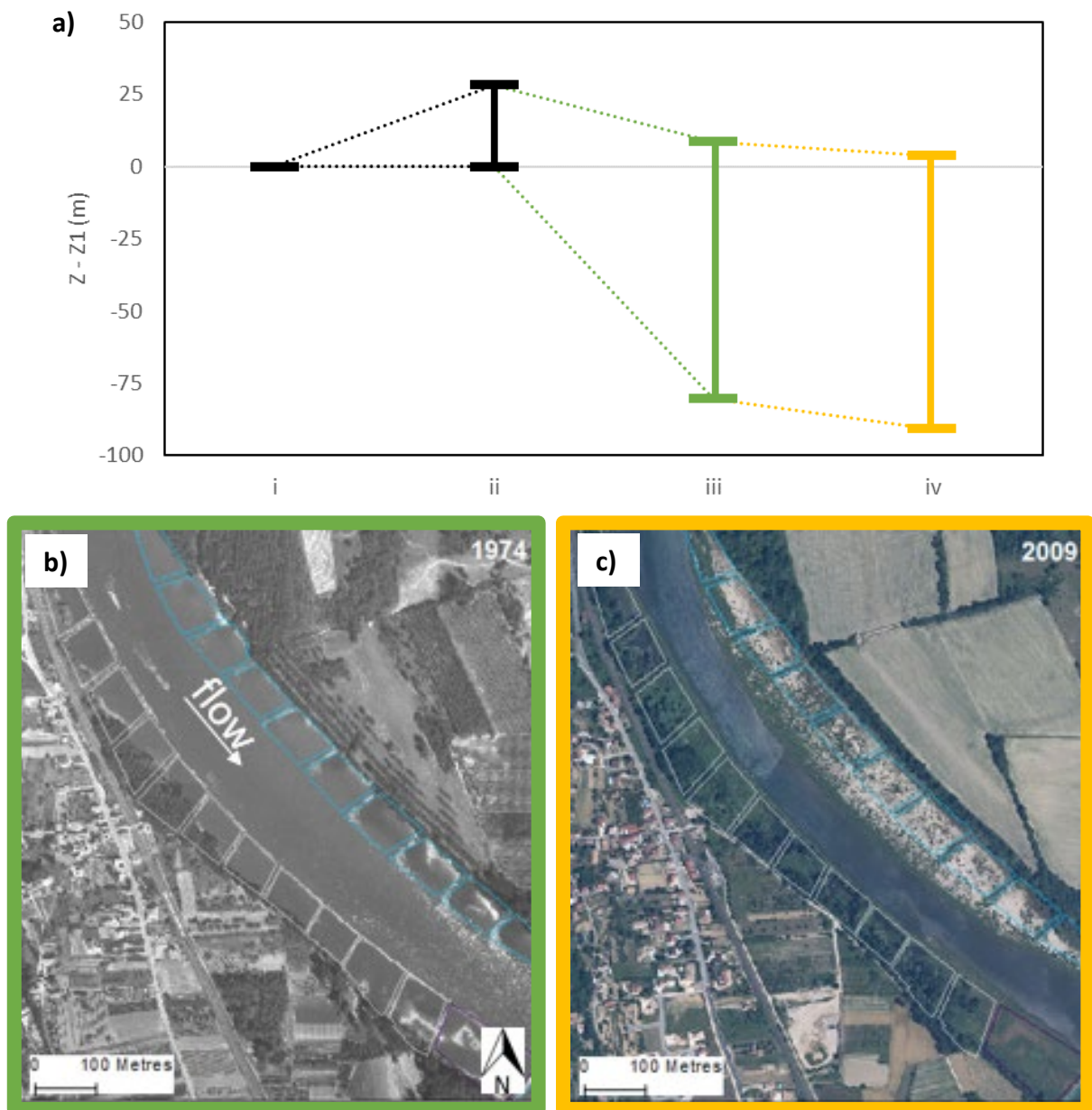


Figure 20 Un petit changement d'altitude de la ligne d'eau à PDR dû à la dérivation (a) est à l'origine de changements morphologiques dans le chenal qui sont visibles sur les images aériennes avant (b) et après (c) la dérivation. Le bas des barres d'erreur en (a) montre l'incision moyenne et le haut montre l'altitude de l'eau, tous deux comparés à la condition initiale (scénario i) ; par conséquent, la hauteur de chaque barre d'erreur représente la variation de la profondeur de l'eau par rapport au premier scénario. En (b, c), les lignes bleues indiquent les champs ouverts, les lignes grises indiquent les champs fermés à PDR (PK 53).

Alors que PDR est un tronçon déjà bien artificialisé avec ses 8.6 hectares par kilomètre linéaire de surface corrigée, DZM est encore plus fortement artificialisé avec 12 hectares par kilomètre linéaire de surface corrigée et il a la particularité d'avoir des casiers globalement plus grands que les autres tronçons (Figure 21. b, c). Selon Seignemartin (2020) lors de la deuxième phase d'aménagement (dérivation) à DZM, les patrons d'atterrissement les plus fréquents dans les casiers sont les patrons latéraux, complexes et concentriques. De plus, DZM est un tronçon qui présente des casiers avec une altitude relative élevée. Cela explique sans doute les conditions hydrauliques observées dans le scénario ii (Figure 21. a) dans lequel l'altitude relative de l'eau augmente de 0.3 m. Après dérivation, elle diminue ensuite de 0.5 m (à -20 cm de niveau). DZM est un secteur qui se distingue par des casiers très déconnectés alors qu'à contrario, certains de ses champs d'épis (dits « noyés ») sont au niveau de l'eau, très connectés et très peu atterris (par exemple, sur la Figure 21, b, c, rive droite). Certains de ses champs d'épis sont, au contraire, beaucoup moins submergés et beaucoup plus terrestres. Ainsi, la diversité d'implantation des champs d'épis influence leur connectivité hydraulique et in fine leur état d'atterrissement.

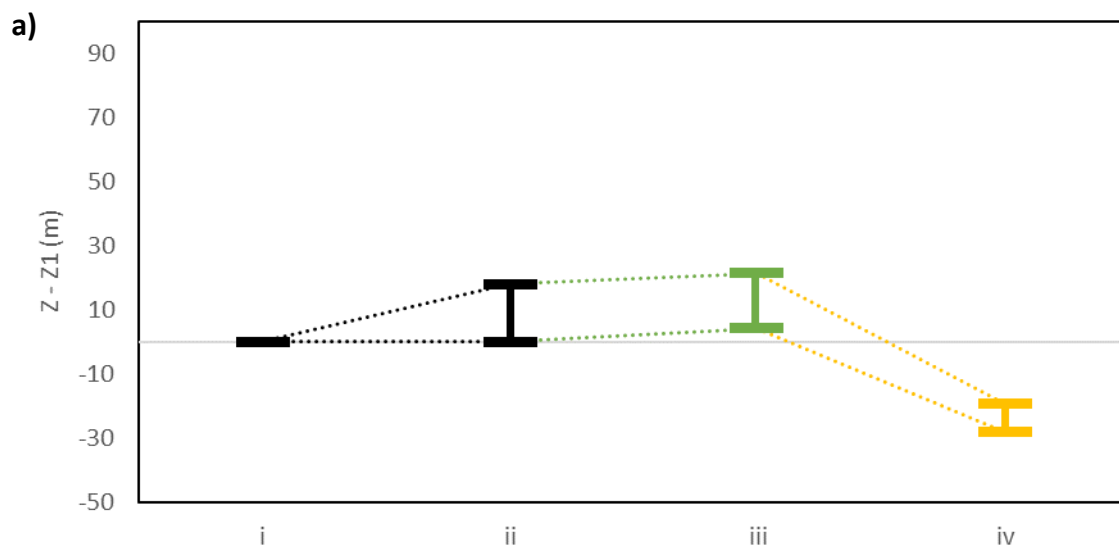


Figure 21 Un relèvement de l'altitude de la ligne d'eau après la construction des casiers (a) maintient leur connexion avec le chenal et réduit le processus d'atterrissement (b). La baisse du niveau d'eau du scénario iii à iv (a) se traduit par un fort atterrissement après dérivation (c). Le bas du rectangle en (a) montre l'incision moyenne et le haut montre l'altitude de l'eau, tous deux comparés à la condition initiale (scénario i) ; par conséquent, la hauteur de chaque barre d'erreur représente la variation de la profondeur de l'eau par rapport au premier scénario. En (b, c), les lignes bleues indiquent les champs ouverts, les lignes grises indiquent les champs fermés à DZM (PK 181,5)

En plus de l'atterrissement des casiers, la dérivation affecte également la capacité de débordement de la rivière. Comme cela a déjà été expliqué, dans les conditions normales, seule une partie du débit arrive au RCC, la majeure partie du débit étant dérivée vers le canal de dérivation. Dans ce cadre (scénario vi), la profondeur de l'eau et la vitesse d'écoulement diminuent considérablement dans la rivière. Alors qu'à l'état initial, il y avait un débordement pour $Q \cong 2000 \frac{m^3}{s}$, cette valeur augmente jusqu'à $Q \cong 3500 \frac{m^3}{s}$ dans la situation actuelle. La fréquence des débordements est ainsi considérablement réduite pour les crues fréquentes.

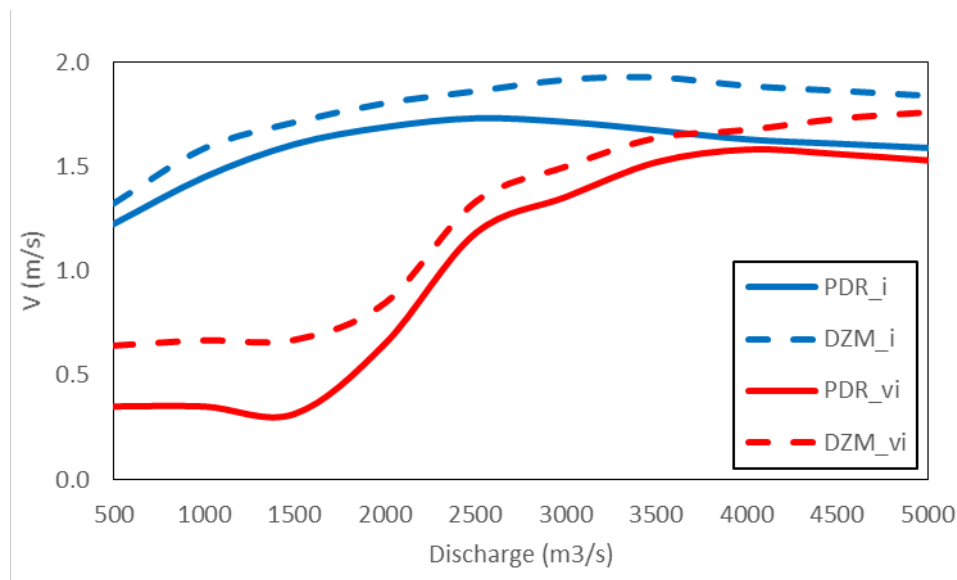


Figure 22 Comparaison de la vitesse moyenne d'écoulement, prise le long du site d'étude, à l'état initial (avant les Casiers Girardon) avec l'état récent (après dérivation).

5. CONCLUSION

Ce rapport est consacré à l'analyse hydraulique du Rhône sur deux sites clés (Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon) et leur réponse à deux phases importantes d'aménagement (i.e. Casiers Girardon et dérivation). Pour disposer de modèles fiables, nous avons collecté des données provenant de différentes sources, comme les données LIDAR, les cartes de 1891 et 1897, la granulométrie de surface et de sub-surface collectée sur le terrain, le modèle hydraulique 1D validé d'INRAE et différentes lignes d'eau (1856, 1928 crues, 1902, 1945 l'étiages et les lignes d'eau de la CNR) qui ont servi à valider les modèles. Nous avons ensuite développé huit scénarios différents, correspondant à quatre situations distinctes : tout de suite avant la construction des Casiers Girardon, tout de suite après la construction des Casiers, trois décennies après la construction des Casiers (mais avant dérivation), et situation la plus récente après dérivation.

Tous ces scénarios décrivant la situation hydraulique du fleuve à différentes dates ont été utilisés pour répondre à trois questions principales :

- (i) Quels ont été les changements hydrauliques du Rhône à la suite des différentes phases d'aménagement (i.e. Casiers Girardon et dérivation) ?

Pour répondre à cette question, nous avons considéré le chenal avant, tout de suite après, et trois décennies après la construction des Casiers Girardon, et l'état récent après la dérivation.

- (ii) Quel était l'effet des ouvrages hydrauliques (qui correspondent au barrage, seuil et canal de dérivation) sur les caractéristiques hydrauliques du chenal au cours de la période récente (géométrie et rugosité récentes) ?

Pour répondre à cette question, le chenal a été modélisé en considérant différentes conditions d'aménagement : sans aucun ouvrage, seulement avec des ouvrages de correction sur le vieux Rhône mais sans dérivation et pour finir, avec des ouvrages de correction sur le vieux Rhône mais dans ce cas-ci, avec dérivation.

- (iii) Quelle est la sensibilité de la débitance du chenal principal avec et sans bras secondaires ?

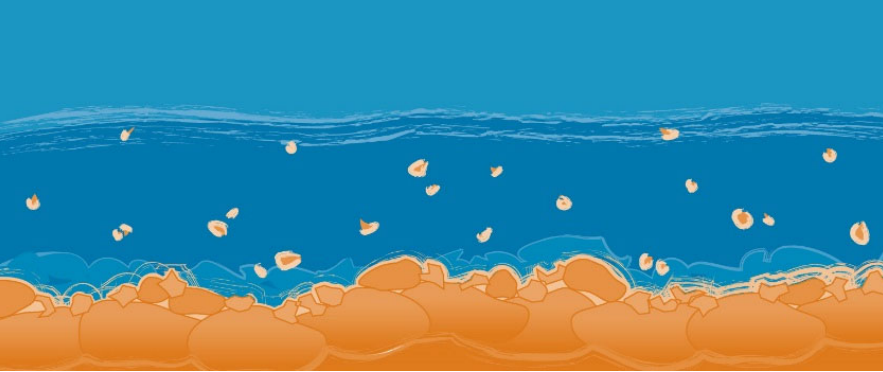
Pour répondre à cette question, nous avons considéré le bras latéral de la Platière (bras en rive droite sur le secteur de Péage-de-Roussillon) comme un bief séparé et étudié l'effet de la présence ce bras avant la mise en place des Casiers ainsi que dans les conditions actuelles.

Les résultats montrent un comportement différent sur chacun des sites en réponse aux deux phases d'aménagement (casiers Girardon et dérivation). À PDR, après une augmentation du niveau de la ligne d'eau et une diminution de la vitesse en réponse à la rétraction de la rivière due aux casiers, une incision importante est observée ensuite. Cette incision atténue alors le relèvement de la ligne d'eau. À DZM, le relèvement de la ligne d'eau qui suit la rétraction du lit due aux casiers ne change pas significativement la bathymétrie de la rivière lors de cette phase d'aménagement. Ce n'est qu'après la deuxième phase d'aménagement qu'une incision est alors observée dans le talweg. Celle-ci atténue alors le relèvement de la ligne d'eau observé antérieurement. De plus, alors qu'à PDR il y avait une augmentation constante de la rugosité, à DZM le changement de rugosité a été observé uniquement lors de la deuxième phase d'aménagement en raison du processus de végétalisation qui a suivi la dérivation. L'analyse de ces deux cas souligne que l'évolution morphologique du lit du Rhône et les aménagements ne semblent pas avoir significativement modifié les lignes d'eau pour la crue décennale ou des crues plus courantes encore à DZM et PDR. La dérivation d'une partie du débit dans le canal hydroélectrique réduit en outre très significativement les fréquences d'inondation pour les crues de Q5 (DZM) à Q10 (PDR).

Pour la suite, il est important d'analyser d'autres sites comme Pierre-Bénite ou Baix Le Logis Neuf et le cas de Beaucaire pour d'abord voir s'il y a des similitudes ou des différences entre les différents sites en amont ou en aval du Rhône et vérifier ensuite l'effet des changements morphologiques sur la propagation des crues tout le long du Rhône.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bravard, J.P., 2010. Discontinuities in braided patterns: The River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training. *Geomorphology* 117 (3), 219–233.
- Fruget, J.F., 1992. Ecology of the Lower Rhône following 200 years of human influence: a review. *Regulated Rivers* 7, 233–246.
- Guerrin, J., 2015. A floodplain restoration project on the River Rhône (France): analysing challenges to its implementation. *Reg. Environ. Chang.* 15 (3), 559–568.
- Olivier, J.M., Carre, G., Lamouroux, N., Dole-Olivier, M.J., Malard, F., Bravard, J.P., et al., 2009. The Rhône River basin. In: Tockner, K., Uehlinger, U., Robinson, C.T. (Eds.), *Rivers of Europe*. Academic Press, Amsterdam, pp. 247–295.
- Parrot, E., 2015. Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. Lyon 3 University (Ph.D. Thesis).
- Provansal, M., Raccasi, G., Monaco, M., Robresco, S., Dufour, S., 2012. La réhabilitation des marges fluviales, quel intérêt, quelles contraintes ? Le cas des annexes fluviales du Rhône aval. *Méditerranée* 118, 85–94.
- Räpple, B., 2018. Sedimentation patterns and riparian vegetation characteristics in novel ecosystems on the Rhône River, France. A comparative approach to identify drivers and evaluate ecological potentials. Lyon University (Ecole Normale Supérieure de Lyon) (Ph.D. Thesis).
- Riquier, J., 2015. Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français. Structures spatiales et dynamiques temporelles des patrons et des processus, pérennité et recommandations opérationnelles. Lyon 2 University (Ph.D. Thesis).
- Roditis, J.C., Pont, D., 1993. Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône a l'amont immédiat de son delta. *Méditerranée* 3 (4), 5–18.
- Tena, A., Piégay, H., Seignemartin, G., Barra, A., Berger, J. F., Mourier, B., & Winiarski, T., 2020. Cumulative effects of channel correction and regulation on floodplain terrestrialisation patterns and connectivity. *Geomorphology*, 354, 107034.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan
Rhône
Saône

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

agence
de l'eau
RHÔNE MEDITERRANÉE
CORSE
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE
pour le Rhône
et la Saône
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CNR

EDF

La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS
Environnement
Vie Société

cerege
CENTRE EUROPÉEN
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

MENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio
Mediterranean Institute
of Oceanography

ZA
Zone
Atelier
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

ohm
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

LabEx
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org