



HAL
open science

Modélisation numérique hydro-sédimentaire 1D d'une rivière tidale : le cas de l'Adour maritime

Stéphanie Décanis

► **To cite this version:**

Stéphanie Décanis. Modélisation numérique hydro-sédimentaire 1D d'une rivière tidale: le cas de l'Adour maritime. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03232214

HAL Id: dumas-03232214

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03232214v1>

Submitted on 21 May 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.

Copyright



Travail de fin d'études

pour l'obtention du titre d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État en double-diplôme avec l'université Lyon 1 et l'École Centrale de Lyon

Année universitaire 2019-2020

Voie d'approfondissement : Gestion des cours d'eau, des voies navigables et du littoral
Master Mécanique – M2 parcours Mécanique des fluides et énergétique

Soutenu le 02 Septembre 2020

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : M. Bernard CLEMENT
- Maître de TFE : M. Benoît CAMENEN
- Jury de Master : M. Lionel LE PENVEN
- Experte : Mme. Violaine DUGUE

Par

Stéphanie DECANIS

Modélisation numérique hydro-sédimentaire 1D d'une rivière tidale : le cas de l'Adour maritime.

**Organisme d'accueil : INRAE
En partenariat avec : DREAL Nouvelle-Aquitaine**



Notice Analytique

AUTEUR

Nom	Stéphanie
Prénom	Décanis

ORGANISME D'ACCUEIL

Nom de l'organisme et localité	INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement), Lyon (69)
Nom du tuteur	Benoît CAMENEN

ANALYSE DU TFE

Titre	Modélisation numérique hydro-sédimentaire 1D d'une rivière tidale : le cas de l'Adour maritime
Title	1D hydro-sedimentary numerical modelling of a tidal river: the case of the Adour maritime
Résumé	L'estuaire de l'Adour est une zone urbanisée regroupant enjeux humains, économiques et environnementaux. La marée et ses courants y rencontrent le débit fluvial de l'Adour. Le produit de ces forçages a pour effet la remise en suspension des sédiments présents dans l'estuaire, ce qui peut entraîner l'apparition d'un bouchon vaseux. D'autre part, les crues de l'Adour et de la Nive (un de ses affluents) ont des conséquences néfastes sur cette zone. Ce travail repose sur le développement d'un modèle numérique hydro-sédimentaire 1D permettant de mieux comprendre et appréhender ces phénomènes.
Summary	The Adour estuary is an urbanized area with human, economic and environmental stakes. The tide meets the river flow of the Adour. The result of confronting these forcing is a re-suspension of the sediments present in the estuary, which can lead to the appearance of high concentration values. On the other hand, floods of Adour and Nive (one of its tributaries) have negative consequences on this area. This work is based on the development of an 1D numerical hydro-sedimentary model to improve the understanding and forecast of the phenomena.
Mots clés	Estuaire, modélisation hydraulique, crues, marée, transport sédimentaire
Key words	Estuary, hydraulic modelling, flood, tide, sediment transport
Termes géographiques	Estuaire de l'Adour ; Bayonne ; Pyrénées-Atlantiques ; Landes ; Sud-Ouest de la France

COLLATION

	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de ref biblio.
	80	4	19

Remerciements

Je remercie tout d'abord les membres de mon jury de soutenance, se déroulant le 2 septembre 2019 :

- M. BERNARD Clément, président de jury
- M. LE PENVEN Lionel, jury de Master
- M. CAMENEN Benoît, maître de TFE
- Mme. DUGUE Violaine, experte

J'aimerais remercier en particulier certaines personnes qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire, effectué lors de mon stage de fin d'études à INRAE à Lyon.

Tout d'abord je souhaite remercier mes trois encadrants qui ont rendu tout cela possible. Benoît Camenen qui a encadré mon TFE pendant toute ma période de stage. Je vous remercie pour votre aide et les nombreuses connaissances que vous m'avez apporté. Jean-Baptiste Faure qui fut mon « référent MAGE ». Merci pour votre patience et les multiples conseils que vous avez donné. Je souhaite également remercier Laurent Dieval, mon « référent SPC » auprès duquel j'ai pu obtenir de nombreuses données. Je vous remercie pour votre réactivité, votre implication et votre disponibilité. Je vous remercie tous les trois pour m'avoir permis d'effectuer mon stage dans les meilleures conditions possibles malgré cette période toute particulière que nous avons connu.

De manière plus large, je souhaite remercier toute l'équipe de l'unité Riverly du site lyonnais d'INRAE qui malgré des circonstances compliquées ont su très bien m'accueillir et m'intégrer.

Enfin je souhaite remercier toutes les personnes, qui, de près ou de loin ont rendu ce travail possible.

Sommaire

Notice Analytique	2
Remerciements	3
Introduction.....	8
1. Généralités	10
1.1 Notions sur les estuaires	10
1.2 Notions sur les marées	11
1.3 Le transport sédimentaire	12
1.4 Le risque inondation et « SPC ».....	14
1.5 Bouchon vaseux.....	15
1.6 La prise en compte du changement climatique	15
2. L'Adour et son estuaire : « l'Adour maritime »	16
2.1 Présentation général de l'estuaire	16
2.2 L'anthropisation de l'Adour.....	18
2.3 Caractérisation de son estuaire.....	18
2.4 Les enjeux sur l'Adour maritime.....	19
2.4.1 Le risque inondation.....	19
2.4.2 La qualité de l'eau de l'Adour maritime	20
3. Modélisation hydraulique de l'Adour maritime.....	22
3.1 Modélisation hydraulique 1D avec le code de calcul Mage	22
3.1.1 Equations et formules	22
3.1.2 Equations des casiers	23
3.1.3 Les spécificités de MAGE	24
3.2 Construction du modèle de l'Adour pour la modélisation hydraulique	25
3.2.1 Présentation de la méthode	25
3.2.2 Contours du modèle	25
3.2.3 Données de géométrie	26
3.2.4 Données hydrauliques (débits, hauteurs d'eau ...).	27
3.3 Premier modèle – Modèle AS (Adour simple).....	30
3.4 Modèles avancés avec casiers	38
3.4.4 Comparaison des vitesses modélisées	54
3.5 Conclusion	55
4. Modélisation du transport sédimentaire sur la partie aval de l'estuaire de l'Adour	57
4.1 Présentation du logiciel Adis-TS	57
4.2 Construction du modèle de l'Adour pour le transport solide	60
4.2.1 Présentation de la méthode.....	60

4.2.2 Géométrie du modèle et données hydrauliques	60
4.2.3 Données de concentration en MES	60
4.3 Les résultats et comparaison.....	69
4.3.1 Episode de faibles débit et marnage.....	69
4.3.2 Episode de fort marnage et fort débit.....	71
4.3.3 Episode de fort marnage et faible débit fluvial	71
4.4 Conclusion générale et discussion.....	72
5. Conclusion générale	73
Références :	74
ANNEXES :	76

Table des illustrations

Figure 1 Les différents types de transport solide. Source : GERMAIN Antoine (2008).....	12
Figure 2 Bassin versant de l'Adour (source : Cahier géographique, Adour, 1996, Comité de Bassin Adour-Garonne)	17
Figure 3 Les principaux affluents de l'Adour	18
Figure 4 Schéma de fonctionnement d'un casier sur MAGE. Source J.B Faure 2019	23
Figure 5 Localisation des nœuds, des biefs et des seuils	26
Figure 6 Limnigramme de 64 jours (oct-déc 2019) à la station Convergent.....	27
Figure 7 Hydrogrammes servant de conditions limites aux modélisations.	28
Figure 8 Modèle Adour simple Source : Pamhyr.....	30
Figure 9 Simulations et observations à la station de Lesseps. Figure (a) Période de 64 jours (oct-déc 2019) ; Figure (b) Période du 11 au 16 novembre	31
Figure 10 Simulations et observations à la station d'Urt. Figure (a) : Période de 64 jours (oct-déc 2019) ; Figure (b) : Période du 11 au 16 décembre 2019.....	32
Figure 11 Simulations et observations à la station de Peyrehorade. Figure (a) : Période de 64 jours (oct-déc 2019) ; Figure (b) : Période du 11 au 16 décembre 2019	33
Figure 12 Simulations et observations à la station de Pont-Blanc. Figure (a) Période de 64 jours (oct-déc 2019) ; Figure (b) : Période du 11 au 16 décembre 2019	34
Figure 13 Simulations et observations à la station de Villefranque. Figure (a) Période de 64 jours (oct-déc 2019) ; Figure (b) : Période du 11 au 16 décembre 2019	35
Figure 14 Localisation des barthes sur la Nive, zone hachurée en jaune. Carré jaune : zoom pour la figure 15. Trait orange : localisation du profil topographique.	38
Figure 15 Profil en travers, localisation présentée par une barre verte sur la figure 14. Source : Geoportail.....	39
Figure 16 Exemple de réseau hydrographique de la Plaine d'Ansot, barthe répertoriée par une étoile rouge sur la figure 13. Source : Geoportail	39
Figure 17 Localisation des barthes étudiées sur l'aval de la Nive. Source : Capture d'écran issue du site Geoportail.....	40
Figure 18 Répartitions des casiers.....	41
Figure 19 Modèle AC	42
Figure 20 Résultats des modèles AS et AC pour la crue de décembre 2019 Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque.....	43
Figure 21 Résultats pour les modèles AC, AC casiers x2, AC casiers x5 et les observations. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	45
Figure 22 Résultats pour les modèles AC, AC profondeur 40 et les observations. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	46
Figure 23 Résultats pour les modèles AC, AC grands canaux et les observations pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	47
Figure 24 Résultats pour les modèles AC, AC Strickler 35, AC Strickler 50 et les observations pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	48
Figure 25 Modèle ACL	49
Figure 26 Résultats des modèles AS, AC et ACL pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	50
Figure 27 Résultats des modèles ACL, ACL casiers x2 et ACL casiers x5 pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	52
Figure 28 Résultats des modèles ACL et ACL grands canaux et des observations pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	52

Figure 29 Résultats des modèles ACL, ACL Strickler 35, ACL Strickler 50 et les observations pour la crue de décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	53
Figure 30 Résultats du modèles ACL optimisé et observations pour la période du 11 au 16 décembre 2019. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque.	54
Figure 31 Vitesses pour les modèles AS, AC, ACL et ACL optimisés. Figure (a) : Station de Pont-Blanc ; Figure (b) : Station de Villefranque	55
Figure 32 Résultats des modèles Mascaret, AS, AC, ACL, ACL optimisé et des observations sur la période du 11 au 16 septembre 2019.....	56
Figure 33 Localisation des stations de mesures du réseau MESsAGe et des stations de mesures du réseau Vigicrues les plus proches. Source fond de carte : Geoportail.....	61
Figure 34 Extraction des mesures d'hauteur d'eau, de vitesse et de concentration en MES du travail de S.Defontaine. Figure (a) : Episode du 28 sept. 2017 ; Figure (b) : Episode du 12 juin 2018 ; Figure (c) : Episode du 25 sept. 2018	63
Figure 35 Graphiques représentant les limnigrammes de Convergent et Dax ainsi que l'hydrogramme de Dax et la concentration mesurée à Saint-Vincent-de-Paul sur la période du 31/03/2017 au 09/04/2017.....	64
Figure 36 Graphiques représentant les limnigrammes de Convergent et Orthez ainsi que l'hydrogramme d'Orthez et la concentration mesurée à Labatut sur la période du 05/10/2017 au 14/10/2017.....	65
Figure 37 Exemple de pic de concentration en MES enregistré à la station Saint-Vincent-de-Paul.....	65
Figure 38 Données de l'épisode du 28 septembre 2017.....	66
Figure 39 Données autour de l'évènement du 12 juin 2018. Période du 11 au 13 juin 2018.	67
Figure 40 Données autour de l'évènement du 25 septembre 2018. Période du 23 au 27 septembre 2018.....	68
Figure 41 Résultats de la modélisation et mesures. Evènement du 28 sept. 2017.	69
Figure 42 Résultats pour l'optimisation du modèle et observations. Evènement du 28 sept. 2017. ...	70
Figure 43 Résultats pour l'optimisation du modèle et observations. Evènement du 12 juin 2017.	71
Figure 44 Résultats pour l'optimisation du modèle et observations. Evènement du 25 sept. 2018. ...	72
Tableau 1 Exemple de loi de surface $S(Z)$ à entrer sur MAGE.....	24
Tableau 2 Récapitulatif de la géométrie des biefs	26
Tableau 3 Récapitulatif des statistiques sur les données manquantes aux chroniques.....	30
Tableau 4 Analyse statistique sur les écarts entre les modèles et les observations pour l'ensemble de la chronique de 64 j. Tableau (a) : AS et les observations ; Tableau (b) : Mascaret et les observations	36
Tableau 5 Analyse statistique sur les écarts entre les modèles et les observations pour la période du 11 au 16 déc. 2019. Tableau (a) : AS et les observations ; Tableau (b) : Mascaret et les observations	37
Tableau 6 Listing des surfaces des casiers étudiés. Source : Geoportail.....	41
Tableau 7 Comparaison des écarts entre les modèles AS, AC et les observations	43
Tableau 8 Analyse statistique pour la période du 11 au 16 décembre.....	44
Tableau 9 Comparaison des résultats ACL avec les observations.....	50
Tableau 10 Analyse statistique centrée sur l'épisode du 11 au 16 décembre 2019.....	51
Tableau 11 Analyse statistiques des écarts entre le modèle ACL optimisé et les observations. Figure (a) : Sur l'ensemble de la chronique ; Figure (b) : Sur la période du 11 au 16 décembre 2019.....	54
Tableau 13 Coefficients de l'équation Ws . Source : Camenen, 2007.....	58
Tableau 14 Récapitulatif des paramètres de chaque sédiment étudié.	68
Tableau 15 Répartition des sédiments en fonction des nœuds amonts.....	70

Introduction

L'eau est une ressource indispensable à toute vie sur Terre. Inhérente à l'équilibre environnementale, elle est l'objet de nombreux enjeux et tout particulièrement l'eau douce qui par ses interactions avec l'environnement, la faune, la flore ou l'humain, est plus précieuse.

Pour son développement, l'homme en a multiplié les usages. L'eau lui est devenue essentielle autant pour sa santé que pour son développement économique : prélèvement pour l'activité industrielle ou pour l'irrigation des terres par exemple, énergie hydroélectrique, rejet des stations d'épurations etc.

L'un des grands enjeux de notre siècle est de trouver un équilibre entre la gestion de ces usages, afin de sécuriser la ressource et prévenir des effets du dérèglement climatique dessus. En effet, le dérèglement climatique touchera tout particulièrement le cycle de l'eau. La ressource sera impactée tant du point de vue de sa qualité, sa quantité que des phénomènes qui lui sont associés.

L'eau est responsable de phénomènes naturels pouvant avoir des impacts négatifs sur l'Homme. Notamment les crues qui ont des conséquences néfastes à la fois sur la sécurité et la santé humaine, l'économie et l'environnement. Même si des outils existent afin d'en assurer une prévision à courte échelle de temps, il reste cependant des améliorations à faire pour mieux les anticiper et améliorer les prévisions. Pour le moment, les conséquences du changement climatique sont mal évaluées dans ce domaine. Cependant, on sait que les outils doivent s'adapter au changement climatique qui aura des effets sur la périodicité et l'intensité des événements météorologiques extrêmes comme les crues et les inondations.

Ce projet de fin d'études s'intéresse à l'Adour, fleuve du Sud-Ouest de la France et plus précisément sa partie dite maritime, c'est-à-dire la partie du fleuve influencée par la marée ainsi que ses affluents. Cette zone, comprenant principalement l'estuaire de l'Adour est sujette à de nombreux forçages (marée, débit fluvial ...) et présente des enjeux quant à la qualité de l'eau.

Les aires urbaines localisées sur son bassin versant (BV) se situent essentiellement le long de son linéaire et surtout en aval par la présence des villes de Bayonne et d'Anglet. Entrant en crue plusieurs fois par an, l'Adour est un fleuve surveillé par les autorités compétentes de l'Etat. Le Service de Prévision des Crues Adour-Garonne (SPC-AG) est responsable sur une importante partie de son bassin versant d'anticiper les pics de crue, de quantifier, prévenir et alerter sur ces événements.

D'autre part, l'estuaire est une zone de dépôt et de remise en suspension des sédiments. Les sédiments qui y convergent, viennent de l'ensemble du bassin versant de l'Adour et peuvent être pollués, ce qui influence la qualité des eaux. La remise en suspension des sédiments évolue en fonction des forçages, ainsi dans certaines conditions on peut voir l'apparition d'un bouchon vaseux dans les estuaires. Cela correspond à une importante concentration en MES dans l'eau, responsable d'anoxie et de baisse de la qualité environnemental du bassin estuarien.

Le changement climatique tend à modifier la dynamique hydro-sédimentaire des estuaires : les débits fluviaux varient, les périodes d'étiage se rallongent, la salinité se propage plus en amont dans l'estuaire ce qui peut impacter la quantité d'eau potable par exemple.

Le point commun de ces enjeux est l'étude du comportement de l'eau, notamment son comportement hydraulique. Cependant peu d'études et recherches sont menées à ce propos sur l'Adour, les scientifiques privilégiant l'étude des grands estuaires français (Loire, Seine ...). Ainsi se pose la problématique :

Comment développer la connaissance des phénomènes naturels sur l'estuaire de l'Adour au travers d'outils de modélisation numérique afin d'y améliorer la gestion des risques inondations et la gestion de la qualité de l'eau ?

La modélisation numérique hydraulique et hydro-sédimentaire permet de prévoir et anticiper les comportements de l'Adour et la dynamique des sédiments dans son estuaire. Il existe dès à présent des modèles numériques permettant de modéliser le comportement hydraulique de l'Adour, utilisés par le SPC -AG pour la prévision de crue.

J'ai été accueillie au sein d'INRAE, à Lyon, dans l'unité Riverly pour une durée de cinq mois. La partie hydraulique de mon travail a été réalisée pour la DREAL Nouvelle-Aquitaine et particulièrement pour l'usage du SPC- AG qui réalise ses prévisions de crues à partir du logiciel Mascaret.

Contrairement aux habitudes du service, la modélisation numérique hydraulique ne s'effectuera pas avec ce logiciel mais avec le code de calcul MAGE développé par INRAE. L'intégration de ce nouvel outil dans la gestion du risque inondation permet d'améliorer les prévisions des crues et amène un autre support dans la prise de décision. La modélisation du transport sédimentaire s'effectuera quant à elle à l'aide du logiciel Adis-TS également développé par INRAE.

La méthodologie suivie pendant ce stage peut être résumée en quatre étapes. Il a fallu dans un premier temps effectuer un travail de bibliographie pour définir au mieux les termes de mon travail. Des recherches spécifiques ont été menées pour permettre une analyse du territoire de l'estuaire de l'Adour. Des données d'observations (hauteurs d'eau, débits) et numériques (logiciel Mascaret) ont été récoltées auprès du SPC pour le montage et le calage du modèle sur MAGE. Une fois le modèle réalisé et présentant des résultats satisfaisants, j'ai pu passer à la dernière étape de mon travail en étudiant la dynamique sédimentaire sur le territoire. Pour comparer les résultats obtenus, j'ai récolté des données de concentration en MES auprès du réseau MESsAGe et me suis reposée sur des données d'observations mesurées pour la production d'une thèse.

Dans un premier temps, ce mémoire s'appuiera sur une mise en contexte et une présentation générale des principes généraux et des dynamiques observables sur le territoire (estuarienne, tidale ...), pour ensuite se concentrer sur une description de l'Adour maritime, notre zone d'étude. Nous poursuivrons sur le montage du modèle numérique hydraulique en évaluant ses limites et ses capacités d'optimisation à l'aide des données d'observation et de simulation sur Mascaret, rendues disponibles par le SPC. Puis nous exposerons l'étude sédimentaire réalisée dont les résultats seront comparés à des données de terrain. En conclusion, nous nous appuierons sur l'ensemble des résultats et discussions pour répondre à la problématique posée.

1. Généralités

1.1 Notions sur les estuaires

Le mot estuaire a pour racine le mot latin « aestus » qui signifie marée. L'influence de celle-ci y est importante et l'on peut, de prime abord, définir un estuaire comme une « embouchure fluviale sur une mer ouverte, formant une indentation profonde dans le tracé littoral [...] et qui est soumise à l'onde de marée. » (Larousse, 2020).

Les définitions scientifiques de l'estuaire varient selon le domaine scientifique qui s'y intéresse et aucune définition générale n'a réellement été fixée par la communauté scientifique. Ainsi, en écologie on le définit comme un écosystème spécifique agissant comme une interface d'échanges entre le domaine continental et océanique (Romaña, 2001). Étant donné sa position, l'estuaire possède des fonctionnalités qui lui sont propres. C'est par exemple un habitat unique pour beaucoup d'espèces, une réserve de nourriture pour certains oiseaux à marée basse, une zone d'alevinage pour certaines espèces marines. Par ces enjeux environnementaux, il existe aujourd'hui plusieurs législations européennes (directives cadre sur l'eau, sur les eaux de baignade, sur la stratégie marine) qui les protègent (Defontaine, 2019).

Une définition géomorphologique présente un estuaire comme une plaine fluviale ouverte sur l'océan. Il se compose d'un bras de mer qui pénètre dans la vallée fluviale jusqu'à une limite amont de propagation de la marée. Avec cette définition, on peut séparer l'estuaire en trois parties (Romaña, 2001), dont les limites varient principalement en fonction du débit du cours d'eau et du marnage de la marée :

- L'estuaire marin ou bas estuaire est une zone où les eaux sont toujours salées.
- L'estuaire moyen est soumis à de nombreux mélanges eau douce/eau salée.
- L'estuaire fluvial ou haut estuaire est soumis à la marée où les eaux sont douces.

On peut également utiliser la définition de Cameron et Pritchard (1963) : "un estuaire est un volume semi-fermé d'eau côtière librement connecté avec la mer ouverte, du moins par intermittence, et au sein duquel la salinité est d'une manière mesurable différente de celle de l'eau de mer adjacente" (traduit de l'anglais). Dans l'estuaire se rencontrent les eaux douces et saumâtres continentales et les eaux salées marines. C'est principalement la différence de salinité qui entraîne l'apparition d'un gradient de densité qui influence très largement la dynamique estuarienne. D'autres forçages comme l'action de l'onde de marée sur la morphologie de l'estuaire ainsi que les actions du vent, de la rotation de la terre et des vagues jouent un rôle dans la dynamique estuarienne (Defontaine, 2019).

Il existe plusieurs manières de classifier les estuaires. Une des façons les plus répandues est de s'intéresser au gradient de salinité créé par l'apport d'un volume d'eau douce et d'un volume d'eau salée. De cette manière on peut définir (Alver-Alcante, 2018) :

- **Les estuaires à coin salé.** Le volume d'eau douce y est dominant par rapport au prisme de la marée, c'est-à-dire la quantité d'eau salée qui circule dans l'estuaire entre la marée haute et la marée basse. L'eau douce progresse dans l'estuaire en fine couche surplombant de l'eau salée. Un mélange des eaux se trouve coincé dans une couche mince de transition entre la phase d'eau douce et la phase d'eau de salinité océanique au fond de l'estuaire. La différence de salinité est forte et le gradient est resserré dans la zone de transition. Dans cette configuration il existe un point nodal où disparaissent les courants créés par la marée, il s'agit de la limite maximale de pénétration de la salinité. La circulation estuarienne y est

bidimensionnelle : du fond de l'estuaire vers sa surface avec la diminution de la salinité due au mélange des eaux et de l'amont de l'estuaire vers l'océan. La circulation estuarienne varie cependant avec d'autres paramètres que sont : débit fluvial, précipitations, évaporation, marnage de la marée, force de du vent, topographie de l'estuaire.

- Dans les **estuaires fortement stratifiés**, les volumes d'eau douce et salée sont comparables. Un important cisaillement des vitesses à l'interface eau douce/eau salée génère des ondes internes. Ces ondes déferlent dans la couche supérieure plus douce, ce qui cause un entrainement vertical turbulent de l'eau salée vers le haut de la colonne d'eau. La salinité de la couche supérieure de l'eau augmente, l'eau salée plus au fond de la colonne reste à une salinité maximale.
- Dans les **estuaires partiellement mélangés**, la marée est plus importante que le débit fluvial. Le phénomène de cisaillement et ses conséquences décrits pour les estuaires fortement stratifiés est ici valable sur l'entièreté de la colonne d'eau.
- **Les estuaires verticalement bien mélangés** : le débit fluvial est faible par rapport à la marée. Il y a un mélange complet dans la colonne d'eau et pas de stratification horizontale. On observe uniquement un gradient de salinité verticale.
- **Les estuaires inverses** : l'apport en eau douce négligeable, cela est généralement le cas dans les régions qui connaissent de fortes évaporations. Près du rivage la salinité a alors tendance à augmenter et créer des zones hypersalines.
- **Les estuaires intermittents**, changent de régime en fonction des précipitations qui sont variables sur le bassin versant.

1.2 Notions sur les marées

La marée est un phénomène naturel causé par l'action gravitationnelle des astres, principalement de la Lune et du Soleil, et de la force centrifuge de la Terre. Elle correspond à l'oscillation périodique du niveau de la mer en tout point de la surface de la Terre. Ce qui implique un déplacement des masses d'eau et un phénomène de courant de marée. Bien que le signal et le cycle de la marée puissent varier selon la localisation, on remarque des variations communes de la hauteur d'eau :

- Le flux/montant correspond à une mer montante et le flot est le courant de marée qui en est généré.
- L'étalement de pleine mer correspond à la période du signal pendant laquelle la hauteur d'eau est maximale.
- Le reflux/perdant correspond à une mer descendante et le jusant est le courant de marée associé.

Le marnage correspond à la différence d'hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer consécutives. Le flot et le jusant sont en décalage temporel avec les marées montantes et descendantes. Les ondes de marée varient en fonction du temps, leur amplitude peut varier selon le cycle de la marée (14.5 j), selon un cycle de 28 jours ... L'onde de marée dépend également de la forme de l'estuaire et de la rugosité de son lit : un rétrécissement de l'estuaire a tendance à augmenter sa force et hauteur, les frottements du lit vont diminuer son énergie cinétique (Defontaine, 2019).

On peut classer les estuaires selon le marnage de la marée qu'ils subissent :

- Microtidal, si le marnage est inférieur à 2 m. Le forçage des vagues et du vent a un fort impact sur ce type d'estuaire.
- Mésotidal, si le marnage est compris entre 2 et 4 m. Le forçage de la marée est prédominant.
- Macrotidal, si le marnage est supérieur à 4 m. Le forçage de la marée est encore plus important. Il s'agit généralement d'embouchure large et de cours d'eau en entonnoir. Des zones intertidales peuvent se développer au milieu de l'estuaire.

En France, la marée est semi-diurne et on peut considérer le signal de la marée comme une onde sinusoïdale : il existe une symétrie entre le flot et le jusant.

1.3 Le transport sédimentaire

Les estuaires sont des pièges à sédiments du fait de l'antagonisme des courants qui s'y déplacent. Il est important de définir le mécanisme de transport solide afin de comprendre les phénomènes qui se développent dans les estuaires, comme le phénomène du bouchon vaseux qui correspond à la formation d'une concentration très forte en sédiments dans une partie localisée de l'estuaire.

Dans un premier temps, on peut distinguer trois grandes classes de sédiments, différenciés par leur diamètre et leur densité : les argiles (diamètre inférieur à $63 \mu\text{m}$), les sables (diamètre compris entre $63 \mu\text{m}$ et 2mm) et les graviers (diamètre supérieur à 2mm) (Defontaine, 2019). Chaque classe de sédiments a un type de transport solide privilégié (Alliau, 2020) (Figure 1) :

- Le transport par suspension : les sédiments se trouvent dans toute la colonne d'eau et circulent avec le courant. Ce transport concerne les particules fines (argiles, limons ou sables fins jusqu'à $20 \mu\text{m}$).
- Le transport par charriage qui comprend le glissement, la saltation et le roulement, les sédiments se déplacent le long du lit. Ce transport concerne les particules plus grossières.

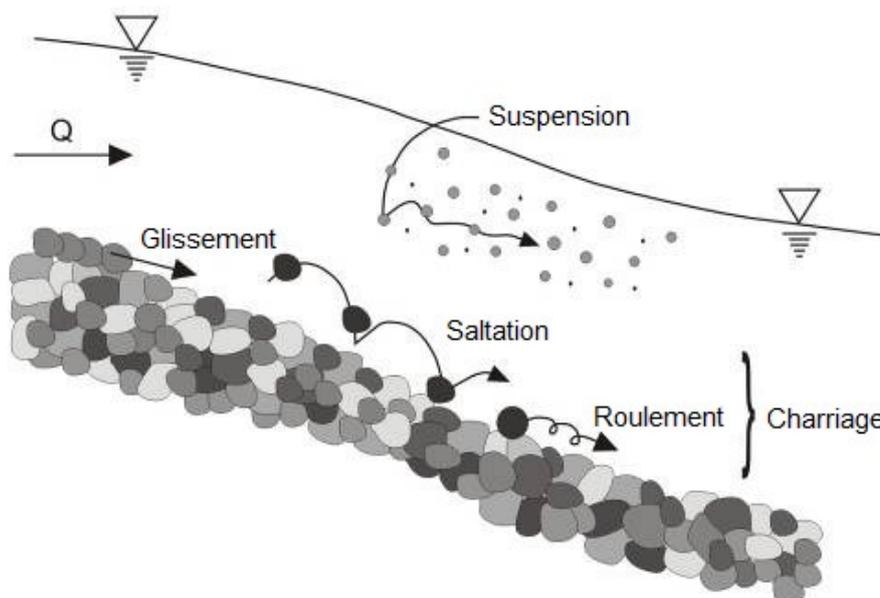


Figure 1 Les différents types de transport solide. Source : GERMAIN Antoine (2008)

Pour une vitesse donnée et de manière simultanée, on observe un transport par charriage des matériaux le plus lourds et un transport en suspension pour ceux plus légers.

Le sédiment est mis en mouvement par le phénomène de cisaillement appliqué par l'eau sur le lit du cours d'eau. Le cisaillement dépend de la vitesse de l'écoulement et de sa turbulence. On exprime sa contrainte $\tau = \rho g R_h I \approx \rho g h I$, avec la masse volumique ρ , g l'accélération, R_h le rayon hydraulique, h la hauteur d'eau et I la pente du cours d'eau. Cette contrainte de cisaillement doit être supérieure une certaine contrainte critique, dépendant du poids de la particule et de la friction du lit, pour que le sédiment soit mis en mouvement.

On exprime la vitesse de cisaillement au fond du lit :

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{ghI} \quad (1)$$

La particule est maintenue en suspension quand la composante verticale de la vitesse d'écoulement est supérieure à la vitesse de chute de la particule, qui s'exprime d'après la formule de Stokes (1851),

$$W_s = \frac{gD^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_s - \rho_e}{\rho_e} \right) \quad (2)$$

avec : ν la viscosité cinématique ($\nu = \frac{10^{-6}m^2}{s}$) ; ρ_e la masse volumique de l'eau ($\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$) ; ρ_s la masse volumique du sédiment fin ($\rho_s \approx 2650 \text{ kg/m}^3$ pour les sédiments non cohésifs), pour les sédiments non-cohésifs sous forme de floccs les valeurs sont beaucoup plus faibles.

Ces paramètres permettent de calculer le nombre de Rouse qui permet de déterminer le mode de transport du sédiment,

$$R_0 = \frac{W_s}{kU^*} \quad (3)$$

avec $k = 0.41$, la constante de Von Kerman.

Pour $R_0 < 2.5$, on observe principalement un transport par suspension.

Quand la turbulence et la vitesse de l'écoulement diminuent, les particules chutent dans la colonne d'eau. Se forme alors dans le fond du cours d'eau une couche vaseuse qui peut être remobiliser ou se consolider. Ainsi, on remarque que la concentration est plus élevée dans le fond de la colonne d'eau (Defontaine, 2019).

Pour la suite, on s'intéressera principalement au transport en suspension qui est prédominant dans notre cas d'étude. Pour rappel, le transport par suspension concerne principalement les argiles, les limons et les sables ayant un diamètre qui ne dépasse pas 500 μm . Les mécanismes en jeu sont l'advection-dispersion et la diffusion. L'advection met le matériau en translation grâce au gradient hydraulique et influence la vitesse d'écoulement. La dispersion traduit la non-uniformité des vitesses dans une section qui est causée par la forme de la section, la rugosité et la vitesse de cisaillement de l'écoulement sur le fond. Enfin, la diffusion se traduit par un déplacement des molécules issues d'un milieu dans lequel leur concentration est élevée vers un milieu moins concentré.

1.4 Le risque inondation et « SPC »

De manière générale, on définit un risque comme le produit d'un aléa (événement susceptible de porter atteinte aux personnes, biens, environnement) et de la vulnérabilité d'un ou plusieurs enjeux (personnes, biens, environnement).

Le risque inondation est l'un des risques les plus importants. Entre 1990 et 2001, il a représenté à lui seul 50 % des désastres liés à l'eau (World Meteorological Organization, 2011).

À la suite des répétitions d'inondations au Royaume-Uni, sur le Rhin et en Europe de l'Est une directive a été rédigée par le Parlement Européen. La Directive « Inondations » 2007/60/CE (octobre 2007) vise à réduire les impacts négatifs liés aux inondations sur la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique. Plus localement, en France, 17,1 millions d'habitants (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) sont exposés au risque inondations par débordement de cours d'eau. La Directive Inondation a été transposée en 2010 et 2011 dans le droit français. La loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 et le Décret n° 2011-277 du 2 mars 2011 garantissent un suivi continu du risque et apportent un cadre réglementaire à la prévention et l'information du public.

De manière générale, on définit trois grands types de crues (Regnacq, 2007) :

- **Les crues torrentielles** se forment dans les bassins à forte pente. Elles surviennent lorsque des pluies abondantes tombent sur le BV d'un torrent. Elles sont de courte durée et d'impact local. Cependant l'intensité du courant peut être élevée tout comme les matériaux qui sont charriés. Les dégâts peuvent donc être très importants.
- **Les crues éclairs** sont dues à des épisodes pluvieux très intenses et localisés. Elles sont caractérisées par une montée très rapide du niveau d'eau.
- **Les crues de plaine.** Il s'agit ici de phénomènes qui ont lieu sur de vastes surfaces. La hauteur d'eau ainsi que le temps de submersion peuvent être élevés. C'est un phénomène qu'il est plus facile de prédire car plus lent.

S'ajoute à ces risques, d'autres catégories d'inondations, plus rares : comme les inondations par rupture de barrage, les remontées de nappes, la submersion marine, le ruissellement.

En France, la prévision des crues est assurée par les SPC 365 jours par an et 24h/24h. Ces services déconcentrés de l'Etat sont rattachés aux DREAL et sont sous l'égide du SCHAPI. Le SPC a pour rôle d'informer le grand public ainsi que la protection civile et les autorités locales concernées (préfet, maires ...) de l'imminence d'un épisode de crue. La prévision des événements repose sur les observations et prévisions météorologiques relayées par Météo-France et les relevés des hauteurs d'eau et/ou débits transmis en direct par le réseau d'observations. Les données sont traitées par plusieurs modèles de prévisions. En temps normal, les prévisions sont actualisées deux fois par jour. Des bulletins, accessibles au public et disponibles sur le site de Vigicrues, sont publiés à 10h et 16h. Lors d'épisodes de crues, quand la surveillance est renforcée, ces bulletins peuvent être actualisés à n'importe quel moment.

Un code de couleur (vert, jaune, orange, rouge) permet d'alerter sur l'importance de la crue. La procédure d'alerte varie selon le classement d'un cours d'eau. La chaîne de décision puis d'information ainsi que les mesures et moyens mis en place sont différents.

1.5 Bouchon vaseux

Les cours d'eau transportent, le long de leur linéaire, des sédiments. Ceux-ci se retrouvent déplacer jusqu'à l'exutoire du cours d'eau où ils subissent la gravitation, se déposent et sédimentent. Ce transport sédimentaire s'accompagne du drainage des pollutions anthropiques provenant des villes ou des champs cultivés (Romaña, 2001).

Plusieurs phénomènes, tel que la marée, ont tendance remettre en suspension une partie des matériaux. Ainsi des matières polluantes peuvent se déplacer dans la colonne d'eau et de nouveau se déplacer au gré des courants. Cela peut avoir des conséquences sur les écosystèmes et notamment affecter la qualité des eaux ou la qualité de l'habitat.

La problématique des bouchons vaseux est propre au transport sédimentaire et à l'influence du débit fluvial et du forçage de la marée dans les estuaires. Il s'agit de zones de turbidité où les matières en suspension (MES) sont très fortement concentrées (concentration supérieure à 0,5 g/L). Dans ces bouchons, la concentration est de 10 à 500 fois plus fortes qu'ailleurs dans l'estuaire. Ils connaissent des variations temporelles selon les apports des sédiments par la marée et du cours d'eau et spatiales (déplacement à travers l'estuaire).

La création de bouchons vaseux est liée à celle de la crème de vase, très forte concentration en sédiment de l'ordre de 100 g/L (Romaña, 2001) qui se dépose sur le fond de l'estuaire ou les berges et qui a de mauvaises conséquences environnementales. Les bouchons vaseux présentent eux-mêmes des effets néfastes pour l'environnement puisqu'ils se comportent comme des réacteurs biochimiques chargés en matériaux oxydables et organiques que les bactéries dégradent. Cette dégradation peut créer des zones d'anoxie (SMIDDEST) : les sédiments organiques sont dégradés par les bactéries ce qui entraîne une diminution de l'oxygène dans l'eau et une diminution de la production primaire causée par le manque de clarté de l'eau.

Il existe trois phénomènes principaux responsables de la formation de bouchons vaseux :

- La circulation estuarienne causée par le gradient de salinité longitudinal (aval eau salée/amont eau douce) et vertical (eau douce surplombant l'eau salée). La circulation estuarienne est la principale responsable de l'augmentation de la concentration en MES dans la zone de limite de salinité.
- L'asymétrie de la durée et les maximums de vitesse des débits entrants (marées) et sortants (fleuves) de l'estuaire. Par exemple, en période d'étude le forçage de la marée est prépondérant par rapport au débit du fleuve ce qui a tendance à faire remonter, vers les eaux plus douces, les sédiments.
- L'amortissement de la turbulence causée par la stabilité des stratifications des eaux entraînent un siphonage des sédiments de la partie haute de la colonne d'eau vers sa partie basse. Ce qui augmente l'épaisseur des sédiments en lit d'un estuaire ou cours d'eau.
-

1.6 La prise en compte du changement climatique

La prise en compte du changement climatique dans l'élaboration de tout projet est aujourd'hui essentielle si on veut qu'il soit durable et responsable. Il est nécessaire que chaque projet dans sa conception, sa planification ou son aménagement prenne en compte les impacts potentiels du changement climatique. Pour la réalisation du SAGE (Institution Adour, 2020), une étude sur ces

impacts a été réalisée. Cette étude permet d'avoir un aperçu plus précis des conséquences du réchauffement climatique sur la zone d'étude. Comme sur le reste du globe, les conditions climatiques vont évoluer : la température moyenne y augmentera d'entre 1 à 1,5 °C d'ici à 2070. Actuellement sous climat océanique, la zone ne devrait pas voir sa pluviométrie modifiée dans son ensemble. Des changements concerneront les cumuls de pluies estivaux qui devraient connaître une baisse marquée. Cependant le régime des précipitations évoluera : les pluies seront plus courtes et intenses ce qui aura des conséquences sur la gestion de certains usages de la ressource en eau. Avec la hausse de température les précipitations neigeuses se feront plus rares : les quantités diminueront, il ne neigera plus à certaine « basses » altitudes et la durée des événements sera plus courte. Ces changements auront des impacts sur les cours d'eau montagnards et notamment les débits aux printemps qui seront moins élevés (apport de la fonte des neiges diminué) et les débits hivernaux plus élevés (fonte immédiate de la neige à faible altitude). On remarquera également des périodes d'étiages accentuées entraînant un déficit de la ressource plus marqué.

Les conséquences sur le territoire toucheront un grand nombre d'activités et phénomènes liés à l'eau. La diminution des quantités d'eau disponible pendant les périodes de sécheresse pourra entraîner une concurrence entre les usages anthropiques. Le manque d'eau impactera la qualité de l'eau : les polluants drainés par l'Adour et ses affluents seront moins dilués entraînant des pics de pollutions ce qui impactera toutes les activités exigeantes quant à la qualité de l'eau (prélèvement d'eau potable, baignade ...). Les impacts ne toucheront pas que l'Homme mais également les écosystèmes. La faune et la flore aquatique ainsi que le fonctionnement global des milieux seront modifiés. On pourrait assister à une concurrence plus forte entre les espèces et une prolifération des espèces invasives au détriment des espèces locales.

2. L'Adour et son estuaire : « L'Adour maritime »

2.1 Présentation général de l'estuaire

L'Adour est un fleuve du Sud-Ouest de la France, qui se forme dans la vallée de Campan en Haute-Bigorre (Hautes-Pyrénées) à 2600 m d'altitude. Il dévale sur 312 km (Barthélémy, 2015) avant de se jeter dans l'Océan Atlantique au niveau de la ville d'Anglet, proche de Bayonne. Le cours d'eau traverse au total quatre départements : les Hautes-Pyrénées, le Gers, les Landes et enfin les Pyrénées Atlantiques (Figure 2). Son bassin versant (BV) a une surface d'environ 17 000 km² (Defontaine, 2019). L'Adour subit un régime hydrologique pluvio-nival : les débits sont plus importants en automne lors des épisodes de fortes pluies et au printemps quand les neiges fondent. Il s'agit de l'un des BV les plus humides de France et surtout sa partie amont qui connaît de forts épisodes de précipitation. Le débit moyen annuel du cours d'eau est de 300 m³.s⁻¹ et peut atteindre 3 000 m³.s⁻¹ lors de crues exceptionnelles (Defontaine, 2019). Le transport sédimentaire de l'Adour est faible, le flux moyen annuel est inférieur à 0,25 Mt/an et est turbulent pulsé, c'est-à-dire que 75% du transport solide s'effectue sur une période de 30 à 40 jours pendant les fortes crues.

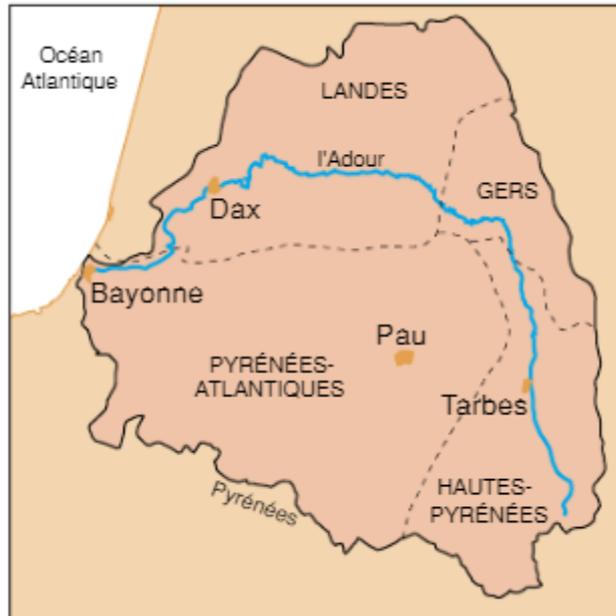


Figure 2 Bassin versant de l'Adour (source : Cahier géographique, Adour, 1996, Comité de Bassin Adour-Garonne)

On peut séparer l'Adour en deux grandes zones : une partie aval sous influence tidale et une partie amont qui subit principalement l'influence de ses affluents. L'Adour possède trois affluents principaux qui sont responsables de 65 % du débit total mesuré à Bayonne, lors des épisodes de fortes crues (Figure 3) :

- Les Gaves réunis (réunis à l'amont de Peyrehorade) :
 - Le Gave de Pau : qui possède un BV de 5 226 km²
 - Le Gave d'Oloron : qui possède un BV de 608 km²
- La Nive : qui possède un BV de 980 km² et qui se jette dans l'Adour au niveau de Bayonne

Chacun de ces cours d'eau à une influence différente sur l'Adour (qui connaît elle-même des crues fluviales). La Nive est le cours d'eau qui présente le plus d'enjeux car ses crues peuvent avoir des impacts sur les secteurs fortement urbanisés (les villes d'Anglet/Bayonne/Boucau).

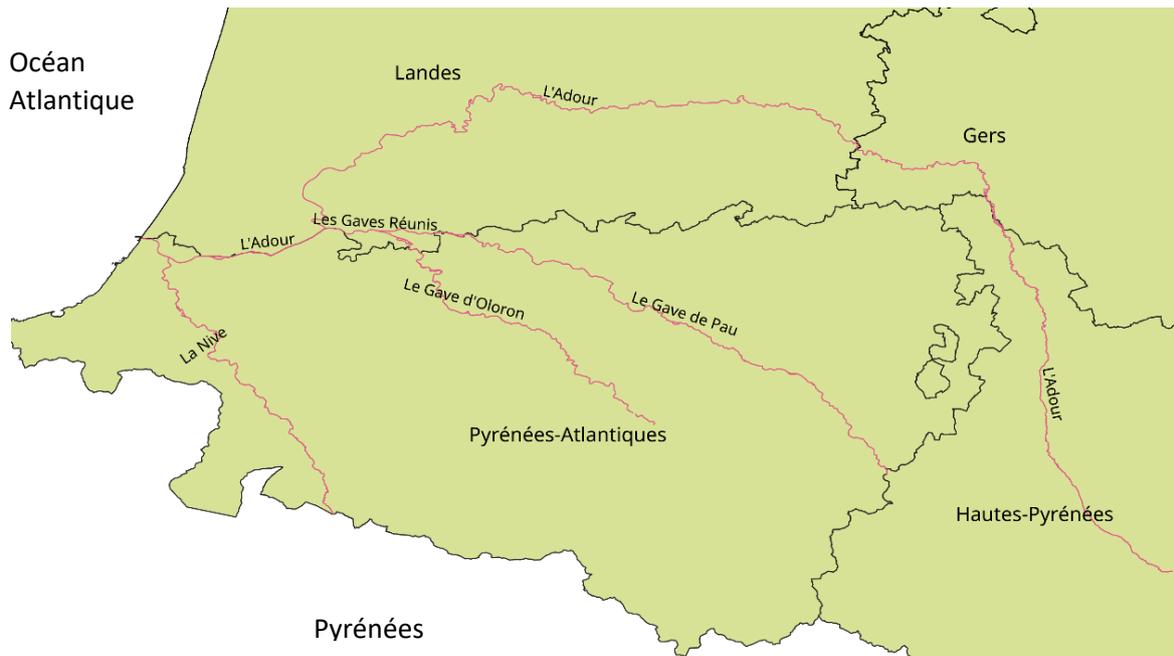


Figure 3 Les principaux affluents de l'Adour

Sur la majorité de son linéaire jusqu'à Bayonne, l'Adour est bordé de barthes (mot d'origine gasconne qui se réfère aux marécages, plaines inondables...). Ces zones, situées dans le lit majeur du fleuve, sont composées de canaux qui facilitent leurs inondations pendant la crue. Ces spécificités font des barthes des biotopes précieux et qui présentent un grand intérêt écologique. Certaines figurent parmi les inventaires ZNIEF et plusieurs sont classées comme sites Natura 2000. (Institution Adour, 2020)

Parce que l'Adour se déverse dans l'Océan Atlantique, il subit l'influence des marées. L'Adour est tidale sur une portion de 77 km jusqu'à Saint-Vincent-de-Paul, village jusqu'auquel l'influence de la marée peut se faire ressentir. La limite de salinité se trouve en aval, à Urt, à 22 km de l'embouchure de l'Adour.

2.2 L'anthropisation de l'Adour

L'Adour est comme la majorité des grands cours d'eau français, anthropisé. On y retrouve, ainsi que le long de ses affluents, des barrages et seuils. Par la présence du port de Bayonne (proche de l'embouchure de l'Adour) et la nécessité d'assurer le rectangle de navigation, le cours d'eau est canalisé (canal d'entre 150 et 400 m de large et 10 m de profondeur). L'estuaire est également anthropisé et dragué dans le but de faciliter l'évacuation des débits de l'Adour et des sédiments qu'il draine. De plus, une digue de 700 mètres, située au nord de son embouchure, a été construite pour protéger le port de l'entrée des houles de nord-ouest qui sont les houles prédominantes dans ce secteur.

2.3 Caractérisation de son estuaire

On peut appréhender la notion d'estuaire de l'Adour sous deux aspects (Institution Adour, 2020)

- Si l'on s'intéresse à la limite de salure des eaux, alors l'estuaire de l'Adour s'étend sur 22 km : de son embouchure jusqu'à la ville d'Urt.

- Si l'on se penche sur la zone influencée par la marée, alors l'estuaire remonte sur 65 km jusqu'à Dax.

On peut définir l'estuaire de l'Adour comme un estuaire à coin salé non permanent. Le coin salé se forme au flot, et disparaît au jusant.

Les caractéristiques d'un estuaire à coin salé non permanent sont les suivantes (Defontaine, 2019):

- o Un fort débit fluvial limite l'entrée des eaux marines et renforce la stratification.
- o Un fort marnage augmente le mélange, diminue ou détruit la stratification. Le fonctionnement ressemble alors à celui d'un estuaire partiellement mélangés=.
- o Pendant les périodes où se superposent mortes-eaux et étiage l'estuaire est à coin-salé permanent.

L'Adour est un estuaire qui subit des marées mésotidales, le marnage moyen est de 2,1 m (Institution Adour, 2020) et d'après le SHOM le marnage maximal se trouve entre 3,75 et 4,00 m. Cela implique un gradient de salinité et une capacité du milieu de l'estuaire à stocker les vases.

2.4 Les enjeux sur l'Adour maritime

2.4.1 Le risque inondation

Le bassin de l'Adour, du fait de son climat, sa morphologie et sa géologie est exposé à divers types d'inondations : des crues torrentielles ou de plaine, du ruissellement, des remontées de nappes, ou des ruptures d'ouvrage sans oublier le risque de submersion marine. Et le danger est bien là : la quasi-totalité des 1238 communes du bassin versants de l'Adour ont au cours des 33 dernières années fait l'objet d'au moins un arrêté CATNAT (CATastrophes NATurelles) inondations et coulées de boues (Institution Adour, 2020).

Le bassin de l'Adour subit un climat océanique et ses grosses perturbations venant de l'océan, stoppées par les Pyrénées voisines. On observe des épisodes pluvieux en hiver et au printemps, des orages violents en été et en automne (Regnacq, 2007).

L'influence de la marée, à un rôle prépondérant sur l'état du fleuve dans sa partie estuarienne. Les forts coefficients de marée influencent le passage de crues, déformant le pic de crue et intensifiant (blocage de l'évacuation de l'eau du fleuve) ou limitant si la crue coïncide avec le jusant les impacts des crues, les hauteurs d'eau (Institution Adour, 2020).

L'Adour possède de nombreux affluents, aux débits parfois conséquents, et qui se versent dans l'Adour tout au long de son cours. Le type de crues varient sur le bassin selon le cours d'eau touché (Regnacq, 2007) :

- Les crues du gave d'Oloron, suivies par celles du gave de Pau sont les plus importantes en termes de débit. Car leurs bassins sont montagnard, leur réactivité est rapide.
- Les crues de l'Adour sont hivernales, plus lentes et inondantes. Il faut souligner que sur sa partie estuarienne ses crues peuvent être influencées par la marée.
- Sur la Nive, on retrouve des crues torrentielles, qui sont la conséquence de l'accumulation d'épisodes orageux intenses et de son petit bassin versant encaissé.

De plus l'artificialisation de l'Adour et de certains de ses affluents (notamment le Gave de Pau) a tendance à augmenter la possibilité de concomitance des crues et donc d'en augmenter l'importance et les conséquences (Institution Adour, 2020).

L'extrême aval de l'Adour se situe en zone fortement urbanisée avec beaucoup d'enjeux. Les principaux risques proviennent des crues de la Nive corrélées aux épisodes de fortes marées. Le territoire est instrumenté et les crues prévisionnées et surveillées par le SPC GAD et le SCHAPI. Plusieurs études ont été menées par différents maîtres d'ouvrages afin de mieux connaître le comportement de l'Adour et ses affluents :

- Des travaux ont été réalisés sur la Nive. A l'aide de données expérimentales, l'objectif était de connaître l'influence propre de la Nive lors de crue en période de vives et mortes-eaux. Il s'agissait de séparer les signaux propres aux marées, à la surcote marine, à la crue etc. Ces études ont été partiellement financées par SCHAPI.
- Un couplage de modélisation 1D et 2D a été réalisé afin de comprendre le comportement des cours d'eau et l'influence de la marée sur la partie maritime de l'Adour.
- Des mesures ont été réalisées afin de caractériser l'estuaire de l'Adour par le biais de données expérimentales afin de proposer une nouvelle forme de classification des estuaires.

2.4.2 La qualité de l'eau de l'Adour maritime

Les eaux de l'Adour et ses affluents représentent beaucoup d'enjeux : nombreux points de captage sur l'Adour et la Nive par exemple ou encore qualité des rejets d'eaux usées. Ainsi de nombreuses campagnes de mesures réglementaires ont été réalisées sur le territoire. La tendance est mauvaise. On observe une dégradation chronique et importante de la qualité des eaux sur l'ensemble du bassin du point de vue bactériologique et concernant les taux de matières azotées et phosphorées.

L'estuaire de l'Adour possède également ces propres problématiques. Parce que c'est la dernière étape avant l'évacuation de l'Adour vers l'océan, les pollutions provenant des différents cours d'eau du bassin s'y rejoignent. Les concentrations en polluant y sont donc plus importantes. D'autre part, les usages des eaux y sont nombreux par la présence de grandes villes, de zones agricoles et de zones industrielles et portuaires. Des campagnes de mesures pour la surveillance de la qualité des eaux de baignade ont montré un mauvais état bactériologique. Elles ont révélé que pendant les périodes d'étiage les apports en polluants dans l'estuaire étaient principalement locaux, localisés dans les 6 derniers kilomètres de l'estuaire. Lors d'épisodes de crues l'apport devient principal de la part de partie plus en amont du bassin versant.

Différentes analyses montrent que les principales sources de pollutions sont les pratiques agricoles et les activités industrielles.

2.4.2.1 Les polluants agricoles

On retrouve de nombreuses terres agricoles sur le territoire du bassin versant de l'Adour, même si l'activité y est en baisse depuis le début des années 80. Le long de l'Adour maritime, 60% de la surface sont des sols occupés à vocation agricole.

Le paysage agricole peut être catégoriser en deux zones (Institution Adour, 2020) :

- En vallée, les terres sont dédiées aux cultures alimentaires de maïs et céréales principalement. On retrouve plus anecdotiquement de l'élevage de volaille ou la culture de kiwis.
- A l'inverse, dans le piémont pyrénéen, l'élevage prédomine face aux cultures alimentaires.
- Il existe des pratiques agricoles spécifiques dans les barthes. On y retrouve des pâturages pour l'élevage de bovins ou d'équins, des activités fourragères, de la maïsiculture ainsi que de la sylviculture.

Ces pratiques agricoles nécessitent, encore beaucoup, l'utilisation de produits chimiques de fertilisation et phytosanitaires, qui sont en cause de la pollution des eaux. Les principaux impacts de l'agriculture sur la qualité des eaux sont (Institution Adour, 2020) :

- L'eutrophisation par enrichissement en nitrates ou phosphates, principalement dues à la maïsiculture et l'élevage.
- La contamination des eaux superficielles et souterraines causée par l'utilisation de produits phytosanitaires. La contamination bactériologique de l'eau causée par l'élevage.
- L'apport important en MES dans les cours d'eau par lessivage des sols agricoles non couverts hors des périodes d'exploitation.

Au-delà de l'impact sur la qualité de l'eau, l'activité agricole nécessite une bonne gestion de la capacité disponible de la ressource. Par exemple, la culture du maïs, plus localisée en amont de l'Adour nécessitent de grandes quantités d'eau.

2.4.2.2 Les polluants industriels et industrialo-portuaires

Les enjeux industriels du bassin de l'Adour se concentrent à l'aval, au niveau du port de Bayonne. Les activités industriels et industrialo-portuaires qui y sont développées sont nombreuses (Institution Adour, 2020):

- L'agroalimentaire qui est dominant dans la région
- La construction aéronautique et spatiale
- La sidérurgie
- Les produits azotés et engrais

Ces activités génèrent de nombreuses nuisances (bruit, odeurs, détérioration des paysages ...) et des risques liés à certaines activités existent. Ils impacteraient la qualité de l'eau de l'estuaire de l'Adour. Chaque activité, suivant les matières utilisées ou produites, est la cause de pollutions : MES, métaux lourds, MO azotée ou phosphorée, substances toxiques inhibitrices ... On retrouve également une contamination par les TBT dues au carénage des bateaux (utilisation de peintures anti-moisissures pour les coques des bateaux).

2.4.2.3 Pollution anthropique liée à l'urbanisation

Le secteur de Bayonne regroupe une importante partie de la population du territoire. L'Adour y est le réceptacle de grosses stations d'épuration et collecteurs d'eau pluviales (Institution Adour, 2020). De nombreux pollutions issus des villes finissent dans les eaux de l'Adour : les polluants ménagers (produit d'entretien ...) ou « pharmaceutiques » (hormones, principes actifs de médicaments ...) qui ne sont pas suffisamment filtrés par les stations d'épuration ... La présence des villes augmente également le nombre de déchets dans les cours d'eau (plastiques, mégots etc.). Lorsque les collecteurs d'eau pluviale sont saturés les eaux pluviales ayant drainées toute la pollution des villes se jettent directement dans les cours d'eau à proximité.

3. Modélisation hydraulique de l'Adour maritime

3.1 Modélisation hydraulique 1D avec le code de calcul Mage

Mage est un logiciel de calcul hydraulique développé par INRAE (Faure, 2019) qui permet une modélisation unidimensionnelle des écoulements à surface libre des cours d'eau.

3.1.1 Equations et formules

Le code de calcul Mage est basé sur la résolution des équations unidimensionnelles de Barré de St-Venant, la formule de perte de charge de Manning-Strickler ainsi que les lois spécifiques aux ouvrages hydrauliques, comme la loi de seuil par exemple.

Plusieurs hypothèses sont émises pour les calculs :

- Le fluide est incompressible.
- L'écoulement se déplace selon une direction privilégiée : l'axe du canal. Les vitesses sont supposées parallèles à cette direction.

Pour chaque section mouillée, et en posant $v(M)$, la vitesse au point M, on exprime le débit,

$$Q = \iint_S v(M) dS \quad (4)$$

et la vitesse moyenne $V = \frac{Q}{S}$.

- La surface de l'eau est horizontale dans une section perpendiculaire à l'axe d'écoulement.
- La pression est hydrostatique suivant l'axe verticale, $P = P_0 + \rho gh$, avec h la hauteur d'eau.

Les équations de Barré-de-Saint-Venant (1888)

Les équations de Saint-Venant monodimensionnelles, en formulation section-débit résolues par le logiciel de calcul, sont de la forme :

Equation de continuité

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q = q_{apports} - \frac{\partial S_{majeur}}{\partial t} + q_{déversements} \quad (5)$$

Equation dynamique

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial Z}{\partial x} = -gS(J + J_s) + kqV \quad (6)$$

avec les paramètres suivants :

t le temps	J les pertes de charge linéaires par frottement
S section mouillée	β le coefficient de quantité de mouvement
g la gravité	q les pertes ou apports latéraux
X l'abscisse en long	J_s pertes de charge singulières : élargissement ou rétrécissement brusques
Q le débit	Z la cote de la surface libre

La formule de Manning-Strickler

La formule de perte de charge de Manning-Strickler exprime les pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois et le fond du canal, en exprimant J , la pente de la charge hydraulique H .

$$J = \frac{|Q|Q}{D^2} \quad (7)$$

avec $D = KSR_H^{2/3}$ et K le coefficient de Strickler.

La formule Debord (Nicolet et Uan, 1979)

Le logiciel utilise les données des profils en travers pour construire un réseau maillé et modéliser précisément le cours d'eau avec sa bathymétrie réelle. D'autre part, le lit peut être séparé en trois zones : le lit mineur, le lit moyen (correspondant au lit majeur actif) et le lit majeur (lit de stockage). La formule DEBORD (Nicolet et Uan, 1979), décrivant la différence de vitesses entre les lits, est utilisé par MAGE afin de simuler les lits composés.

$$Q_M = \varphi Q \quad (8)$$

$$Q_m = \left(\left(1 + \frac{A_m}{A_M} \right) (1 - \varphi^2) \right)^2 Q \quad (9)$$

avec $\varphi \approx 0.9 \left(\frac{K_m}{K_M} \right)^{-\frac{1}{6}}$; A l'aire mouillée (m^2), Q le débit global, m et x expriment respectivement le lit mineur et le lit majeur.

Il est possible de définir des coefficients de Strickler différents pour les différents lits.

3.1.2 Equations des casiers

Sur MAGE, on peut simuler un stockage d'eau à l'aide d'un casier latéral (Faure 2019). Cela revient à simuler un déversement par-dessus une digue. L'échange de volume se fait par un débit latéral estimé à partir de la différence de cote entre l'écoulement principale et le casier latéral (Figure 4). Ce débit est calculé par une loi de seuil pour un déversoir rectangulaire, ainsi on peut modéliser aussi bien un écoulement noyé que dénoyé. Dans le cas d'un casier, on calcule un débit linéique ($m^3/s/m$), la longueur du déversement est normalisée dans les formules d'écoulements d'un déversoir rectangulaire (voir annexe 1)

En chaque point du tronçon déversant, MAGE compare la cote d'eau de la section déversant à la cote d'eau du point récepteur : si la première est supérieure à la deuxième il y a déversement sinon c'est la zone réceptrice qui alimente le secteur déversant.

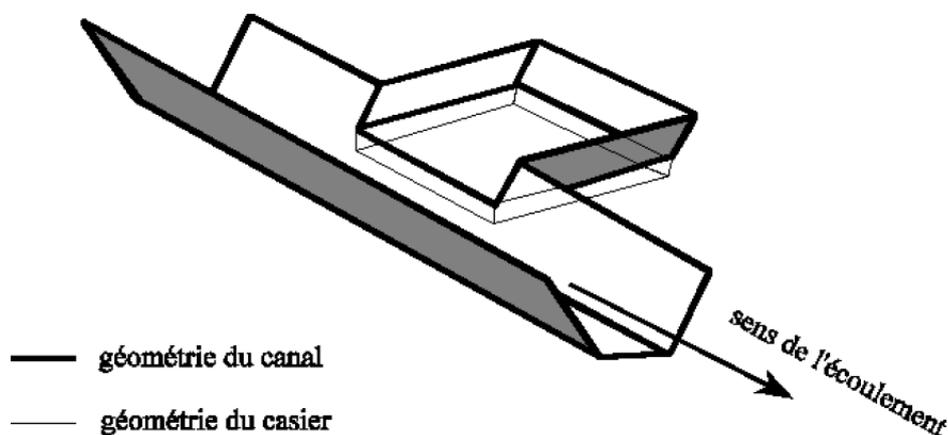


Figure 4 Schéma de fonctionnement d'un casier sur MAGE. Source J.B Faure 2019

La vitesse de l'écoulement est négligée dans les casiers. Les casiers sont caractérisés par une surface libre horizontale et leur influence se traduit par un laminage des débits entrants.

Le fonctionnement hydraulique d'un casier est décrit par l'équation de conservation du volume :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = S(Z) \frac{\partial Z}{\partial t} = \sum Q_{entrants} - \sum Q_{sortants}$$

avec V le volume du casier, Z la cote du plan d'eau dans le casier.

Avec MAGE, le casier est modélisé par un nœud auquel on détermine une loi $S(Z)$. On entre dans MAGE, pour chaque hauteur, la surface qui est associée. Le code extrapole la loi $S(Z)$ entre deux valeurs. Par exemple pour définir un casier de surface constante selon sa hauteur. On définit pour l'altitude de fond et l'altitude de surface du casier la même surface (Tableau 1).

Tableau 1 Exemple de loi de surface $S(Z)$ à entrer sur MAGE

Hauteur (m)	Surface (ha)
-4	25
4	25

Il faut relier le casier au reste du réseau par un bief, qui ne peut être intermittent comme décrit dans les limites de MAGE.

L'utilisation de casiers représente des contraintes pour de grandes surfaces (milliers d'hectares) :

- La contrainte de la condition d'horizontalité qui impose que le casier ne soit pas trop grand. En effet, la différence de niveau entre l'entrée et la sortie nécessaire à un écoulement serait trop élevée pour respecter la condition.
- Le casier impose une transmission instantanée du signal de débit entre son entrée et sa sortie. Cette simultanéité ne peut pas être vérifiée pour des trop grandes surfaces.

3.1.3 Les spécificités de MAGE

Schéma numérique de résolution de MAGE

La particularité de MAGE est les équations de Barré St-Venant sont résolues par la méthode des différences finies. Pour chaque pas de temps, un système d'équations discrètes non linéaires est résolu par une méthode itérative (Newton-Raphson). La discrétisation des équations se fait par un schéma de Preissman. Il est particulièrement performant (temps de calculs réduits) en régime transitoire. Habituellement, les autres logiciels de calcul utilisent plus souvent la méthode des caractéristiques.

Utilisation de MAGE

Pour faire tourner le logiciel, il faut entrer des conditions limites et des conditions initiales. Les conditions limite pour des nœuds amonts doivent être des hydrogrammes, pour les nœuds avals des limnigrammes ou des courbes de tarage. Quant aux nœuds intérieurs il est possible de définir un apport ponctuel d'eau.

Les limites du logiciel MAGE

Le logiciel est conçu pour simuler des cours d'eau en régime fluvial. Ainsi lorsque le nombre de Froude passe en torrentiel, $Fr > 1$, les résultats donnés par MAGE sont de moins bonne qualité. Lorsque localement le nombre de Froude est supérieur, l'écoulement y est défini de manière

approchée en annulant progressivement le terme d'accélération convective $d/dx(\beta Q^2/S)$. Il faut rester vigilant à ce que le régime ne passe pas en torrentiel dans des zones de forts enjeux, car la précision y sera moins bonne. Une rupture de pente est généralement la cause d'un passage en régime torrentiel. Sa modélisation par un seuil, même artificiel peut permettre d'améliorer la stabilité et la qualité des résultats.

MAGE ne peut simuler de bief sec : l'introduction d'une fente de Preissman au fond du lit mineur ou l'ajout d'un débit latérale petit est nécessaire pour que le bief reste en eau.

MAGE ne modélise pas de perte de charge dans les nœuds, les angles de raccordement pour une confluence ou diffluence n'est pas pris en compte.

3.2 Construction du modèle de l'Adour pour la modélisation hydraulique

3.2.1 Présentation de la méthode

Il existe d'ores et déjà un modèle hydraulique sur lequel se repose le SPC. Il s'agit d'un modèle développé sur le logiciel Mascaret (développé par EDF). L'objectif est ici de reprendre la géométrie du modèle Mascaret sous Mage afin de comparer les qualités et limites de ces codes de calculs et de proposer une modélisation robuste de l'Adour approchant au mieux les observations avec des temps de calculs réduits.

Dans l'objectif de réaliser un modèle performant, j'ai suivi les étapes suivantes :

- Dans un premier temps, j'ai réalisé un modèle correspondant en tout point à celui développé sur Mascaret. Le but est de voir les variations des résultats par rapport aux différents schémas numériques de résolutions, pour les mêmes conditions et paramètres. Les résultats numériques seront également comparés aux observations.
- Dans un second temps, j'ai cherché à améliorer le modèle pour que ses résultats se rapprochent au mieux des observations. Deux modèles ont été réalisés dans ce but en se focalisant tout particulièrement sur la partie de la Nive, où de nombreux débordements sont observés. Cette amélioration du modèle est faite avec l'utilisation de casiers. J'ai étudié la sensibilité des modèles à certains paramètres afin d'en optimiser le calage.

3.2.2 Contours du modèle

Dans le cadre de mon TFE, j'ai concentré mon travail de modélisation sur la partie aval de l'Adour, sous influence maritime. Appelée Adour maritime (Figure 3 et 5), cette portion du BV est composée de :

- L'Adour qui débute à Dax et se jette à Convergent dans l'Océan Atlantique (Biefs 1, 2 et 4) .
- La Nive qui débute à Cambo-les-bains et se jette dans l'Adour à Bayonne (Bief 3).
- Le Gave de Pau (Bief 7) qui débute à Orthez et qui forme avec le Gave d'Oloron (Bief 6), qui débute à Escos, les Gaves réunis à partir de Peyrehorade (Bief 5). Les Gaves réunis se jettent dans l'Adour.

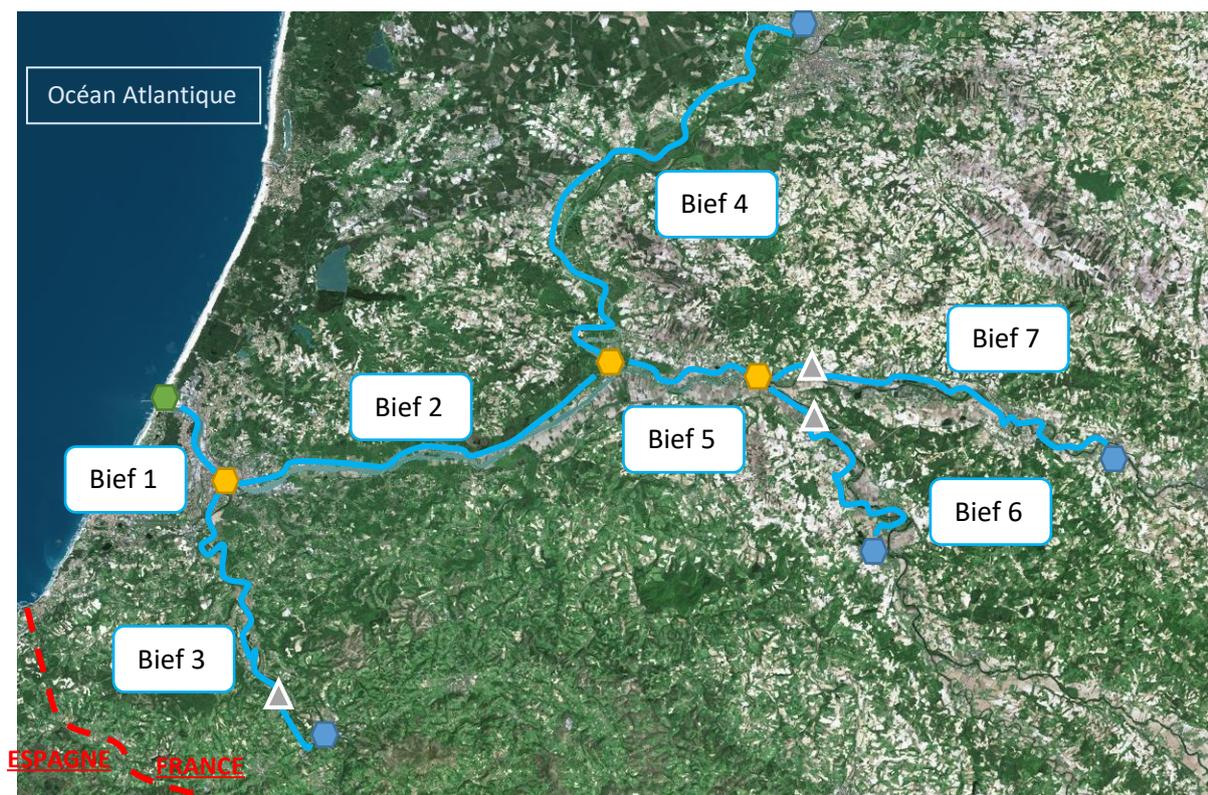


Figure 5 Localisation des nœuds, des biefs et des seuils

Le réseau modélisé représente au total 161 km de cours d'eau. Par endroit, il s'étend au-delà de la zone influencée par la marée. Le forçage est stoppé sur les affluents étudiés (Nive, Gave de Pau, Gave d'Oloron) par des seuils (Figure 5).

3.2.3 Données de géométrie

Les données sur la géométrie proviennent du SPC. Elles sont issues d'une précédente campagne bathymétrique réalisée sur la zone d'étude. On dénombre 545 profils en travers répartis sur les biefs (Tableau 2).

Tableau 2 Récapitulatif de la géométrie des biefs

Bief	Nœud amont	Nœud aval	Cours d'eau	Longueur du bief (m)	Nb profils en travers	Distance moyenne entre les profils (m)
1	Convergent	Bayonne	Adour	5 730	23	250
2	Bayonne	Confluence	Adour	25 190	99	254
3	Bayonne	Cambo-les-bains	La Nive	22 800	216	1 777 (amont seuil) 58 (aval seuil)
4	Confluence	Dax	Adour	34 496	95	363
5	Confluence	Peyrehorade	Gaves réunis	9 431	50	188
6	Peyrehorade	Escos	Gave d'Oloron	25 308	16	2 449 (amont seuil) 88 (aval seuil)
7	Peyrehorade	Orthez	Gave de Pau	38 029	46	965 (amont seuil) 259 (aval seuil)

La précision permise varie en fonction des biefs. Pour les biefs 3, 6 et 7, la distance entre les profils à l'amont des seuils importante peu : l'importance est la bonne modélisation de la marée qui est stoppée dans sa propagation par ces seuils. L'autre rôle des seuils est également de permettre une hauteur d'eau assez constante, connue, en dehors des crues à leur amont. Comme expliqué dans la partie 2, la Nive (Bief 3) représente de forts enjeux lorsqu'elle est en crue, ce qui se traduit par la volonté d'avoir une bonne précision de la géométrie du cours d'eau.

3.2.4 Données hydrauliques (débits, hauteurs d'eau ...)

Les conditions limites

Les données servant de conditions limites ont été données par le SPC. Comme évoqué dans la présentation des calculs hydrauliques réalisés par MAGE, elles sont de deux types : à Convergent, nœud aval, un limnigramme et pour les nœuds amont Dax, Cambo-les-Bains, Escos et Orthez des hydrogrammes. Le choix a été porté de travailler sur une période de 64 jours, d'octobre à décembre 2019. Cette période a été marquée par des épisodes pluvieux importants dans le Sud-Ouest de la France. Plusieurs tempêtes sont à l'origine de plusieurs épisodes de crues, dont un intense durant le mois de décembre.

A la station **Convergent**, notre unique nœud aval, la présence de la marée est prédominante (Figure 6). La station se trouve à l'embouchure de l'Adour, ce qui justifie que l'on peut bien distinguer les phénomènes de la marée : les périodes de vives et mortes-eaux. Par moment, le signal est déformé par le passage d'une crue. Les pics de crues sont nettement plus visibles aux autres stations.

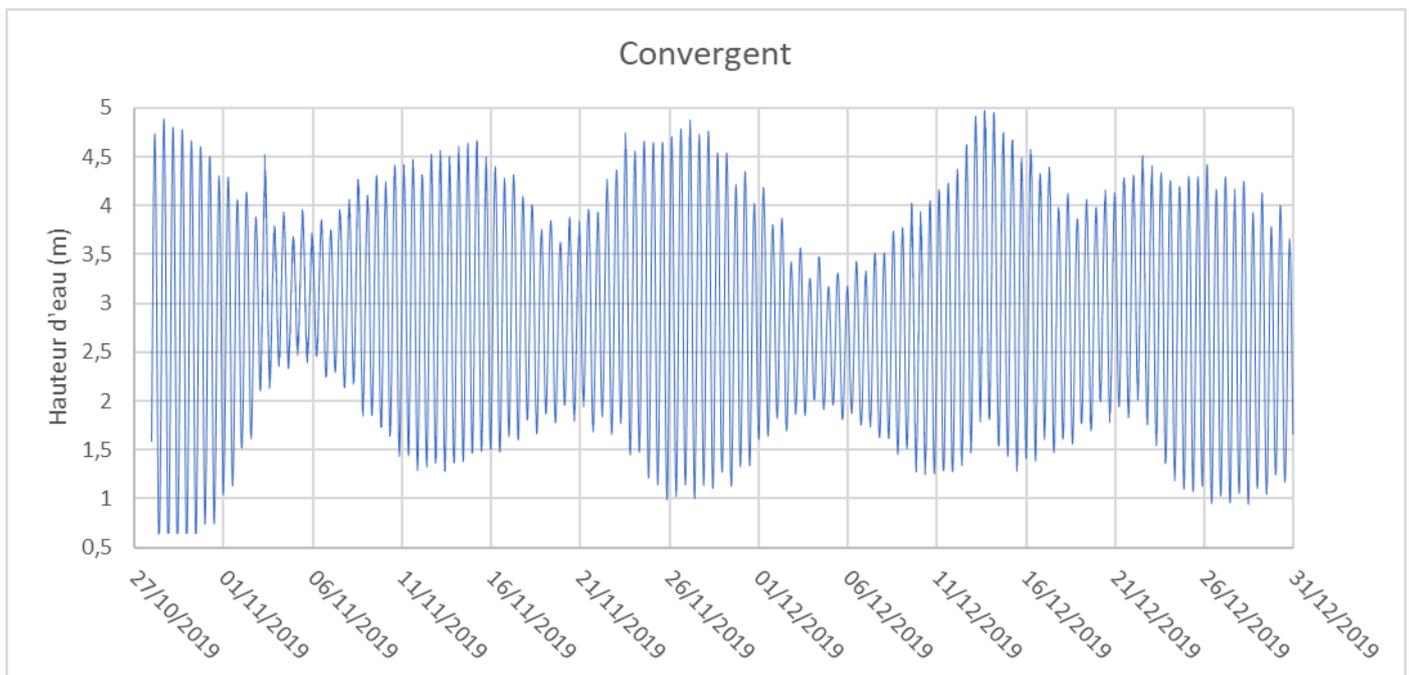


Figure 6 Limnigramme de 64 jours (oct-déc 2019) à la station Convergent

Plus en amont sur l'Adour, pour le nœud amont **Dax**, on aperçoit de grandes variations dans les débits observés (Figure 7). Pour des débits faibles, on remarque l'influence de la marée (période du 27 octobre au 6 novembre et du 6 décembre au 11 décembre). Dès que le débit augmente, l'influence de la marée est atténuée et disparaît. Sur la période, on aperçoit trois pics de crue (11/12 et 21 novembre et 17/18 décembre) avec un débits maximaux variables respectivement de 550, 700 et 900 m³/s.

L'hydrogramme du nœud aval sur la Nive, **Cambo-les-Bains**, est moins influencé par la marée (Figure 7). On observe l'augmentation du débit jusqu'à environ 300 m³/s en plusieurs dates (entre le 6 et 11 novembre et 24/25 novembre). Mais également une forte crue entre le 13 et 14 décembre atteignant une valeur de presque 900 m³/s en termes de débit.

Escos est la station amont sur le Gave d'Oloron. Sur la chronique de débits (Figure 7), on distingue plusieurs pics de petites crues atteignant des débits de 500 m³/s. En fin de chronique, vers le 13/14 décembre les observations montrent un important pic de crue atteignant plus de 1 400 m³/s.

Enfin à la station d'**Orthez**, sur le Gave de Pau les phénomènes sont similaires à ceux enregistrés à la station d'Escos (Figure 7). On remarque plusieurs petites crues, avec des pics atteignant les 400 m³/s et une crue bien plus importante entre le 11 et 16 décembre dont le débit maximal enregistré est de 1 000 m³/s.

L'analyse des hydrogrammes montrent une simultanéité de crues sur l'Adour et chacun de ses affluents dans la première moitié du mois de décembre 2019. On tachera par la suite de modéliser le mieux possible cet évènement qui eut de lourdes répercussions dans la zone (fermeture de routes, coupures d'électricité, dégâts matériaux ...) et qui causa la mise en vigilance rouge du Gave d'Oloron.

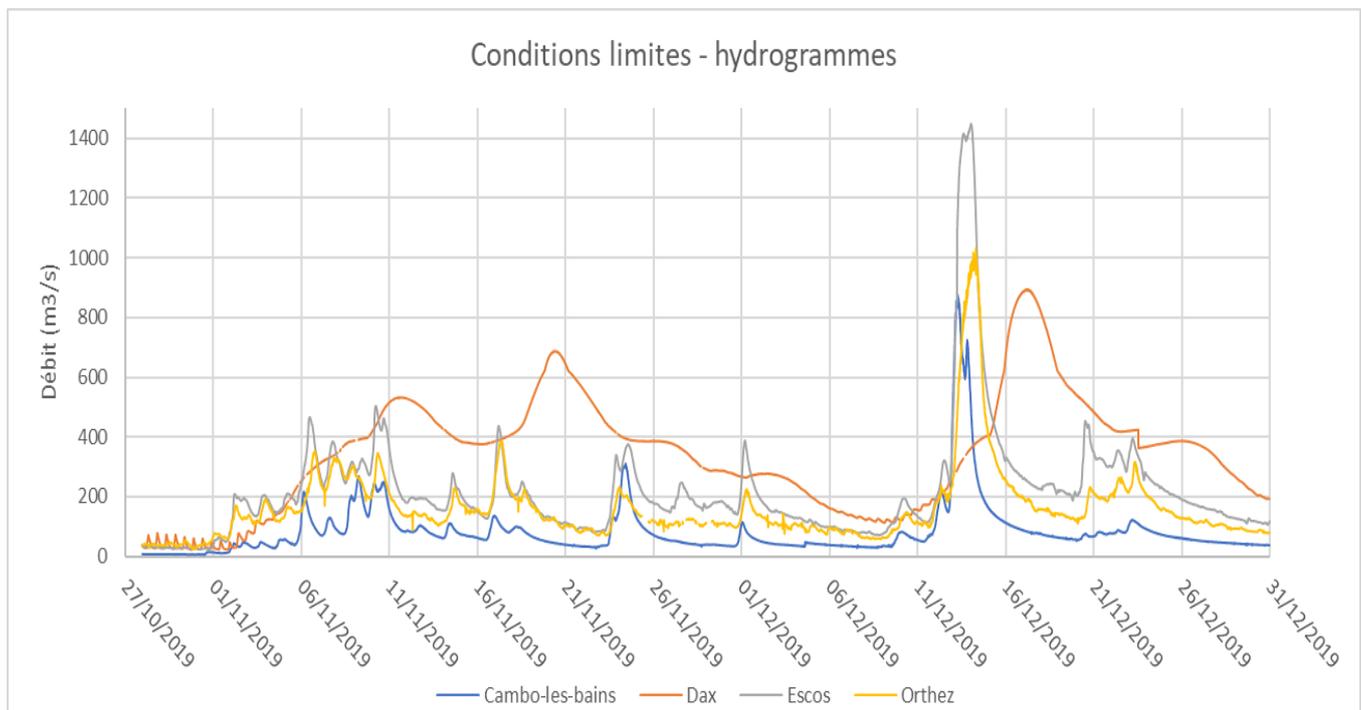


Figure 7 Hydrogrammes servant de conditions limites aux modélisations.

Les données de contrôles aux stations « de référence »

Afin de vérifier la justesse de nos modèles, on compare les résultats obtenus par MAGE avec deux autres sources de données :

- Les hauteurs d'eau observées par les stations du réseau Vigicrues, prodiguées par le SPC ;
- Les données obtenues numériquement avec le logiciel Mascaret.

On compare les résultats en 5 stations (Annexe 2), dont 4 dites « de références » pour définir les niveaux de vigilance pour le SPC :

- La station de **Lesseps** située à Bayonne. Dans notre modèle, elle fait partie du bief 1 et est située PK 60204 soit quelques kilomètres avant l'embouchure.
- La station d'**Urt/Saint-Laurent-de-Gosse** sur l'Adour, situé sur le bief 2 au PK 44836.
- La station de **Peyrehorade**, confluence des Gaves.
- La station de **Pont-Blanc** située sur la Nive (bief 3) au PK 20878
- La station de **Villefranque**, qui n'est pas une « station de référence », également située sur la Nive au PK 15231.

Toutes les mesures du SPC sont données avec un pas de temps de 5 min, soit 18433 données pour chaque chronique.

Par la suite, pour faciliter la lisibilité des tableaux les stations seront, dans l'ordre, renommées : LES, URT, PEY, PON, VIL.

Qualité des mesures in-situ

Une importante partie du travail réalisé sur le modèle hydraulique repose sur les mesures in-situ : conditions limites et point de départ pour les comparaisons avec les résultats MAGE et Mascaret. Ainsi, il est important de s'assurer de leur bonne qualité pour que le modèle soit le meilleur possible. Dans cette partie, on ne s'intéressera pas à l'incertitude reposant sur la mesure elle-même, mais sur les lacunes que présente chaque chronique. Les principales incertitudes venant de la mesure sont les incertitudes de l'instrumentation et le secteur de la mesure. De manière générale, les incertitudes sont de l'ordre de 7 à 10 % et les plus grandes incertitudes sont à l'étiage et en crue.

Il arrive qu'une station arrête d'enregistrer les données : la longueur du laps de temps séparant l'arrêt et la reprise des mesures peut être suffisamment importante pour biaiser la modélisation : un pic de crue peut ne pas avoir été enregistré par exemple.

Pour les stations de Convergent, Cambo-les-bains, Escos, Lesseps, Urt, Peyrehorade et Pont-Blanc les données manquantes représentent moins de 1 % des mesures (Tableau 3). L'arrêt entre les mesures reste court : entre 5 et 40 minutes au maximum. Pour ces sept stations, on peut considérer que la qualité des mesures est très bonne.

Pour la station d'Orthez, les données manquantes sont peu nombreuses (moins de 1 %) mais sont de longues durées : treize coupures durent plus d'une heure.

Pour la station de Dax, les données manquantes représentent 1,3 % des données. Presque 83 % des coupures durent moins d'une heure et 7 % durent plus de deux heures.

Enfin pour la station de Villefranque les coupures sont peu nombreuses, quatre au total, mais certaines sont longues : entre le 10 et 12 novembre 2019 les mesures se sont arrêtées près de 38 h et très peu de temps après il y a eu un arrêt de 5h entre les mesures.

Pour ces trois dernières stations ont peu considérées que la qualité des données est légèrement moins bonne, même si elle reste tout à fait correcte : les données manquantes ne représentent pas plus de 3% des données totales.

Tableau 3 Récapitulatif des statistiques sur les données manquantes aux chroniques.

	CNV	DAX	CLB	ORT	ESC	LES	URT	PEY	PON	VIL
Portion de données manquantes (%)	0,05	1,3	0,09	0,13	0,15	0,87	0,15	0,09	0,08	2,82
Répartition des données manquantes (%)										
Moins d'une heure	100	83	100	52	100	100	100	100	100	50
Entre une et deux heures	0	10	0	28	0	0	0	0	0	0
Plus de deux heures	0	7	0	20	0	0	0	0	0	50

3.3 Premier modèle – Modèle AS (Adour simple)

3.3.1 Présentation du modèle

Le premier modèle sur lequel j'ai travaillé est un modèle simple imitant celui déjà réalisé à l'aide du logiciel Mascaret. L'intérêt de ce modèle est dans un premier temps de confirmer le bon comportement du logiciel Mage en cas de forte influence de la marée mais également de réaliser un comparatif des résultats produits par Mage et des résultats produits par Mascaret pour des modèles en tout point similaires. On peut ainsi comparer les points communs et les divergences des résultats dus aux subtilités de chaque programme de calcul.

Le modèle est de composition simple. Il s'agit de 7 biefs sans casiers ou apports ponctuels d'eau. Chaque bief représente une portion de cours d'eau séparée des autres par une ou deux confluences. Le réseau du modèle est présenté ci-dessous :

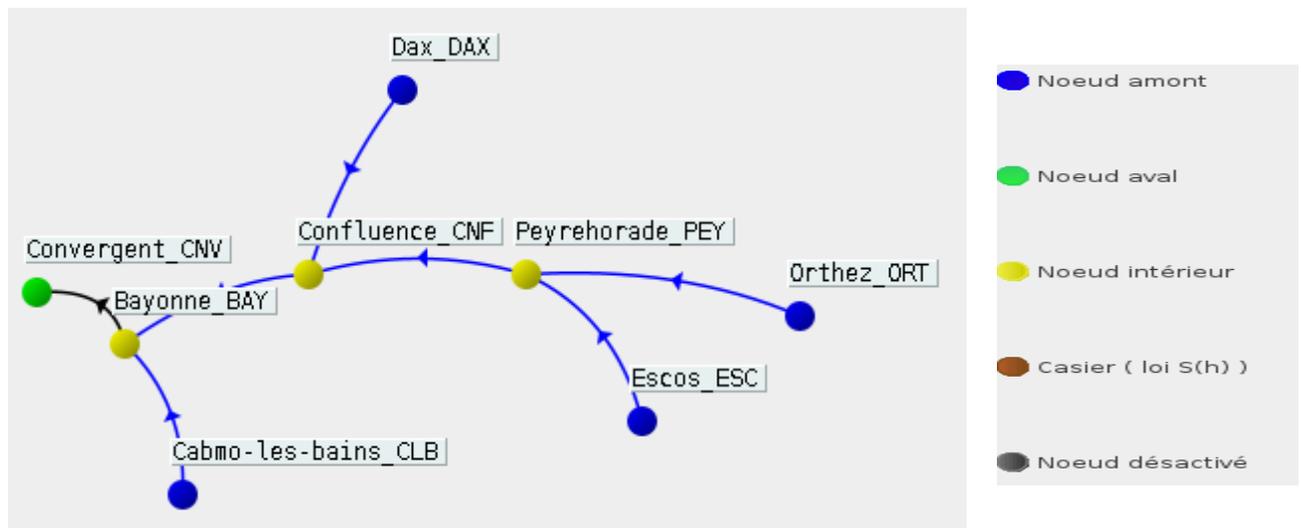


Figure 8 Modèle Adour simple Source : Pamhyr

Pour comparer les modèles sur un même pied d'égalité j'ai appliqué la même géométrie (décrite dans la partie précédente) et les mêmes coefficients de Strickler [Annexe 3].