

# Projet INONDABILITE



Amélioration des connaissances  
de l'inondabilité de la plaine  
alluviale

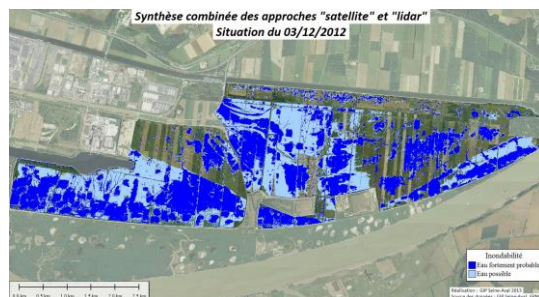
Volet : Analyse croisée des  
différentes sources de données

Secteur de la RNNES

Septembre 2013



**Seine-Aval**  
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC



Auteurs :

**Nicolas Bacq<sup>1</sup>**

**Jean-Philippe Lemoine<sup>1</sup>**

**Thomas Lecarpentier<sup>2</sup>**

**Damien Ono-Dit-Biot<sup>2</sup>**

**Sophie ALLAIN-BAILHACHE<sup>3</sup>**

Contributeurs :

**Simon Guilbaud<sup>2</sup>**

**Guillaume Fauveau<sup>2</sup>**

**Franck Boitin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> : GIP Seine-Aval

<sup>2</sup> : Maison de l'estuaire

<sup>3</sup> : IETR, Université de Rennes1

<sup>4</sup> : PNRBSN

## Contenu

1. Objectif de l'étude.....	3
1.1. Problématique et objectif général du projet.....	3
1.2. Rappels des résultats issus du volet Inondabilité par segmentation d'image satellite radar .	4
1.3. Objectif et méthode du volet analyse croisée .....	6
2. Construction des cartes d'inondabilité potentielle .....	7
2.1. Les niveaux d'eau par secteur et leur variabilité.....	7
2.2. La topographie LIDAR et incertitudes.....	14
2.2.1. Optimisation du MNT à partir des données disponibles.....	14
2.2.2. Incertitude des données LIDAR .....	17
2.3. Cartographies d'inondabilité potentielle. ....	19
3. Combinaison des approches « satellite » et « potentielle » .....	21
3.1. Principe d'analyse.....	21
3.2. Hypothèses retenues pour les cartes de synthèse.....	22
4. Illustration des résultats au regard des vérités terrain .....	24
5. Discussion sur la représentativité des situations observées dans le contexte de la gestion des niveaux d'eau dans la RNNES. ....	26
6. Bilan de l'étude et perspectives .....	28
Bibliographie.....	29
ANNEXE : Ensemble des cartes produites pour les cinq situations étudiées.....	30

## 1. Objectif de l'étude

### 1.1. Problématique et objectif général du projet

Les zones humides sont remarquables pour un bon nombre de fonctions écologiques : les fonctions hydrologiques (expansion des crues, soutien d'étiages...), biogéochimiques (contribution à l'épuration des eaux, production de ressources exportables telle que la biomasse...) et écologiques (éléments de réseaux biologiques, corridors...). Aujourd'hui, la démarche d'inventaire des zones humides est bien avancée en région Haute-Normandie. Par contre, la caractérisation et l'évaluation des fonctions des zones humides à l'échelle de l'estuaire de la Seine, nécessitent d'appréhender à grande échelle certaines caractéristiques difficilement observables sur le terrain en raison de leur variabilité temporelle. **L'inondabilité, qui correspond à un état submergé des terrains, quelle que soit l'origine de l'eau (ruissellement ou nappe alluviale), fait partie de ces variables.**

L'amélioration des connaissances de cette variable doit permettre de répondre aux besoins identifiés dans différents contextes d'analyse et de gestion des milieux naturels de la plaine alluviale de l'estuaire.

Le projet SIG « Habitats Fonctionnels » de l'estuaire de la Seine du GIP Seine-Aval (Bacq & al., 2011), vise notamment la structuration des données permettant la cartographie des milieux naturels au regard des différentes fonctions écologiques (en priorité habitats d'espèces) qu'ils supportent. Dans ce cadre, l'inondabilité est apparue comme un facteur structurant l'habitat de nombreuses espèces d'oiseaux. Cette information n'est actuellement pas disponible sur le territoire de l'estuaire et contribuerait donc à l'amélioration de cette démarche. Cette information contribuera également à l'amélioration des connaissances sur la caractérisation des habitats phytosociologiques, et donc éventuellement à étendre la démarche SIG à d'autres fonctions.

Le secteur de l'estuaire en aval de Tancarville et notamment celui de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine fait l'objet de nombreux conflits d'usages. La gestion de l'inondabilité des terrains par la Maison de l'estuaire doit tenter de concilier les diverses attentes des usagers tout en favorisant le rôle des habitats écologiques. Cette variable qui évolue naturellement selon les conditions hydro-météorologiques peut être modifiée par les aménagements réalisés par les différents usagers. La connaissance et le suivi dans le temps de cette variable apparaissent donc comme un enjeu important pour le gestionnaire.

Le projet « Inondabilité » vise donc à mobiliser de manière croisée différentes sources de données afin d'améliorer la cartographie de cette variable et l'analyse de son évolution dans le temps. Le secteur aval de l'estuaire a été retenu comme site atelier au regard des enjeux particuliers de gestion des zones humides dans ce secteur.

## 1.2.Rappels des résultats issus du volet Inondabilité par segmentation d'image satellite radar

Un premier volet de l'étude traitant de la spatialisation de l'inondabilité par télédétection radar polarimétrique a été mené en 2012 (ALLAIN-BAILHACHE S & al., 2013). Les méthodes de segmentation éprouvées par les auteurs dans d'autres projets ont été adaptées au secteur d'étude afin de délimiter les zones inondées sur une série de 5 images polarimétriques RADARSAT-2 de résolution 5m acquises entre mars et décembre 2012 sur le secteur aval de l'estuaire.

**Figure 1 Acquisitions RADARSAT-2 en 2012 (Marée au Havre, heure en TU)**

	Date	Faisceau	Orbite	Basse mer	Pleine mer	coefficient
1	14 mars	FQ27	Asc (17h57)	20:58	14:01	70
2	07 avril	FQ27	Asc (17h57)	17:17	22:19	112
3	01 mai	FQ27	Asc (17h57)	17:44	11:48	50
4	31 octobre	FQ30	Des (5h57)	5:09	10:20	83
5	03 décembre	FQ27	Asc (17h57)	19:13	12:08	67

Ces méthodes ont été enrichies au regard des contraintes connues liées à la présence de végétation. La détection de l'eau a notamment été améliorée à la fois dans les mares recouvertes de végétation dès la fin du printemps, mais également dans les prairies lorsque la hauteur de végétation devenait pénalisante. Ce volet a bénéficié d'une action d'acquisition de vérités terrain organisée par la Maison de l'estuaire et le PNRBSN permettant l'analyse critique et la validation des méthodes de segmentation des images satellites.

La segmentation opérée sur les cinq images satellites a permis de discriminer la carte du secteur en six classes décrite dans la Figure 3 et un exemple de résultat cartographique présenté en Figure 2.



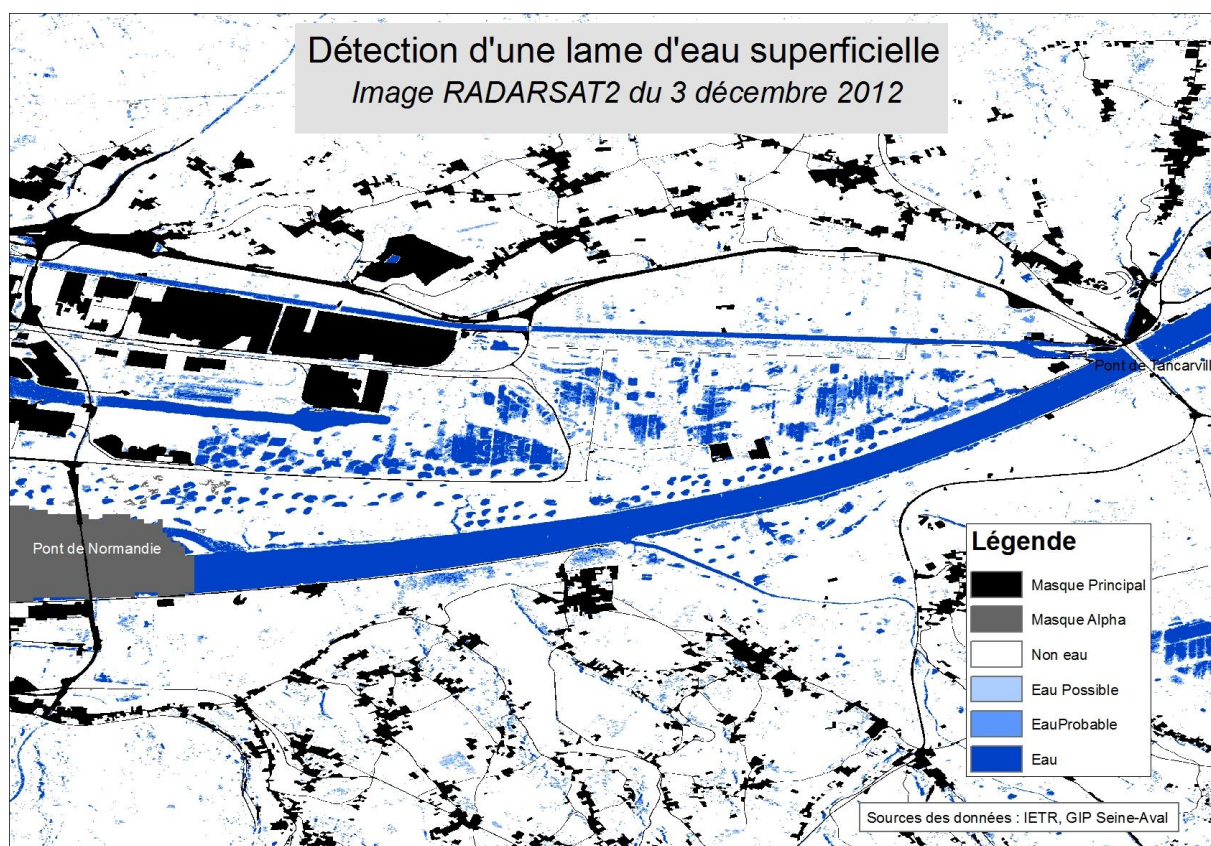


Figure 2 : Résultat de la segmentation pour l'image du 3 décembre

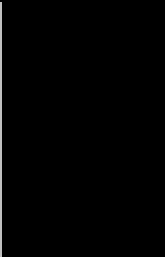


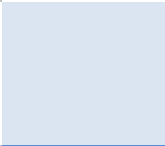


Classe	Couleur légende	Nom	Description technique
0		Masque Principal	Le masque est composé de : <ul style="list-style-type: none"> <li>Ombres et recouvrements RSO</li> <li>Angles d'incidence locale projetés inférieurs à 45° ou supérieurs à 52°</li> <li>Zone artificialisées selon la carte d'occupation des sols</li> </ul>
1		Masque $\alpha_1$	Pixels du masque $\alpha_1 < 15^\circ$ afin d'éliminer la majorité des champs nus labourés.
2		Non eau	Pixels non-détectés comme étant de l'eau
3		Eau possible (présence d'eau avec une probabilité forte)	La diffusion volumique est faible, par contre, le rapport diffusion double-rebond, diffusion de volume est inférieur à 0,7
4		Eau probable (présence d'eau avec une probabilité très forte)	Entropie de Shannon inférieure à -7 ou diffusion volumique faible (0,045) et rapport diffusion double-rebond, diffusion de volume supérieur à 0,7
5		Eau	Pixels détectés comme étant de l'eau

Figure 3 : Classe de segmentation de l'image satellite

La méthode permet grâce à la classe 5 un premier résultat très fiable (99%) sur la présence d'eau. Ensuite les incertitudes concernant les classes 2, 3, 4 sont les suivantes :

- La méthode ne détecte pas l'eau pour des emprises spatiales faibles (ex : fossé) en raison de la résolution des images acquises (5m). Ainsi, la classe 2 peut-être erronée si l'eau est présente à une résolution plus faible.
- La méthode ne détecte l'eau qu'à un taux de l'ordre de 80-90% lorsque l'eau n'affleure pas complètement la végétation donc sous les couverts végétaux trop denses (recouvrement supérieur à 20%) : ce type de détection correspond souvent à la classe 3. De l'eau sous un couvert végétal trop dense peut donc être parfois classée en Non eau.
- La méthode possède une incertitude beaucoup plus importante pour les végétations de haute tige (ex : roselière), ce qui correspond à la classe 4 lorsqu'elle est détectée. Ainsi, de l'eau sous végétation de haute tige est très souvent classée en non eau.

### 1.3.Objectif et méthode du volet analyse croisée

Les objectifs du volet « analyse croisée de différentes sources de données » de l'étude sont :

- Dans un premier temps d'affiner les résultats acquis dans le volet « télédétection satellitale » par la mobilisation de données complémentaires. Pour cela un sous-secteur d'étude a été retenu.
- De discuter de la représentativité des cartes obtenues pour des situations ponctuelles au regard du fonctionnement hydraulique général du secteur d'étude. L'objectif final étant de tenter une généralisation des résultats à un fonctionnement annuel type et ainsi commencer à apporter des éléments de réponse à la problématique générale.

Afin d'affiner les résultats des cartographies établies par le traitement des images satellites une approche complémentaire de cartographie de l'inondabilité a été développée. Cette approche dite « **inondabilité potentielle** » permet, par la simple analyse du niveau d'eau mesuré sur le terrain au regard de la topographie LIDAR, d'identifier comme potentiellement inondés les secteurs où l'altitude se situe en-dessous de ce niveau. Cette méthode a été opérée par secteur hydraulique au moment du passage du satellite donc en cinq dates.

Ensuite une analyse combinée des résultats des approches « satellite » et « potentielle » a été réalisée afin de tirer parti des avantages de chacune d'elle pour construire une carte optimisée de l'inondabilité au moment du passage du satellite. Ce travail s'est également appuyé sur l'ensemble des vérités terrain acquises en 2012.

La zone d'intérêt retenue pour le travail d'analyse croisée est située en rive droite de l'estuaire, entre le pont de Tancarville et le pont de Normandie et limitée au nord par le canal de Tancarville et au sud par la route de l'estuaire. Ce secteur fait l'objet d'importants enjeux de gestion des milieux naturels.

Il est alors apparu intéressant de porter l'effort sur ce secteur pour en tirer rapidement des bénéfices d'un point de vue opérationnel. D'autre part, il bénéficie entre autres de suivis en continu des niveaux d'eau au niveau des ouvrages de régulation de la connectivité hydraulique entre la Seine et ce secteur, information qui s'est avérée essentielle dans la démarche mise en œuvre par la suite. (voir § 2.1).

Le gestionnaire a divisé ce secteur en 5 secteurs hydrauliques sur la base de la connaissance des écoulements hydrauliques de surface permettant d'identifier des compartiments relativement indépendants.

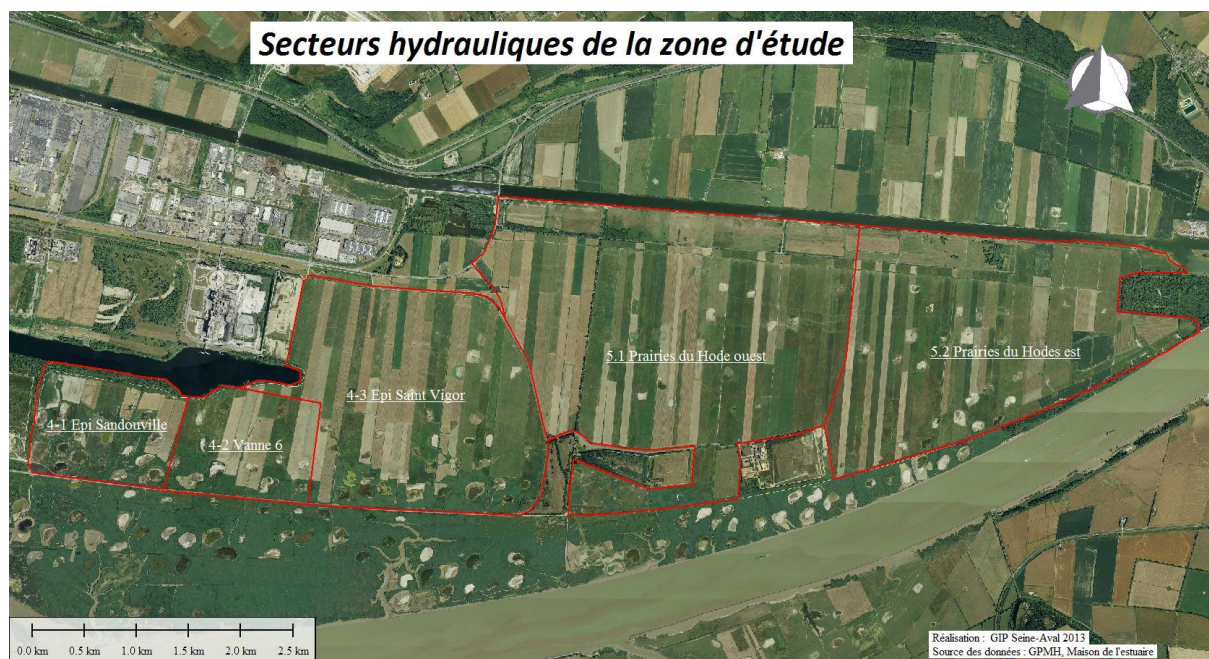


Figure 4: Secteurs hydrauliques de la zone d'étude

## 2. Construction des cartes d'inondabilité potentielle

### 2.1. Les niveaux d'eau par secteur et leur variabilité

Les mesures de niveau d'eau sont réalisées au sud de la zone d'analyse (zone topographiquement la plus basse des secteurs hydrauliques), au niveau des ouvrages contrôlant la perméabilité de la levée (route de l'estuaire).

Les appareils de mesures implantés sur le territoire de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine sont des sondes CTD mesurant, par différences de pression, les niveaux d'eau dans le réseau hydraulique en divers endroits. Un capillaire permet de compenser les changements de pression atmosphérique. Les données sont enregistrées au pas de temps horaire et sont envoyées par GSM tous les 24h dans les locaux du gestionnaire de la réserve. Quelques paramètres physiques sont également enregistrés (température et conductivité à partir de laquelle sont déduits la salinité et les sels totaux dissous). Lors de leur implantation, les appareils ont été calés à partir de repères référencés implantés sur le territoire d'étude par un géomètre de profession (précision



centimétrique en Z). Le calage des appareils est vérifié une fois par an (théodolite à partir des repères de calage) pour éviter toute dérive trop importante des appareils. L'incertitude sur les appareils de mesure porte donc sur la dérive potentielle dans le temps de la mesure, celle-ci est de l'ordre du centimètre selon les constatations faites lors des calages annuels, mais aussi sur l'incertitude portant sur la méthodologie de calage des appareils (report de point au théodolite) sachant que chaque repère de calage se situe à proximité immédiate de l'ouvrage (<100m). On peut estimer l'incertitude de la mesure donnée par ces appareils est de l'ordre de 3cm maximum.



*A gauche : sonde CTD et tête de communication ITC*

*A droite : Tête ITC*



**Figure 5: Illustration des appareils de télémessures**

L'hypothèse de départ pour la réalisation des cartes d'inondabilité potentielle est que si l'observation du niveau d'eau à cet endroit est réalisée à un moment où le plan d'eau dans les prairies au nord est stable, le niveau d'eau est admis comme représentatif du niveau sur l'ensemble du secteur hydraulique étudié.



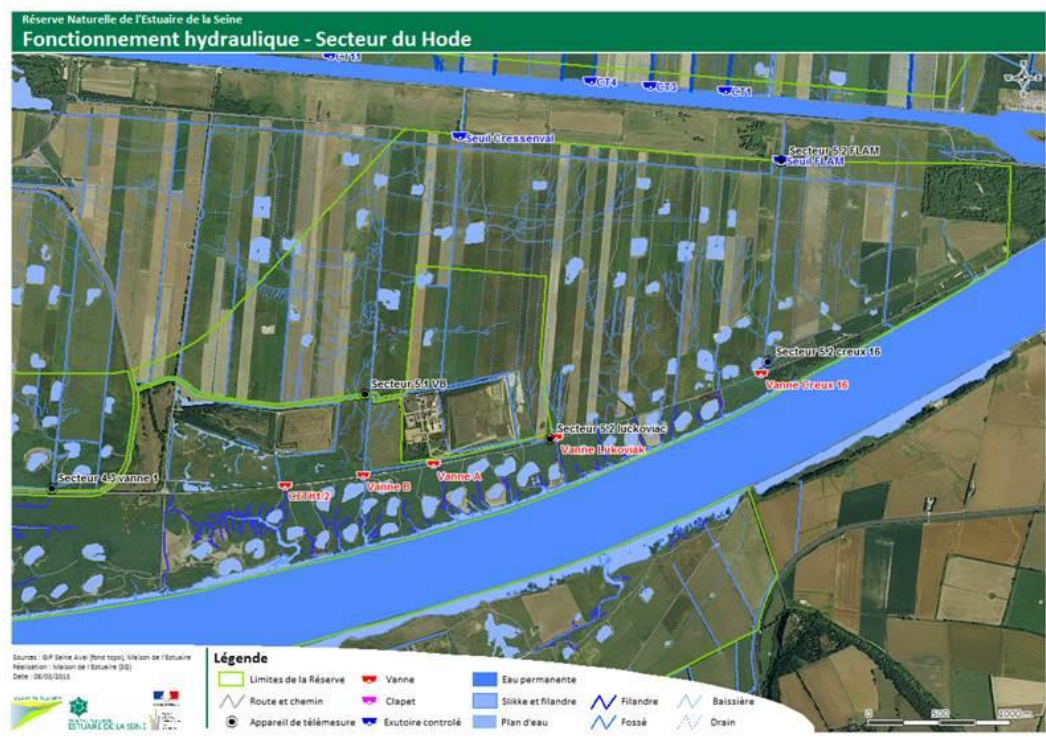


Figure 6 : Localisation des vannes et appareils de télémessures dans le secteur des prairies du Hode

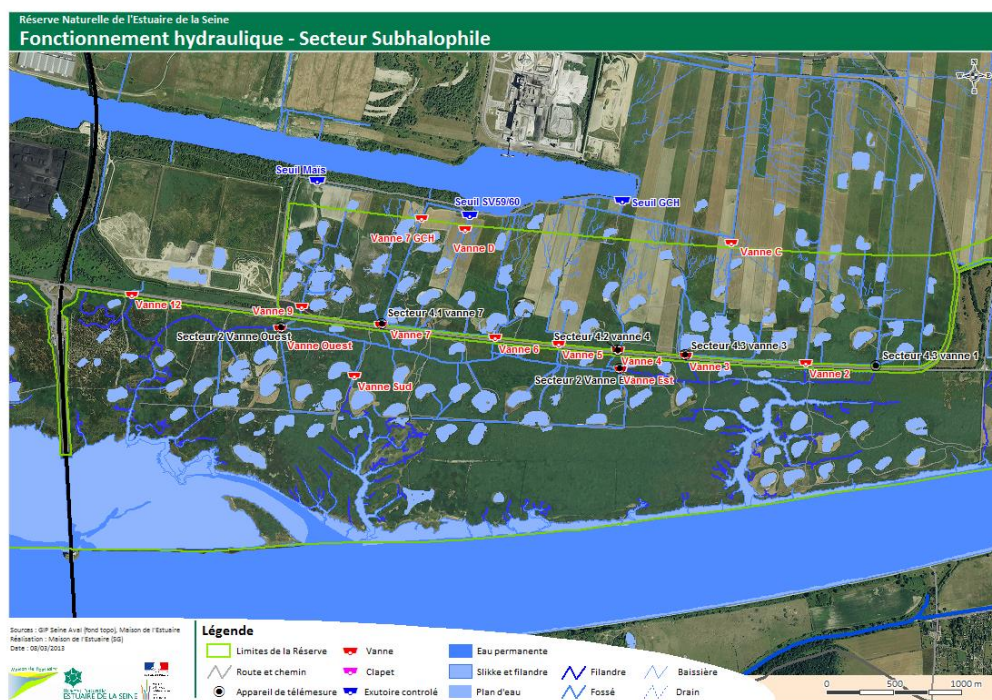


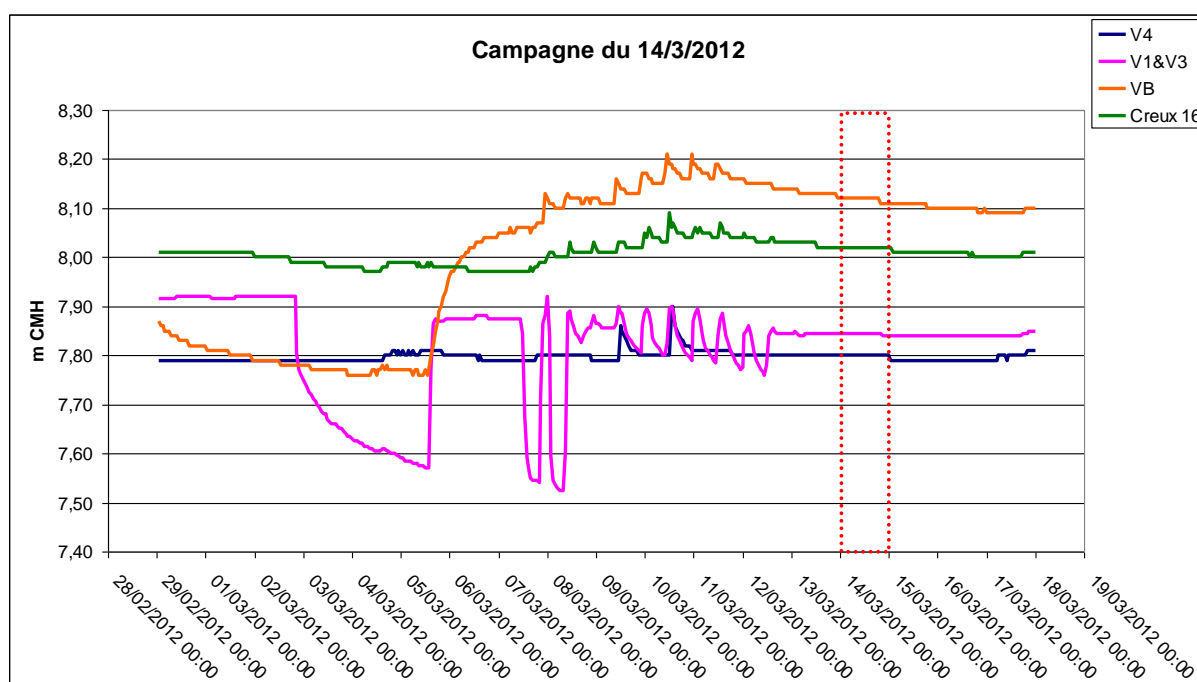
Figure 7 : Localisation des vannes et appareils de télémessures dans le secteur des prairies subhalophiles

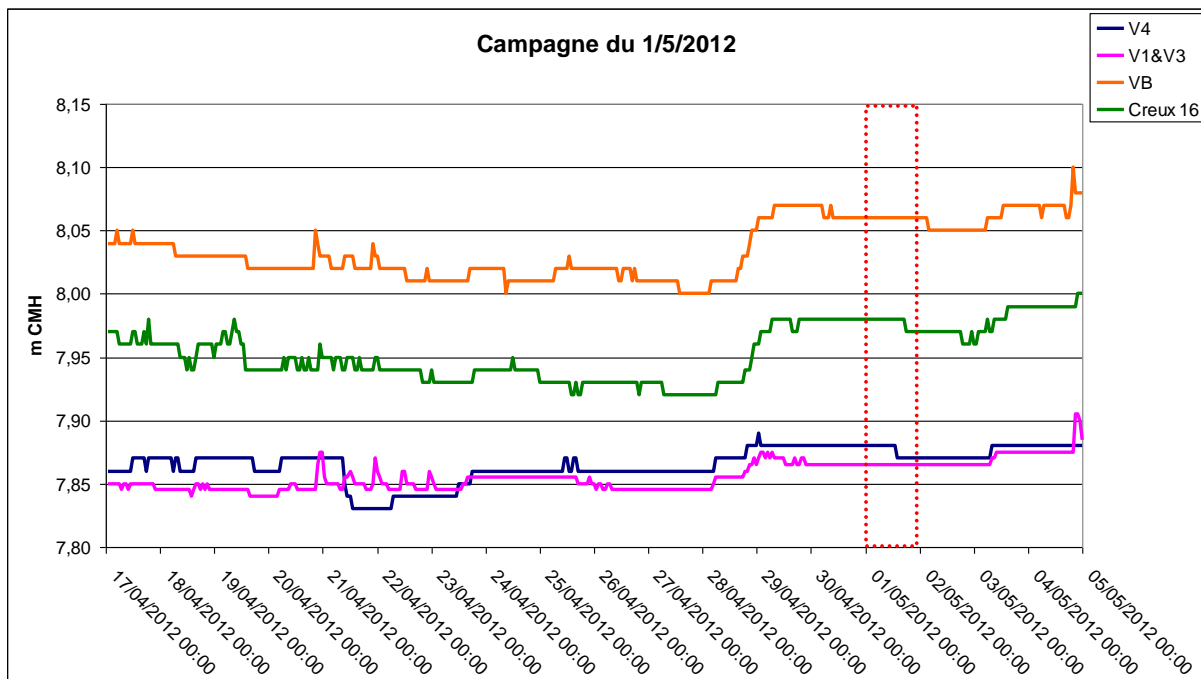
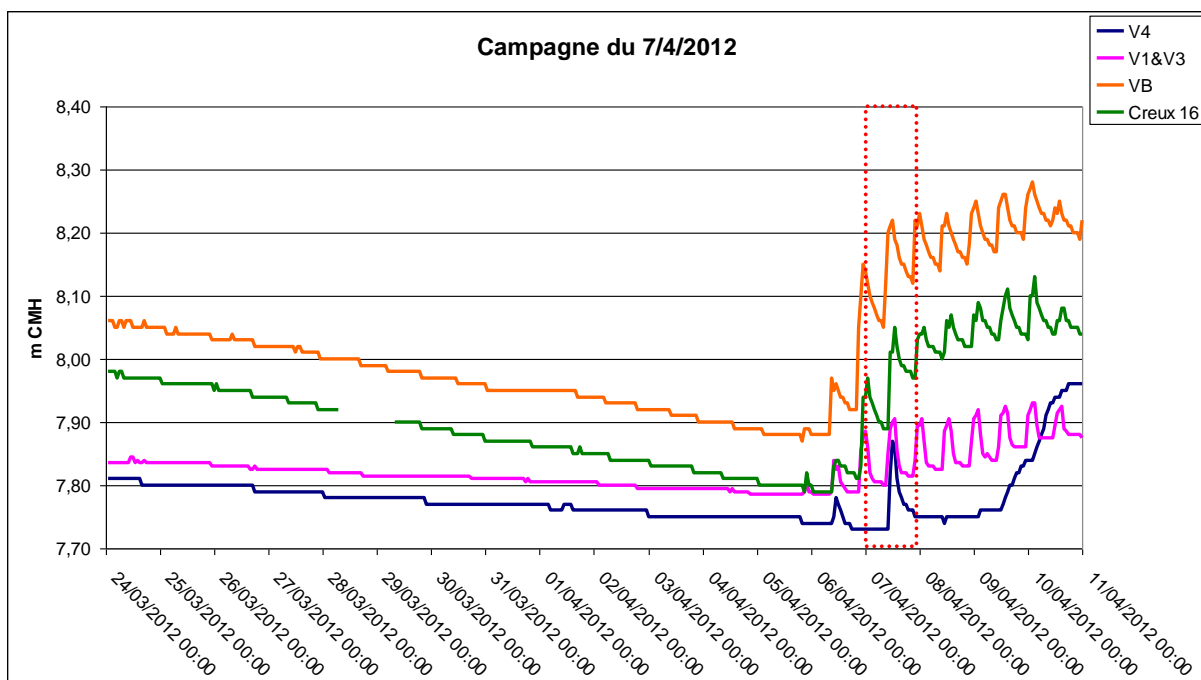
Une sélection des ouvrages représentatifs de chaque secteur a été réalisée au regard des données disponibles au moment du passage du satellite (voir Figure 8).

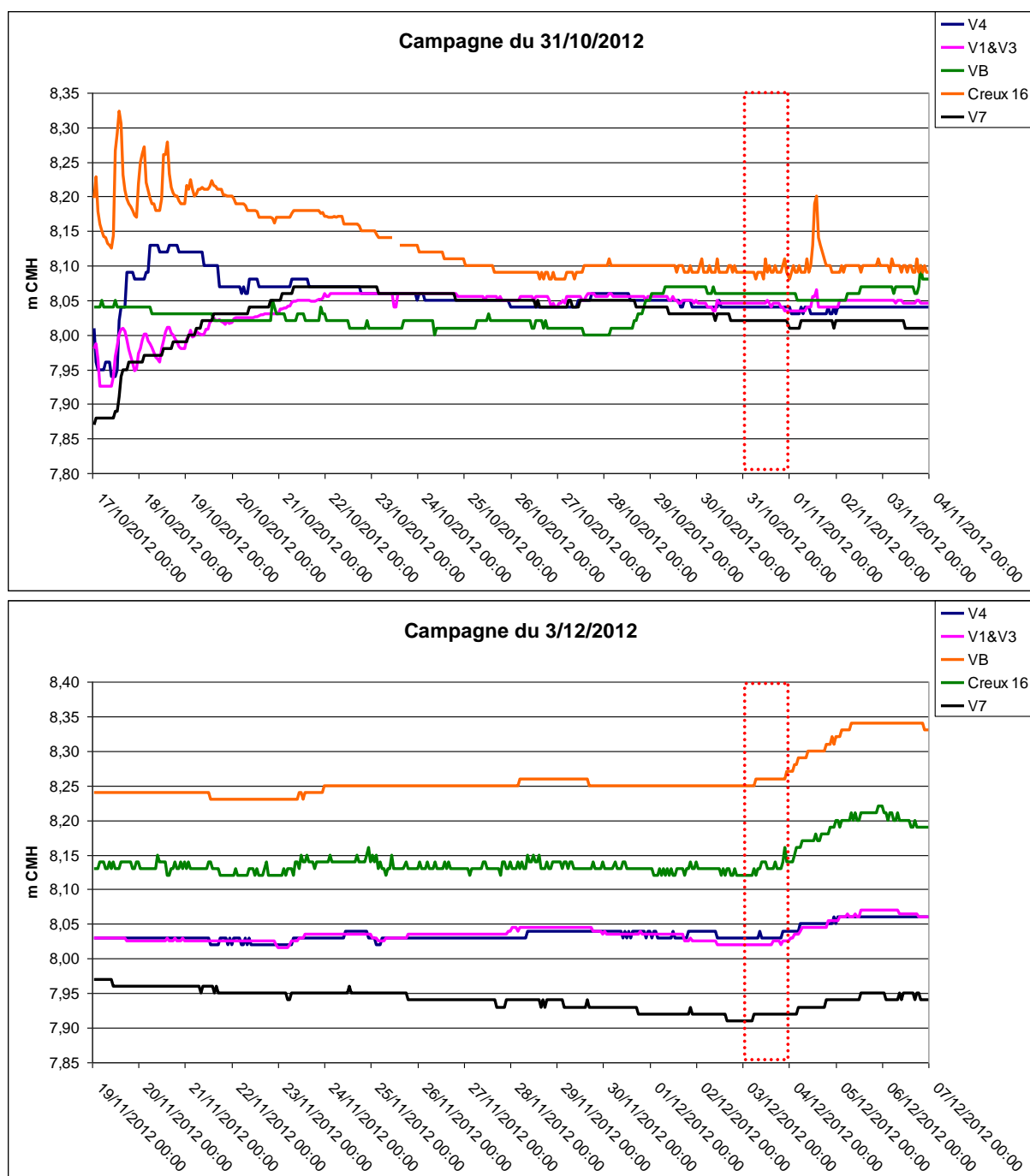
Secteur	Vannes	si pas de données vannes
4.1	V7	V4
4.2	V4	
4.3	moyenne V1 et V3	
5.1	VB	Vluck
5.2	Creux 16	

Figure 8 : liste des échelles limnométriques retenues pour l'observation du niveau d'eau dans chaque secteur hydraulique

L'analyse de la variabilité des données de niveau d'eau à chacun de ces ouvrages par rapport au moment du passage du satellite est nécessaire. Des graphiques des moyennes horaires des niveaux d'eau mesurés à chaque ouvrage ont été produits (voir Figure 9).







**Figure 9 : Evolution des niveaux d'eau mesurés sur les appareils sélectionnés pendant les différentes périodes d'étude.**

L'analyse de ces différents graphiques, représentant les niveaux d'eau de chaque secteur considéré dans le cadre de l'étude, permet d'expliquer les valeurs de l'altimétrie des plans d'eau retenue à chaque campagne. On notera que, pour mars, mai, octobre et décembre 2012 les plans d'eau sont stables les jours précédents la campagne d'acquisition de l'image satellite. **La valeur retenue pour chaque secteur correspond donc à la moyenne journalière des données horaires des appareils de télémessure retenue comme représentative du secteur.**



On notera l'apparition d'un nouvel appareil de télémessure, mis en place en septembre 2012. Celui-ci permet donc de disposer d'une donnée représentative du secteur 4.1 pour les campagnes d'octobre et décembre 2012.

La campagne d'avril est problématique compte tenu du fait que, le jour du passage du satellite, des entrées d'eau, via les marées, se sont faites sur les compartiments hydrauliques. Le plan d'eau ne peut être considéré, au regard de ces courbes, comme stable. Afin de permettre tout de même une analyse, les valeurs données pour les plans d'eau correspondent à la moyenne journalière dont ont été retirées les valeurs extrêmes (correspondant aux pics de marée). En effet, au moment de la marée les appareils mesurent l'onde de marée celle-ci s'étalant par la suite dans le réseau hydraulique. Un stockage d'eau se fait à chaque marée et peut déborder ponctuellement sur le terrain, mais cela reste difficilement quantifiable, ces expansions n'atteignent pas la cote du pic de marée, car s'étalent et s'équilibrent *in fine* avec le réseau hydraulique.

Sur la base de cette analyse, les hauteurs retenues comme représentatives des niveaux d'eau pour chaque secteur hydraulique au moment du passage du satellite sont répertoriées dans le Figure 10.

Secteur	14/03/2012	07/04/2012	01/05/2012	31/10/2012	03/12/2012
4.1	7.8	7.74	7.88	8.02	7.92
4.2	7.8	7.74	7.88	8.04	8.03
4.3	7.85	7.81	7.87	8.05	8.03
5.1	8.12	8.11	8.06	8.12	8.26
5.2	8.02	7.94	7.98	8.09	8.13

Figure 10 : niveaux d'eau (en CMH) retenus pour chaque secteur et chaque date analysée

La variabilité des mesures de niveaux d'eau aux périodes étudiées est faible et varie sur l'ensemble des secteurs d'étude de 7.74 à 8.26 CMH lors des dates analysées. L'incertitude sur les données topographiques mobilisées doit donc être faible pour permettre de rendre compte de ces faibles variations de niveau d'eau en termes d'emprise potentiellement inondable.

## 2.2.La topographie LIDAR et incertitudes

### 2.2.1. Optimisation du MNT à partir des données disponibles

Dans le type d'environnement étudié ici, deux limites importantes sont connues pour la constitution d'un MNT à partir de données LIDAR :

- La présence d'eau (mares, fossés, zone en contrebas inondés) : le système laser ne renvoie pas d'information pertinente sur l'eau.
- La présence de végétation haute et dense : selon la densité d'échos laser le sol sous la végétation peut être plus ou moins bien appréhendé et l'incertitude altimétrique est dans tous les cas plus importante que sur sol nu.

Le MNT utilisé dans ce cas d'étude a été construit à partir de 2 jeux de données LIDAR :

- Levé du GIP Seine-Aval de mars 2011 (Bacq, 2013).
- Levé du GPMH d'Aout 2011.

Effectivement, ces jeux de données ont des caractéristiques qui leur confèrent des avantages et inconvénients au regard de notre objet d'étude (voir Figure 11).

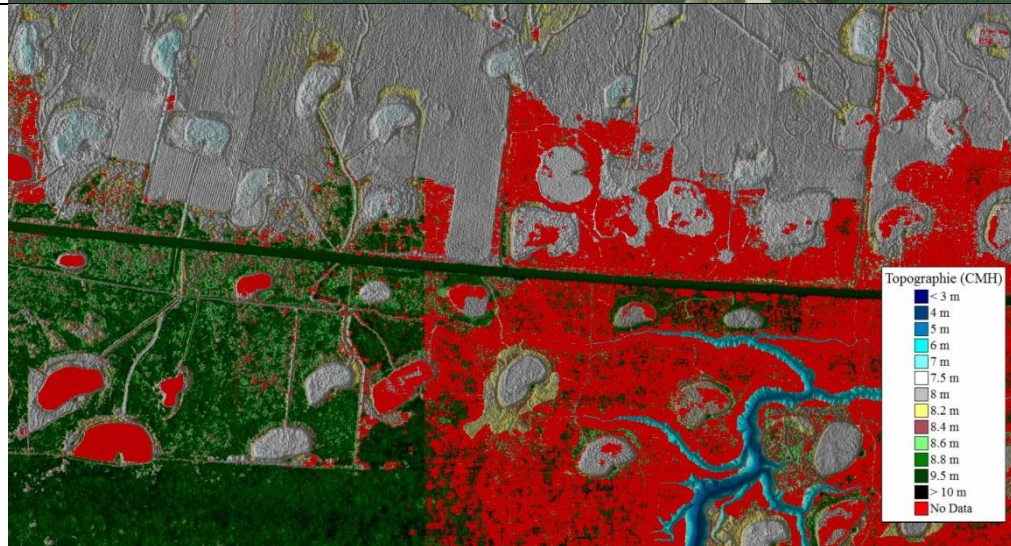
	Levé GIP Seine-Aval	Levé GPMH
	Mars 2011	Aout 2011
Contrainte liée à la présence d'eau	<b>Forte</b> en raison de la période d'acquisition et du mode de gestion hydraulique dans le secteur d'étude.	<b>Faible</b> en raison de la période d'acquisition.
Contrainte liée à la présence de végétation	<b>Moyenne</b> en raison de la période d'acquisition (fin de la période de coupe de la roselière)	<b>Forte</b> : pleine période végétative.
Stratégie pour filtrer la végétation dense.	Stratégie adaptée avec une densité d'écho laser renforcée (6 points au m <sup>2</sup> ), favorisant la pénétration du laser.	Pas de stratégie spécifique (2 points/m <sup>2</sup> ?).
Incertitude sur l'altimétrie	Contrôle qualité externe : EMQ* = 6cm sur route. <small>*EMQ = erreur quadratique moyenne</small>	Non connue.

Figure 11 : Caractéristique des deux levés LIDAR disponibles sur le secteur d'étude au regard des contraintes identifiées pour notre objet d'étude.

Les trois figures suivantes illustrent ces contraintes.

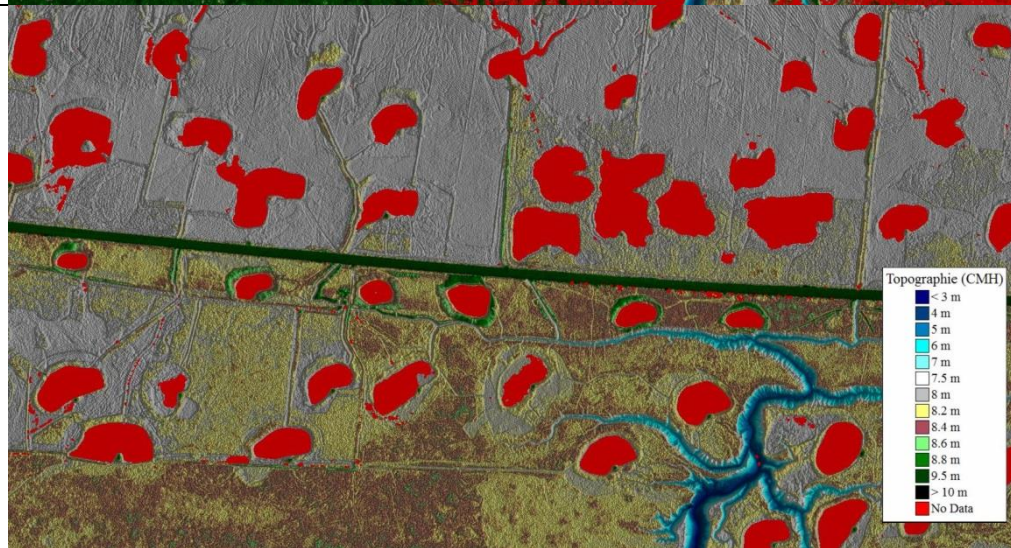


**Figure12:**  
ortho-  
photographie  
(Source GPMH,  
2011)



**Figure 13: MNT**  
issu du levé  
GPMH

Les zones  
végétalisées  
sont mal  
appréhendées  
par ce levé. A  
l'inverse, les  
plans d'eau  
sont souvent à  
sec, les zones  
inondées  
faibles.



**Figure 14 :**  
MNT issu du  
levé du GIP  
Seine-Aval

De nombreux  
secteurs  
inondés font  
l'objet d'un  
défaut de  
données et  
certains drains  
ne sont pas  
visibles.



Ainsi, un MNT optimal a été construit en tirant parti des avantages des deux jeux de données.

La méthode utilisée est la suivante :

- Mise en cohérence des deux jeux de données :

Pour cela, une analyse des différences de topographie entre les 2 jeux de données sur un sol nu a été réalisée. Un différentiel entre les deux MNT sur la route de l'estuaire a permis de mettre en évidence que le MNT du GIP Seine-Aval se situe en moyenne à 7 cm au-dessus du MNT du GPMH. Connaissant l'incertitude globale, du MNT du GIP Seine-Aval (voir § 2.2.2), il a été décidé de le garder comme référent en termes d'altimétrie. Ainsi, afin de rendre cohérentes ces deux sources de données, il a été choisi de modifier le MNT du GPMH, en majorant la valeur de son  $z$  de 7cm sur l'ensemble du secteur d'étude.

- Création d'un MNT optimal :

Pour cela, une combinaison des deux MNT a été réalisée en retenant en tout point la valeur de  $z$  la plus faible. Ainsi, le résultat obtenu tient compte :

- dans les zones végétalisées, la valeur du  $z$  obtenue avec le levé du GIP ;
- dans les drains, plans d'eau et autres zones inondées en mars lors du levé du GIP, la valeur du  $z$  obtenue avec le levé du GPMH ;
- dans les autres secteurs, la valeur du  $z$  de l'un ou l'autre des levés, mais quelles que soient celles retenues, elles sont très proches en raison de la mise en cohérence précédente.

Le résultat est illustré en Figure 15 et Figure 16.

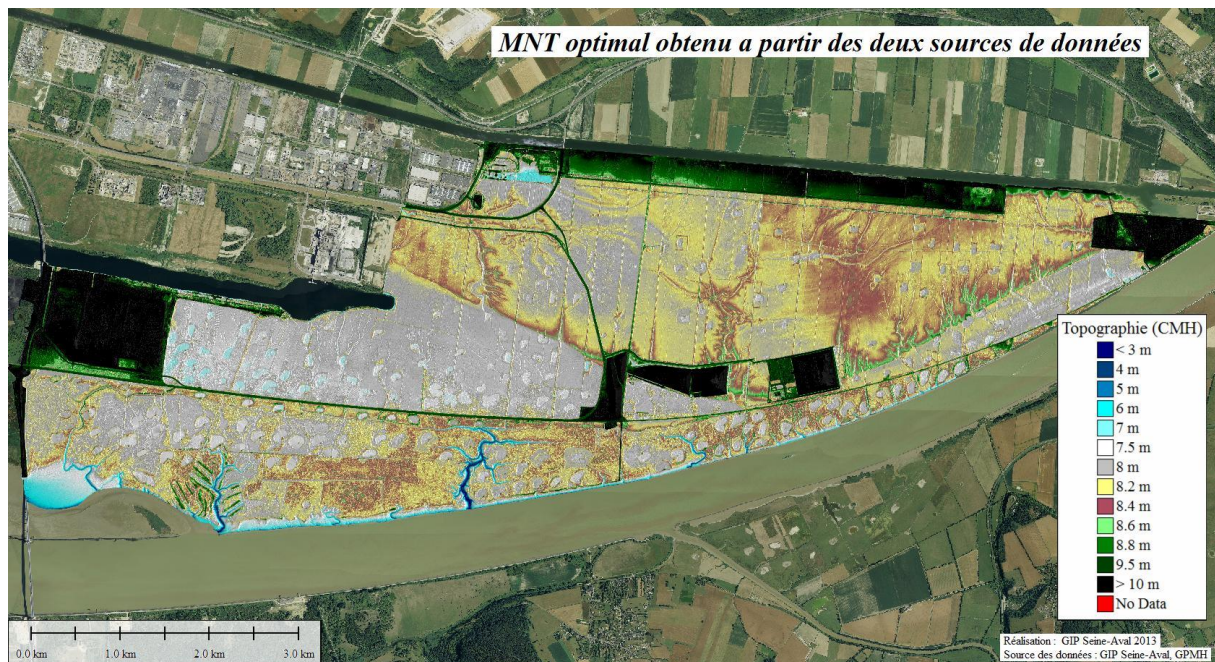


Figure 15 : MNT optimal du secteur d'étude





**Figure 16 : différence de topographie entre le MNT optimal et le MNT du GIP Seine-Aval**

La Figure 16 met bien en évidence l'amélioration de l'information topographique issue du levé LIDAR de mars 2011 (GIP Seine-Aval) dans les secteurs 4.1, 4.2 et 4.3 qui étaient en grande partie inondés à cette période. Effectivement, les différences de topographie indiquent une altitude plus faible pour le MNT optimal dans ce secteur.

### **2.2.2. Incertitude des données LIDAR**

Le levé LIDAR du GIP Seine-Aval a fait l'objet d'un contrôle qualité réalisé par l'IGN. Le contrôle de la précision du MNT a nécessité une acquisition de données terrain sous forme d'une trajectographie par GPS qui a été réalisée du 15 au 17 octobre 2012 et le 5 avril 2012. Deux types de points ont été mesurés à l'aide d'un système GPS Leica :

- ⇒ des points automatiques en trajectographie, avec l'antenne sur le toit du véhicule, paramétré à 1 point par seconde,
- ⇒ des points en lever manuels : soit des terrains de sport plats, soit des éléments caractéristiques du relief.

Les résultats de ce contrôle sont présentés pour l'ensemble de l'acquisition réalisée en 2011 dans le Figure 17.

Source : IGN, 2012	EMQ* 2011 (m)
Résultat de la trajectographie, $\Delta Z$ (50 000 oints)	0.062
Résultat mesure sur terrain de foot, $\Delta Z$	0.025
Précision planimétrique, $\Delta XY$	0.37

Figure 17 : mesure de l'incertitude du levé LIDAR GIP Seine-Aval (IGN, 2012)

Ce résultat permet de qualifier de manière précise l'incertitude de la topographie LIDAR sur terrain nu qui est donc de l'ordre de 6 cm.

En secteur végétalisé, il est plus difficile d'en établir une analyse statistique. Toutefois, le secteur d'étude a fait l'objet d'un levé par géomètre en 2008, avec notamment des transects dans les prairies étudiées. La différence entre la topographie donnée par le MNT optimal construit pour cette étude et ce levé de 2008 est présentée en Figure 18.

#### Différentiel topographique entre le MNT optimal et un levé réalisé par géomètre en 2008

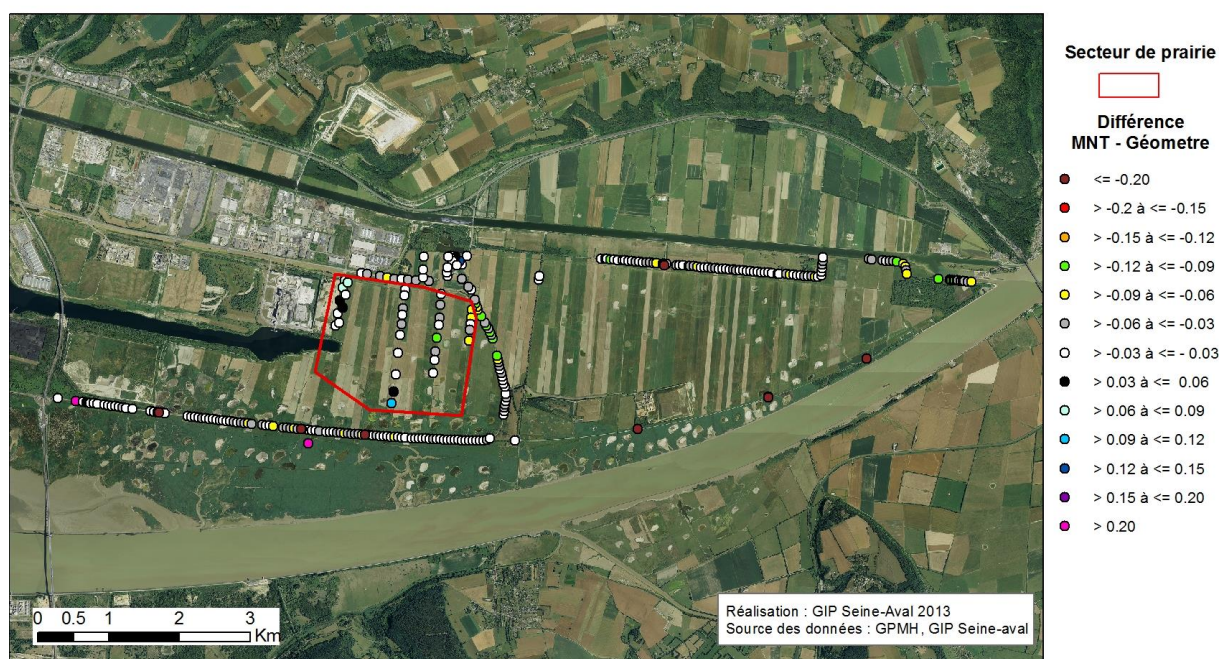


Figure 18 : différentiel topographique entre le MNT optimal et un levé de géomètre

Le décalage temporel entre les deux levés introduit un biais dans l'analyse, car ponctuellement des modifications du terrain naturel ont pu être opérées, ce qui rend délicate une analyse statistique fiable de ce différentiel. D'autre part, le nombre de points de contrôle est faible par rapport à la surface du secteur d'étude.

Toutefois, si l'on s'intéresse aux secteurs de prairie (polygone rouge sur la Figure 18), l'analyse statistique des écarts indique une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 5 cm (voir Figure 19).

	Résultat en m
moyenne	-0.006 m
max	0.100 m
min	-0.090 m
écart-type	0.041 m
EMQ	0.049 m

Figure 19 : Analyse de l'incertitude du MNT en secteur de prairie

En restant prudent au regard des limites de cette analyse précitées, il semble possible de considérer que l'incertitude des données LIDAR dans ce type d'environnement est inférieure à 10 cm et probablement proche de celle mesurée sur terrain nu, c'est-à-dire de l'ordre de 5-6cm. Un nombre de points plus important permettrait de fiabiliser ce résultat.

Cette incertitude devient plus importante sous couvert de végétation dense de type roselière, et n'est pas connue précisément dans ce type d'environnement.

S'il apparaît que l'incertitude altimétrique peut-être un frein à la bonne caractérisation d'une inondabilité potentielle, elle reste toutefois à l'échelle du secteur d'étude assez faible.

La méthode de cartographie de l'inondabilité potentielle apporte d'autres limites probablement plus pénalisantes que cette incertitude au regard de l'objectif fixé. Elles seront discutées dans la présentation des résultats.

### 2.3.Cartographies d'inondabilité potentielle.

Une procédure a été implémentée dans le logiciel GRASS SIG pour produire les données d'inondabilité potentiel à chaque situation étudiée (chaque date) en tenant compte des niveaux d'eau représentatif de chaque secteur hydraulique. Le résultat prend la forme d'un raster de résolution métrique avec une information binaire : eau / non eau.

Ce résultat est illustré pour la situation du 3 décembre 2012 dans la Figure 20.



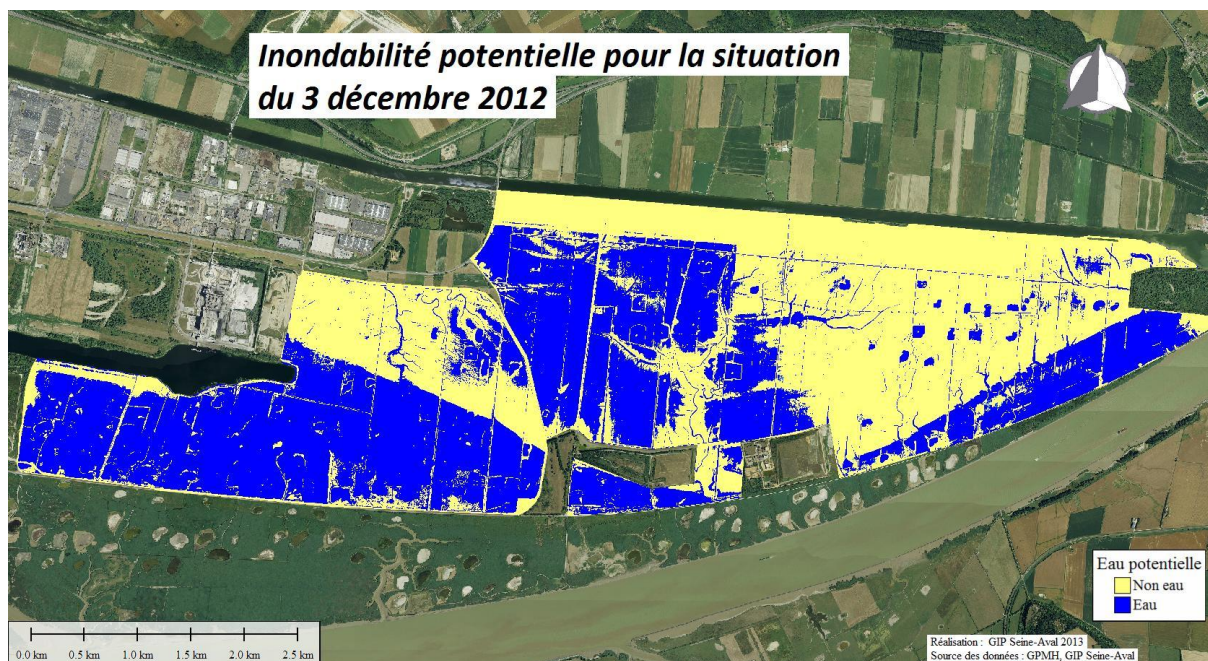


Figure 20 : Inondabilité potentielle pour la situation de décembre

L'intérêt de cette approche est de prendre en compte la précision qu'apporte le LIDAR en termes de micro-topographie. Ainsi, ici les morphologies de type fossé, baissière sont très bien représentées.

D'autre part, en chaque secteur où l'approche « potentielle » indique la présence d'eau, la hauteur d'eau théorique a été calculée :  $H_{eau} = \text{hauteur d'eau théorique du secteur} - \text{altitude LIDAR}$  (voir exemple de la Figure 21). Cette information sera mobilisée par la suite pour prendre en compte l'incertitude altimétrique du LIDAR.

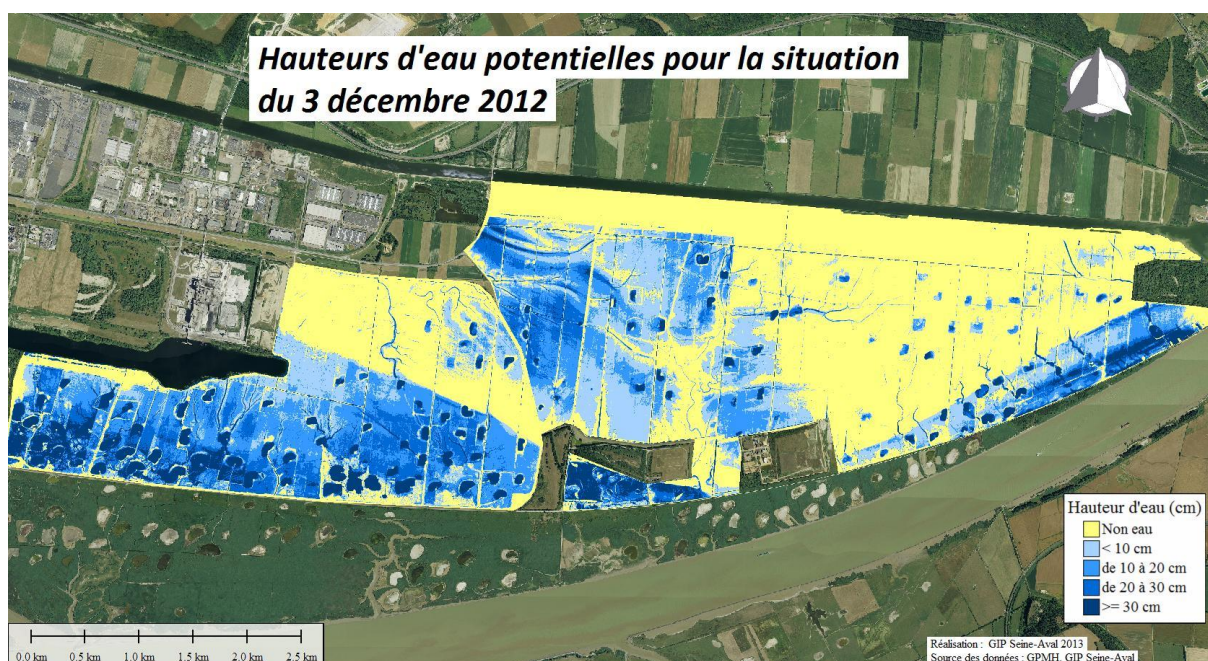


Figure 21 : Hauteurs d'eau potentielles pour la situation de décembre



Cette méthode de délimitation de zones inondées comporte les limites suivantes :

- L'incertitude sur les données altimétriques de l'ordre de 6 cm ajoutée à celle des niveaux d'eau de l'ordre 3 cm.
- L'hypothèse relative à la représentativité de la mesure au niveau d'un ouvrage par rapport à la stabilité du plan d'eau (voir § 2.1)
- La notion d'inondation potentielle inclut certains secteurs topographiquement sous le niveau d'eau qui peuvent être déconnectés d'un point de vue écoulement hydraulique de surface et donc non inondé.
- L'inondation peut exister alors que le niveau d'eau mesuré est trop bas, car il y a rétention d'eau de pluie, d'eau provenant d'une inondation précédente ou d'un apport d'une remontée par capillarité de la nappe de surface à un endroit particulier.

### 3. Combinaison des approches « satellite » et « potentielle »

#### 3.1.Principe d'analyse

Afin d'avoir un rendu cartographique reprenant de manière combinée les deux approches une nouvelle donnée a été produite permettant de rendre compte des similarités et différences entre les deux résultats. Dans cette analyse, l'information de hauteur d'eau potentielle n'est pas exploitée, elle est simplifiée en une information binaire : Eau ou Non eau. Le principe est illustré sur la Figure 22

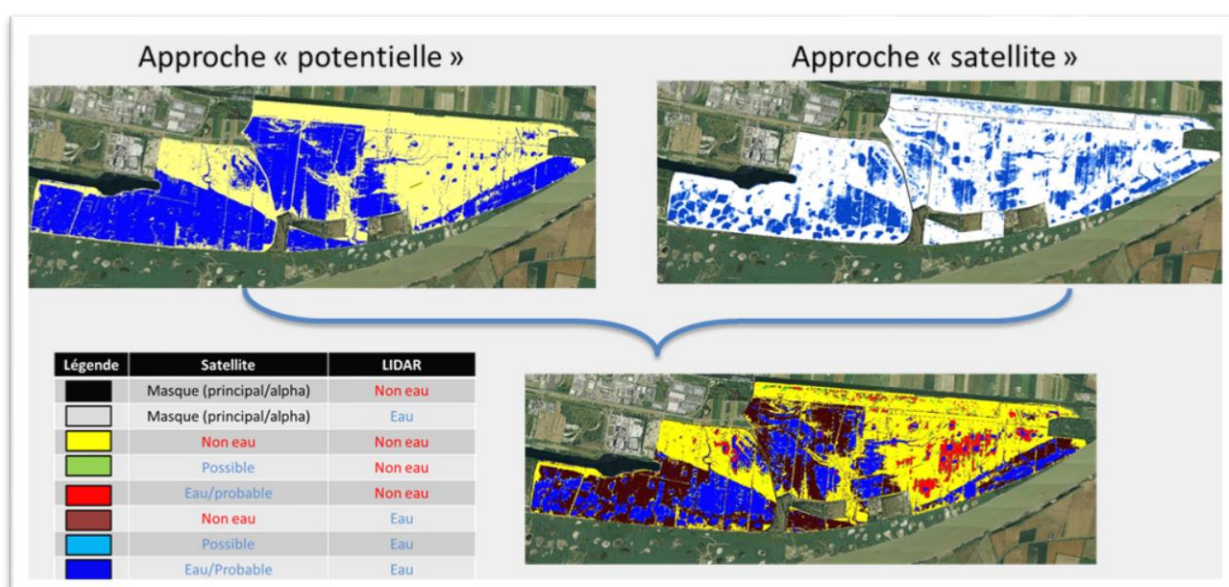


Figure 22 : Analyse combinée des résultats des deux approches de cartographie de l'inondabilité

Cette donnée combinée est intéressante pour mettre en évidence les secteurs où les résultats entre les deux approches diffèrent :

- Secteurs **vert** et **rouge** : l'approche satellite indique la présence (possible ou probable) d'eau alors que l'approche topographique ne l'indique pas.
- Secteurs **marron** : l'approche satellite n'indique pas de présence d'eau alors que l'approche topographique indique une présence potentielle.

Ensuite les zones où les résultats sont similaires :

- Secteurs **bleu** : les approches indiquent une bonne cohérence entre les deux approches sur la présence d'eau
- Secteurs **Jaune** indiquent les secteurs avec une bonne cohérence sur l'absence d'eau.

Cette carte combinée a servi de support à la synthèse des résultats, en confrontant avec des vérités terrain et en mobilisant l'expertise du gestionnaire : la Maison de l'Estuaire. L'analyse a débouché sur des hypothèses simplificatrices pour produire des cartes de synthèses de l'inondabilité pour les 5 situations étudiées.

### 3.2.Hypothèses retenues pour les cartes de synthèse

La carte de synthèse avait pour objectif de délimiter les zones inondées en tenant compte de l'incertitude des méthodes utilisées dans ce projet, en ne retenant que 3 niveaux d'information :

- classe 0 = pas d'eau affleurant (le sol peut être saturé)
- classe 1 = « Eau fortement probable » : eau sûr ou très fortement probable
- classe 2 = « Eau possible » : eau probable mais l'incertitude est plus importante (au regard des incertitudes issues des 2 approches)

Les hypothèses qui ont permis cette synthèse sont les suivantes :

- Au regard des conclusions du volet cartographie à partir d'image satellite, l'ensemble des secteurs considérés en « Eau » ou « Eau probable » ont été attribué à la classe 1 quelques soit le résultat de l'approche potentielle.
- En ce qui concerne les secteurs considérés comme « possible » (approche satellite), s'ils sont également identifiés comme potentiellement en eau (approche potentielle), ils ont été classés également en classe 1. Au contraire, si ces secteurs ne sont pas identifiés comme potentiellement en eau, ils ont classés en classe 2, c'est-à-dire avec un niveau d'incertitude.
- Pour les secteurs identifiés comme « Non eau » (et également comme des masques) par l'approche satellite plusieurs cas se posent au regard des résultats de l'approche par l'inondabilité potentielle :
  - Non eau également : alors les deux approches sont cohérentes, les secteurs sont classés en classe 0.
  - Eau potentielle : deux nouveaux cas ont été considérés pour tenir compte des incertitudes liées à l'approche par inondabilité potentielle :
    - Si la hauteur d'eau potentielle est > 20 cm : alors le secteur est un point bas il est très probablement en eau et est donc classé en classe 1

- Si la hauteur d'eau potentielle est < 20 cm : alors, au regard des incertitudes sur les niveaux et la topographie notamment, le secteur est classé en classe 2

Le choix des 20 cm est assez subjectif et repose sur l'analyse qualitative des résultats au regard des vérités terrain et de l'expertise du gestionnaire.

Ces hypothèses sont reprises dans le Figure 23.

Légende carte	Satellite	LIDAR
Transparent	Masque (principal/alpha)	Non eau
Transparent	Non eau	Non eau
	Possible	Non eau
	Non eau ou masque	Eau < 20 cm
	Non eau ou masque	Eau > 20 cm
	Eau/probable	Non eau
	Eau/probable/possible	Eau

Figure 23 : Hypothèses de simplification des résultats de l'analyse combinée

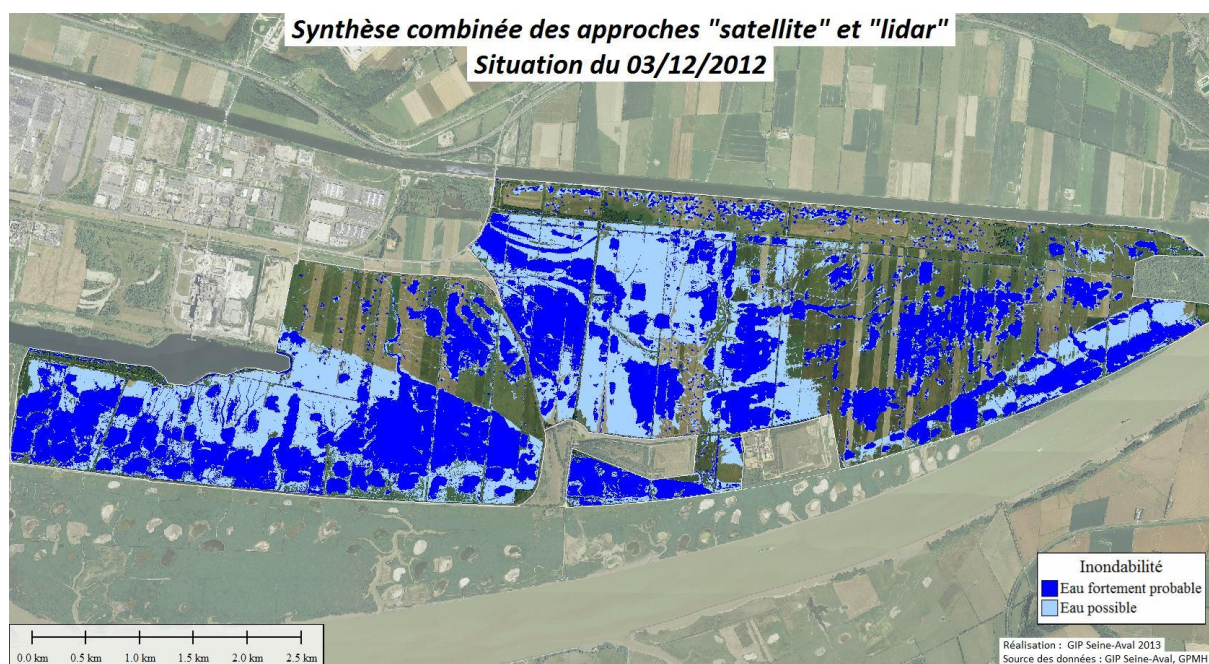
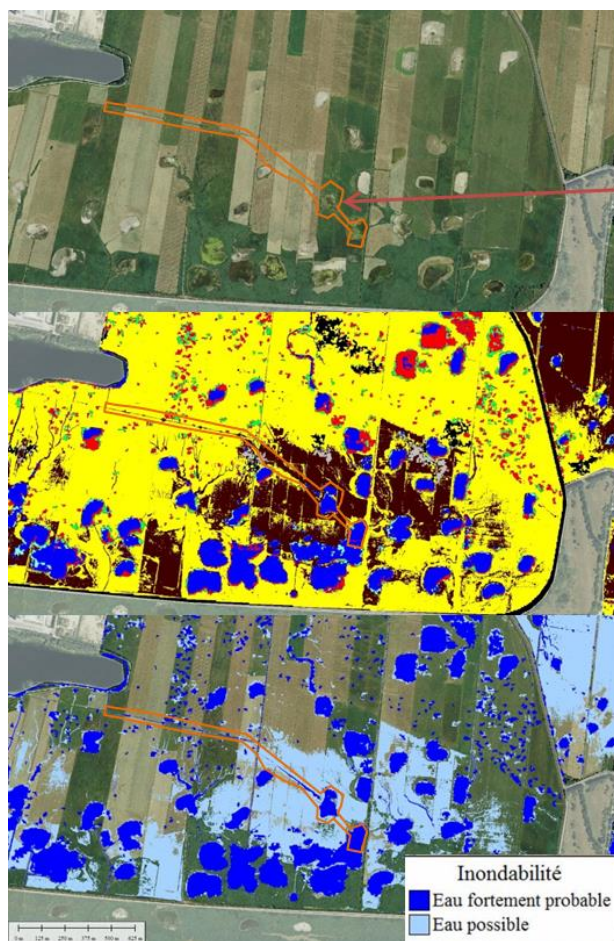


Figure 24 : carte de synthèse des analyses combinées pour la situation de décembre.

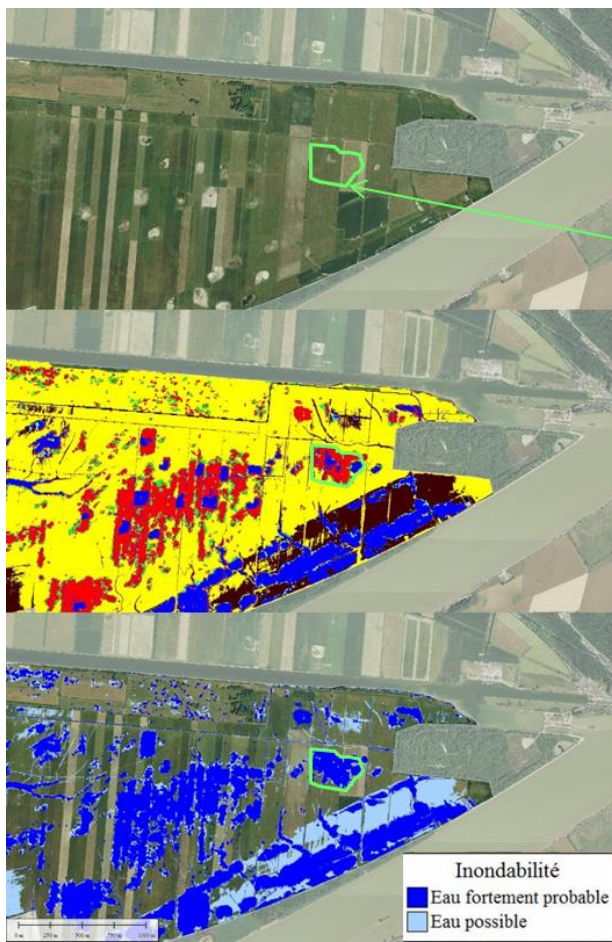


#### 4. Illustration des résultats au regard des vérités terrain



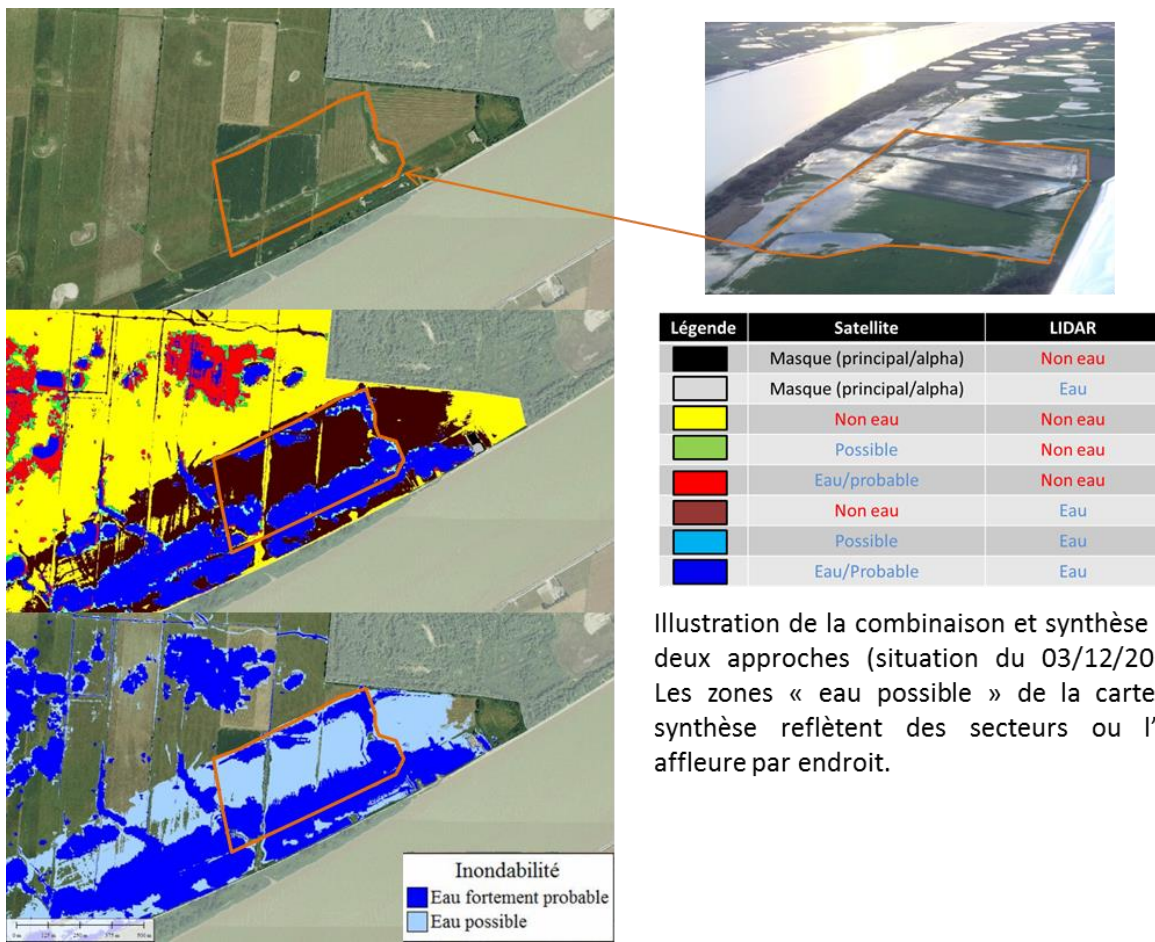
Légende	Satellite	LIDAR
	Masque (principal/alpha)	Non eau
	Masque (principal/alpha)	Eau
	Non eau	Non eau
	Possible	Non eau
	Eau/probable	Non eau
	Non eau	Eau
	Possible	Eau
	Eau/Probable	Eau

Illustration de la combinaison et synthèse des deux approches (situation du 13/03/2012). Ici, l'intérêt de la haute résolution des données LIDAR est mis en évidence par une meilleure prise en compte des fossés.



Légende	Satellite	LIDAR
	Masque (principal/alpha)	Non eau
	Masque (principal/alpha)	Eau
	Non eau	Non eau
	Possible	Non eau
	Eau/probable	Non eau
	Non eau	Eau
	Possible	Eau
	Eau/Probable	Eau

Illustration de la combinaison et synthèse des deux approches (situation du 03/12/2012). Ici la méthode à partir du LIDAR ne fonctionne pas et l'apport du satellite permet de bien prendre en compte cette zone en eau.



## 5. Discussion sur la représentativité des situations observées dans le contexte de la gestion des niveaux d'eau dans la RNNES.

Dans les secteurs compartimentés ici étudiés, le gestionnaire de la réserve applique un cahier des charges des niveaux d'eau répondant à la fois aux exigences écologiques de chaque secteur, mais aussi aux besoins des usagers (agriculteur, chasseurs, coupeurs de roseaux). Ce plan d'action ne traduit pas forcément la réalité de terrain et chaque année le gestionnaire doit composer avec les cycles des marées et les conditions climatiques.

Dans un cadre général, les principes de gestion s'appliquant à l'ensemble de la réserve sont les suivants :

- La période hivernale se caractérise par le maintien de niveaux d'eau hauts jusqu'au printemps. Jusqu'aux marées de vives eaux du mois de mars, un niveau d'eau haut est à rechercher et à maintenir, par apport d'eau, à chaque marée de vives eaux. La cote de niveau haut correspond à un maximum et a été définie en fonction de la superficie inondée, de la diversification des gradients d'inondation et de la connaissance de terrain. Ainsi **la campagne de décembre 2012 correspond à cette situation** : niveau d'eau haut atteint et maintien de celui-ci, le pan d'eau étant stabilisé les excédents d'eau sont directement évacués en Seine.



- Les marées de vives eaux de mars constituent le point clé à partir duquel doit commencer le ressuyage progressif naturel, ou « maîtrisé » en fonction du secteur hydraulique. Jusqu'au niveau d'eau estival fixé, et cela à chaque marée de vives eaux, le niveau d'eau ne pourra pas être supérieur après le cycle de marée au niveau d'avant ce cycle, une période de ressuyage après marée est cependant à prévoir. Elle est fonction de la section d'écoulement sous les digues (route de l'estuaire, chemin de halage). Le marnage temporaire est accepté en tant que variable naturelle (hors conditions extrêmes ayant un impact significatif sur l'avifaune nicheuse), il permet également le transfert de flux au sein de la réserve. **Cette situation correspond à la campagne de mars 2012**, les vives eaux (entre le 7 et le 13) ont permis un remplissage de certains secteurs, qui font l'objet d'une exploitation commerciale de la roselière et donc d'un abaissement des niveaux d'eau en fin d'hiver. Il est nécessaire de revenir alors à un niveau d'eau haut (stockage des marées de vives eaux) pour le début d'un ressuyage du marais (période de nidification) au printemps. On notera qu'en avril les marées ont pénétré également sur les secteurs étudiés allant à l'encontre de ce qui a été présenté précédemment, cela s'explique par les conditions particulières de l'année où il a fallu permettre un stockage de l'eau face aux vidanges intempestives réalisées par certains usagers afin de maintenir de bonnes conditions d'accueil pour l'avifaune nicheuse.
- Le ressuyage printanier des terrains est fonction des conditions météorologiques annuelles. En cas d'année sèche, où les niveaux baisseraient naturellement de façon plus prononcée que celle prévisible pour une année moyenne, un rattrapage des niveaux d'eau pourra se faire à partir du moment où ils ne concerneront que la section hydraulique des fossés (pas de débordement et d'inondation). En année humide, en fonction des objectifs des secteurs hydrauliques et des ouvrages structurant en place, une régulation peut être envisageable. Les conditions extrêmes météorologiques (sécheresse, année humide) seront des conditions naturelles à accepter. Si des ajustements doivent se faire, ils auront pour objectif principal le maintien de la biodiversité sur le territoire de la réserve. **La campagne du mois de mai représente cette situation**, le niveau d'eau évoluant naturellement en fonction des conditions météorologiques
- Le niveau d'eau estival correspond à un niveau minimal à maintenir dans le réseau hydraulique, sans que celui-ci ne déborde. Il permet de garantir la vie aquatique. Ce niveau pourra être rattrapé par manipulation de vannes par le gestionnaire afin de garantir l'équilibre écologique sans impacter les usages. **Cette situation n'a pas été étudiée dans le cadre de cette étude.**
- A partir des marées de vives eaux du mois d'août, la recharge du réseau hydraulique débutera. Cette recharge sera progressive. Une inondation effective des marais endigués n'est attendue qu'à partir des mois de novembre / décembre en fonction des conditions météorologiques annuelles. **La campagne du mois d'octobre correspond à cette situation**, chaque marée de vives eaux est utilisée pour permettre d'atteindre le niveau d'eau haut en décembre.

## 6. Bilan de l'étude et perspectives

Au final, cette étude a permis une mise en commun de données techniques, d'expertises de terrain et de compétences en télédétection et traitement de l'information géographique permettant de rationaliser la connaissance sur l'inondabilité des terrains. Il en ressort une bonne appropriation par les gestionnaires des milieux des apports et limites de la télédétection (satellite et LIDAR) pour l'analyse de cette variable.

Les résultats obtenus sur les cinq situations observées permettent d'obtenir une bonne vision de l'inondabilité pour ces cas ponctuels. Les zones où l'incertitude est plus grande pourront faire l'objet de contrôle sur le terrain dans des conditions hydrologiques proches afin de préciser l'information. Cette méthode, combinant images satellite et lidar, ne peut être employée que dans des secteurs où la connaissance et le suivi de niveaux d'eau sont bien maîtrisés, ce qui est une limite importante pour sa généralisation. D'autre part, le coût des images satellites ne permet pas de mettre en place un suivi de la problématique avec ce type d'image. Une approche similaire avec des images radar moins précises (moins cher) limite fortement l'apport de la télédétection par satellite radar. D'autres types d'image pourraient apporter des éléments d'information complémentaires.

Les problématiques de gestion et de compréhension du fonctionnement écologique de ce secteur nécessitent de prendre en compte des durées d'inondations (par an, par saison...). Ainsi, au-delà des cartes ponctuelles, il apparaît maintenant nécessaire de rendre compte des situations intermédiaires de niveaux d'eau non observées pendant cette étude et ceci afin de répondre aux objectifs initiaux. L'approche « potentielle », basée sur la connaissance fine de la topographie et des niveaux d'eau mesurés par secteur, permet d'être extrapolée à une série de données continue de suivi des hauteurs d'eau et ainsi de calculer une durée d'inondation potentielle des terrains. La présente étude a montré les limites de ce type d'approche pour certaines des situations observées. Une analyse plus fine, par secteur, des conditions hydrologiques pour lesquelles cette approche n'a pas fonctionné (défaut identifiée par les vérités terrain et traitement des images satellites) pourrait permettre de rendre compte de zones où le calcul de ces durées semblent sujet à une importante incertitude. Afin de fiabiliser l'information sur les durées d'inondation, il paraît ensuite inévitable de faire intervenir d'autres approches (modélisation hydrologique notamment), approches qui bénéficieront des résultats du présent projet pour être mises en œuvre.

## Bibliographie

ALLAIN-BAILHACHE S., LESSARD-FONTAINE A., 2013, **Amélioration des connaissances sur l'inondabilité de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine par télédétection satellitale radar**, Etude pour le GIP Seine-Aval, 76 p.

Bacq N., Guillerme D., 2011. **SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine : objectifs, hypothèses et premiers résultats**. Rapport du projet BEEST. 75p.

IGN, 2012, **Evaluation d'un MNT partenaire-MNT du GIP Seine-Aval**, 23p.

Bacq N., 2013, **Projet LIDAR Estuaire de la Seine. Acquisition, contrôle qualité et produits disponibles**. Rapport d'études du GIP Seine-Aval. 41p.



## ANNEXE : Ensemble des cartes produites pour les cinq situations étudiées.

