

CONVENTION ÉTUDE 2012

**«Amélioration des connaissances sur l'inondabilité de la plaine
alluviale de l'estuaire de la Seine par télédétection satellitale radar»**

Rapport final

31 mars 2013

Sophie ALLAIN-BAILHACHE, Audrey LESSARD-FONTAINE

Sommaire

1	Description du projet et objectifs	5
1.1	Rappel de la problématique	5
1.2	Priorisation des objectifs	5
2	Données	6
2.1	Imagerie RADAR polarimétrique (RADARSAT-2)	6
2.2	Données terrain	7
2.3	Données auxiliaires	7
2.3.1	MNT LIDAR à résolution métrique	7
2.3.2	Données d'occupation des sols	8
2.3.3	Données Météorologiques	9
3	Prétraitement des images radar	9
3.1	Géométrie radar	10
3.2	Information polarimétrique	10
3.3	Filtrage des images radar	11
3.4	Projection au sol de l'image	12
3.5	Masque ombres et recouvrements	12
4	Segmentation	13
4.1	Entropie de Shannon	14
4.2	Méthode de segmentation	14
4.3	Ajustement de la méthode	15
4.4	Validation du seuil à -8,4 dB	16
5	Résultats	18
5.1	Image du 14 mars	19
5.1.1	Détection sur la zone entière	19
5.1.2	Etude détaillée de sites	22
5.2	Image du 07 avril	24
5.2.1	Détection sur la zone entière	24
5.2.2	Etude détaillée de sites	26
5.3	Image du 01 mai	27
5.3.1	Détection sur la zone entière	27
5.3.2	Etude détaillée de sites	29

5.4	Image du 31 octobre	29
5.4.1	Détection sur la zone entière	30
5.4.2	Etude détaillée de sites	33
5.5	Image du 3 décembre	34
5.5.1	Détection sur la zone entière	35
5.5.2	Etude détaillée de sites	37
5.6	Tableau récapitulatif	38
5.7	Limitations	39
5.7.1	Eau sous végétation	39
5.7.2	Champ nus labourés	40
6	Évolution de la méthodologie	41
6.1	Masque des champs nus (masque α_1)	41
6.2	Amélioration de la détection de l'eau	42
6.3	Nouvelle méthode de segmentation	44
7	Résultats de la nouvelle segmentation	46
7.1	Image du 14 mars	46
7.1.1	Détection sur la zone entière	46
7.1.2	Etude détaillée de sites	47
7.2	Image du 07 avril	49
7.2.1	Détection sur la zone entière	49
7.2.2	Etude détaillée de sites	51
7.3	Image du 01 mai	52
7.3.1	Détection sur la zone entière	52
7.3.2	Etude détaillée de sites	54
7.4	Image du 31 octobre	55
7.4.1	Détection sur la zone entière	55
7.4.2	Etude détaillée de sites	57
7.5	Image du 3 décembre	59
7.5.1	Détection sur la zone entière	59
7.5.2	Etude détaillée de sites	62
7.6	Tableau récapitulatif	63
8	Dégradation de l'information polarimétrique	64
8.1	Dual Polarisation	64
8.2	Single Pol	66

9	Résultats de la dégradation de l'information polarimétrique	68
9.1	Par zone	68
9.1.1	Polarisation Double	68
9.1.2	Polarisation simple	70
9.2	Par site	73
10	Conclusion	76

1 Description du projet et objectifs

1.1 Rappel de la problématique

Les zones humides sont remarquables pour un bon nombre de fonctions : 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.

Dans le cadre du développement du SIG « Habitats Fonctionnels » de l'estuaire de la Seine, qui s'intéresse aux fonctions écologiques des habitats pour trois grands groupes faunistiques : avifaune, poissons et invertébrés aquatiques, 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 à étendre la démarche SIG à d'autres fonctions.

Cette étude porte sur la spatialisation de l'inondabilité et son évolution temporelle sur l'ensemble de la Réserve Naturelle de l'estuaire de la Seine par télédétection radar polarimétrique. Elle vise à apporter une information facilitant la compréhension du fonctionnement global du secteur. Le suivi, à terme, des effets des aménagements sur ce secteur pourrait tirer parti d'un suivi de l'inondabilité des terrains par télédétection satellitaire. Dans ce même secteur, une gestion des niveaux d'eau dans les prairies et marais est établie pour maintenir certains usages tout en favorisant le rôle écologique des habitats. L'information sur l'inondabilité des terrains est une information stratégique qu'il apparaît important d'établir de manière rationnelle et qui en particulier intéresse la Maison de l'Estuaire dans son rôle de gestionnaire de la réserve.

1.2 Priorisation des objectifs

Les échanges sur les coûts des images et la problématique d'inondabilité du secteur ont conduit à fixer comme objectif prioritaire le suivi de l'inondabilité des terrains en période printanière. L'objectif est d'analyser l'étendue des zones inondées depuis la période des plus hautes eaux (périodes définies par la gestion des niveaux d'eau de surface et les niveaux piézométriques les plus hauts) c'est-à-dire aux alentours de la mi-mars jusqu'au début de la période des basses eaux, c'est-à-dire mi Juin. Cette période printanière correspond également à la période de nidification des oiseaux, dont certaines espèces sont sensibles au caractère inondé des terrains.

Cependant, la végétation est apparue plus dense que prévu sur de nombreuses mares et les résultats ont montré comme il était prévisible des limitations de l'utilisation des images radar pour détecter l'eau sous la végétation. Ainsi, le GIPSA a reporté les deux dernières acquisitions à la fin de l'année en octobre et décembre. Au total, cinq images avec un angle d'incidence similaire ont été acquises. L'objectif d'avoir suffisamment d'images sur l'ensemble de l'année est écarté en raison du coût. Toutefois, le fonctionnement symétrique de montée des niveaux d'eau en hiver et descente au printemps/été permettra d'obtenir les niveaux haut et bas de l'eau dans la réserve naturelle. Sur la

base de ces images la méthodologie de traitement des images développée par l'université de Rennes 1 sera appliquée afin d'extraire les plans d'eau. De manière plus fondamentale, il est évoqué la possibilité de mettre en œuvre un système de radar terrestre dans les secteurs de roselière afin d'améliorer les algorithmes d'extraction des plans d'eau à partir des images satellites sur ces secteurs où la végétation modifie le signal.

Cette manipulation devait se faire au mois de mai/juin. Cependant les acquisitions des images ayant été reportées à la fin de l'automne, les conditions climatologiques n'ont pas permis de réaliser ces mesures. Des mesures similaires ont tout de même été réalisées sur une mare avec de la végétation près de Rennes. Par ailleurs, un travail supplémentaire important pour étudier précisément l'influence de la végétation sur la méthodologie proposée a été menée. Une amélioration de la détection de l'eau a été dans ce cadre réalisée.

2 Données

2.1 Imagerie RADAR polarimétrique (RADARSAT-2)

L'étude est réalisée à partir d'une série de 5 images polarimétriques acquises par le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) RADARSAT-2 ; 3 images ont été acquises au printemps (mars, avril et mai 2012) et deux autres à la fin de l'automne (octobre et décembre 2012). Les dates d'acquisition des images ont été choisies afin de caractériser le site sous différentes conditions hydriques et d'éviter les périodes de l'année où la végétation est la plus abondante. Les images ont été mesurées en bande C (fréquence à 5,3 GHz) pour deux modes différents présentant quelques légères différences (Tableau 1 et Figure 1).

Tableau 1 Acquisitions RADARSAT-2 en 2012

	Date	Faisceau	Orbite	Basse mer	Pleine mer	coefficient
1	14 mars	FQ27	Asc (17h57)			
2	07 avril	FQ27	Asc (17h57)			
3	01 mai	FQ27	Asc (17h57)			
4	31 octobre	FQ30	Des (5h57)			
5	03 décembre	FQ27	Asc (17h57)	19:13	12:08	67



Figure 1 Empreintes au sol des images radar FQ27 (rose) et FQ30 (bleue)

2.2 Données terrain

Les données terrain, indispensables pour la validation des résultats, sont constituées de photos du site prise sur le terrain et de deux séries de photos aériennes. Des relevés GPS des contours des mares et des prairies inondées ont aussi été effectués (Tableau 2) et nous avons consigné différentes observations faites sur le terrain le jour des acquisitions radar.

Tableau 2 : Données terrain

Dates	Photos	Autres
14 mars	Survol + photos des mares	Points GPS des mares
07 avril	photos des mares	Points GPS des mares
01 mai	photos des mares	Points GPS des mares
31 octobre	Photos de la zone d'étude	Points GPS des prairies en eau
03 décembre	Survol + photos diverses	Points GPS des prairies en eau

2.3 Données auxiliaires

2.3.1 MNT LIDAR à résolution métrique

Un Modèle Numérique de Terrain issu du LIDAR est disponible sur la zone d'étude.

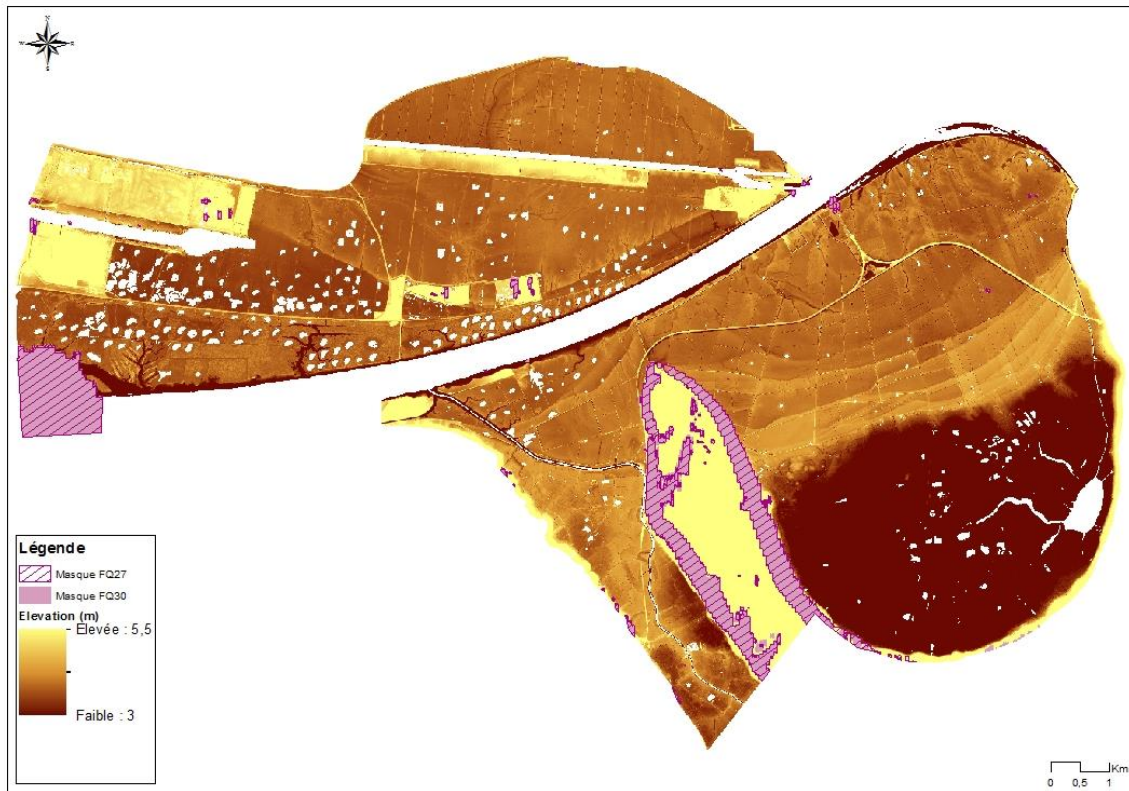


Figure 2 MNT de la zone d'étude

2.3.2 Données d'occupation des sols

La couche de données d'occupations des sols est fournie par le GIPSA et provient d'une analyse par photo-interprétation d'une ortho-image de 2009.

Un masque des zones artificialisées (Figure 3) a été créé à partir de données des modes d'occupations des sols. Toute zone dont le CODE2009 commençait par 1 (ex. : 1131, 1122, etc.) a été considérée comme zone artificialisée.

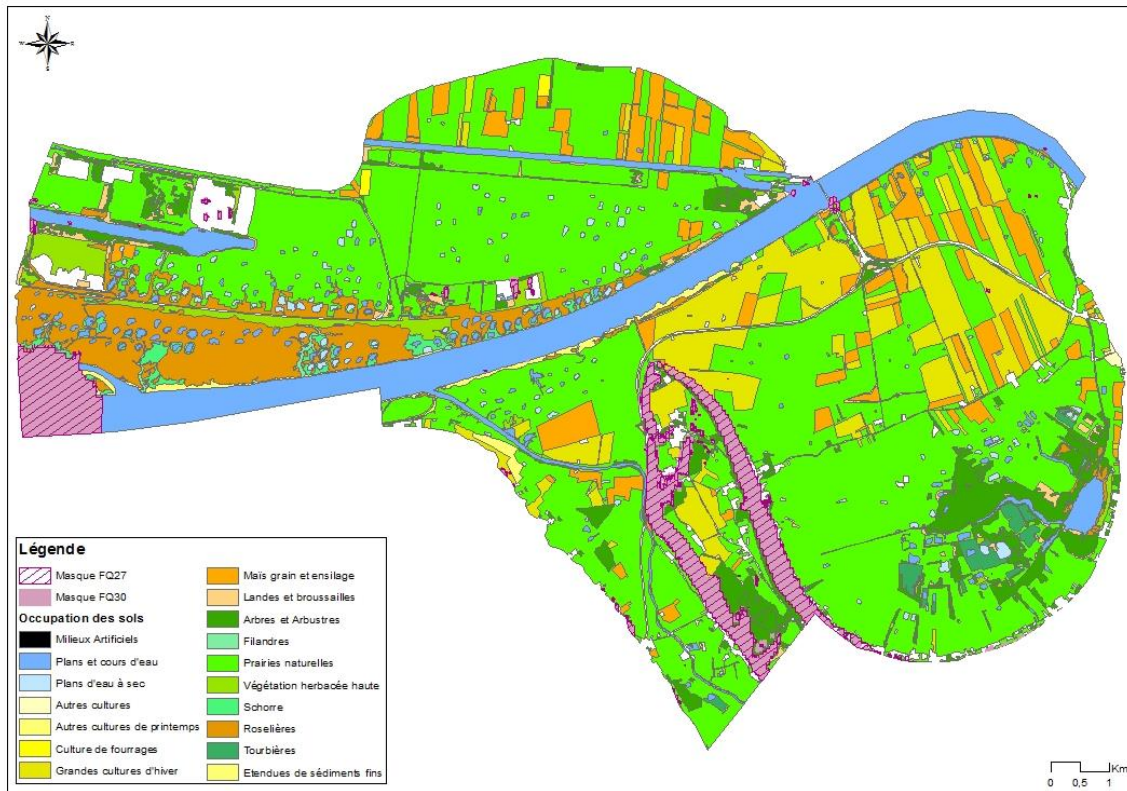


Figure 3 Occupation des sols de la zone d'étude

2.3.3 Données Météorologiques

Les données météo de différentes stations environnant le site d'étude ont été fournies par le GIPSA afin de connaître l'importance de la pluviométrie sur cette zone. Dans le tableau suivant, les pluviométries de la semaine et du mois précédent les acquisitions sont indiquées. La pluviométrie a été très forte avant les acquisitions radar de mai et octobre, moyenne avant celle de décembre et très faible avant les acquisitions de mars et avril.

Tableau 3 : Données météo

Dates	Pluviométrie sur 8 jours	Pluviométrie sur 1 mois
14/03	4,1 mm	22,1 mm
07/04	0,8 mm	7,4 mm
01/05	47,5 mm	87,1 mm
31/10	34,4 mm	149,1 mm
03/12	11,6 mm	41,6 mm

3 Prétraitement des images radar

Les images radars sont livrées dans un dossier comprenant les images brutes en Single Look Complex (SLC) sous format Tiff ainsi que les fichiers d'entête des images RSO (métadonnées).

L'imagerie radar à synthèse d'ouverture est basée sur l'utilisation d'un capteur actif qui émet lui-même des ondes électromagnétiques, il opère de jour comme de nuit quelles soient les conditions climatiques. La génération d'une image RSO est un processus qui peut se décomposer en deux étapes : l'acquisition et la synthèse. Après avoir émis des impulsions électromagnétiques, le radar mesure les échos rétrodiffusés par les cibles illuminées et les enregistre, formant la vidéo brute. Le processus de focalisation de la vidéo brute ou compression des données, permet d'obtenir l'image finale représentant la réponse de l'ensemble des diffuseurs constituant la scène.

Les données SLC sont des données d'amplitude et de phase du signal rétrodiffusé en polarisation HH, HV, VH et VV (Figure 7-a).

3.1 Géométrie radar

Ces données initiales sont en géométrie dite Radar et non pas en géométrie au sol. En effet, comme le signal radar est analysé selon le temps de réponse entre le signal envoyé et reçu, il existe une distorsion plus ou moins importante entre ces deux géométries selon l'angle de visée du satellite et la topographie au sol. La Figure 4 illustre la géométrie d'acquisition du radar avec x et r , les axes de la géométrie radar et y , l'axe au sol.

Afin de pouvoir analyser les données selon des points de repère au sol, les données radar devront être projetées, mais il s'avère impossible de le faire directement avec les données brutes.

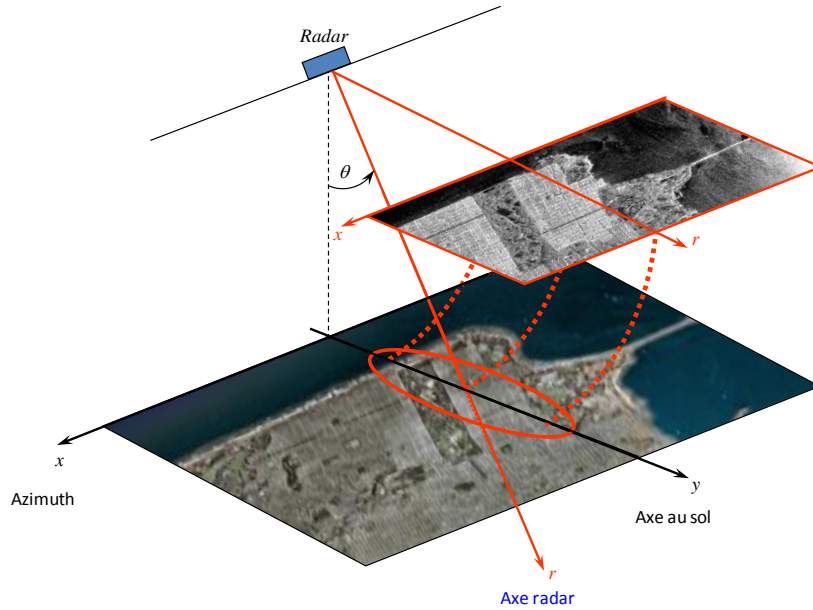


Figure 4 Géométrie d'acquisition du radar

3.2 Information polarimétrique

La matrice de diffusion est extraite à partir des images SLC sous le logiciel PolSARpro. Cette dernière décrit la diffusion de l'onde électromagnétique par la cible au sol.

$$\begin{bmatrix} E_H^D \\ E_V^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^I \\ E_V^I \end{bmatrix}$$

Où $S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$ est la matrice de diffusion, $[E_H^I \ E_V^I]^T$ est le champ électrique de l'onde incidente et $[E_H^D \ E_V^D]^T$, le champ électrique de l'onde diffusée.

La matrice de cohérence T est extraite de la matrice de diffusion. C'est à partir de cette matrice, une fois filtrée, que seront calculés les divers paramètres polarimétriques nécessaires à cette étude.

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} |S_{HH} + S_{VV}|^2 & (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & |S_{HH} - S_{VV}|^2 & (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \\ 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* & 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* & 4|S_{HV}|^2 \end{bmatrix}$$

Les trois termes de la diagonale de cette matrice sont des puissances et leur somme est égale au $span = |S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2$.

Sur la Figure 5, les principaux mécanismes de diffusion sont représentés. Les surfaces très rugueuses, les prairies, les feuilles ou branches de la végétation diffusent l'onde électromagnétique émise par le radar dans toutes les directions, on parle alors de diffusion multiple. Les troncs des arbres et les bâtiments génèrent le mécanisme de double rebond. Dans le cas de surfaces lisses, comme les champs agricoles labourés, l'énergie est majoritairement réfléchiée dans la direction spéculaire. On parle alors de mécanisme de réflexion de surface. La puissance est alors faible.

Pour représenter ces mécanismes de diffusion, une image colorée RGB, appelée image de Pauli, est utilisée. Le canal bleu représente la réflexion de surface $\frac{|S_{HH} + S_{VV}|^2}{2}$, le canal rouge le double rebond $\frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{2}$ et le canal vert, la diffusion multiple $2|S_{HV}|^2$. Cette représentation est utilisée sur la Figure 7.

Dans le cas de l'eau, la surface est très lisse et la puissance rétrodiffusée, très proche du niveau de bruit, apparaît alors noire sur l'image de Pauli.

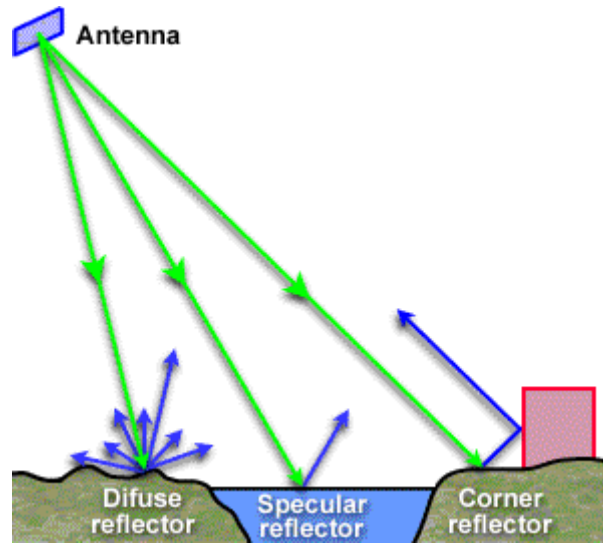


Figure 5 Mécanismes de diffusion

3.3 Filtrage des images radar

Le chatoiement (ou speckle en anglais) est un bruit multiplicatif produit par l'interférence aléatoire des ondes électromagnétiques diffusées par une cible qui donne aux images un effet poivre et sel. Afin de réduire ce bruit, des filtres de speckle sont utilisés. Sans filtrer le speckle, il s'avère pratiquement impossible d'analyser et d'interpréter les images SAR. Les deux filtres les plus utilisés sont le filtrage box (fenêtre carré) ou le filtrage de Lee.

Pour différentes valeurs de la taille de la fenêtre de filtrage, (3, 7 et 11), les deux filtres sont appliqués sur une petite zone de l'image (

Figure 6). Plus la taille de fenêtre augmente, plus l'information est moyennée et le bruit éliminé au détriment de la résolution de l'image qui est dégradée. Le filtre de Lee permet de conserver une résolution spatiale un peu meilleure sur les structures isolées que le filtre box. Dans notre étude, afin de minimiser les effets de lissage du filtre, un filtre de Lee de fenêtre de taille 3x3 a été employé (Figure 7-b). Il est à noter qu'en général, on utilise plutôt une fenêtre de 7x7. En utilisant un filtre aussi petit, plusieurs paramètres polarimétriques ne peuvent être employés puisqu'ils ne sont pas significatifs lorsque la matrice est insuffisamment filtrée.


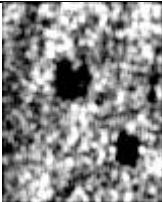

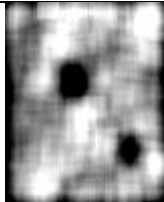
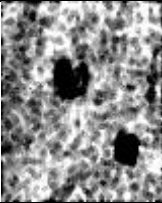


Image brute	Filtre Box 3x3	Filtre Box 7x7	Filtre Box 11x11
			
	Filtre Lee 3x3	Filtre Lee 7x7	Filtre Lee 11x11
			

Figure 6 Images du span pour différents types de filtre

3.4 Projection au sol de l'image

Une fois les données filtrées, elles sont projetées au sol en utilisant le MNT SRTM à 90m (Figure 7-c). Ce choix a été effectué étant donné que le temps de calcul s'en trouve grandement réduit et que le MNT SRTM est déjà un MNT par rapport à l'ellipsoïde WGS84. En effet les MNT plus précis dont nous disposons, soit le MNT à 25m et le MNT métrique, sont des MNT en altitudes par rapport au géoïde, avec pour référence verticale la hauteur moyenne des marées du Havre ou le marégraphe de Marseille (IGN69). Le choix s'explique également du fait que les MNT plus précis ne couvraient pas nécessairement l'ensemble de l'image.

Étant donné que la zone à l'étude présente très peu de relief, le choix du MNT à beaucoup plus faible résolution a très peu d'influence sur la projection des données. Dans une zone au relief plus prononcé, il aurait été nécessaire projeter les données radar avec un MNT de référence de plus grande précision. L'analyse des segmentations sont par contre réalisées par rapport au MNT métrique.

3.5 Masque ombres et recouvrements

Certaines zones de l'image ne sont pas imagées par le RSO puisqu'elles sont dans l'ombre du signal radar envoyé. Un peu comme les ombres solaires, ces ombres sont dues à la position du radar, la direction de visée et la topographie environnante. D'autres zones, au contraire, font face au radar, le signal de retour est alors saturé et il n'est pas possible de tirer d'information de ces régions, tout

comme il est impossible de tirer de l'information des régions d'ombre. Ces deux types de régions sont donc masqués sur l'image radar.

Toutes les zones

En plus d'une bande par élément de la matrice T3, deux bandes sont créées lors de la projection au sol sous NEST : une bande de masque des zones d'ombres et de recouvrements et une bande des angles d'incidence radar projetés. Ces deux bandes serviront à créer le masque d'ombres et de recouvrement.

Pour les images acquises en mode FQ27, tous les pixels où l'angle d'incidence est inférieur à 40° ou supérieur à 52° sont ajoutés à la bande de masque ($\pm 5^\circ$ par rapport aux angles d'incidence RADAR). Le masque résultant est présenté en rose sur la Figure 2. Pour les images en mode FQ30, ce sont tous les angles inférieurs à 42° ou supérieurs à 54° sont ajoutés à la bande de masque correspondante. Le masque résultant correspondant presque en tout point au masque des images acquises en mode FQ27, est présenté en rosé ligné sur la Figure 2.

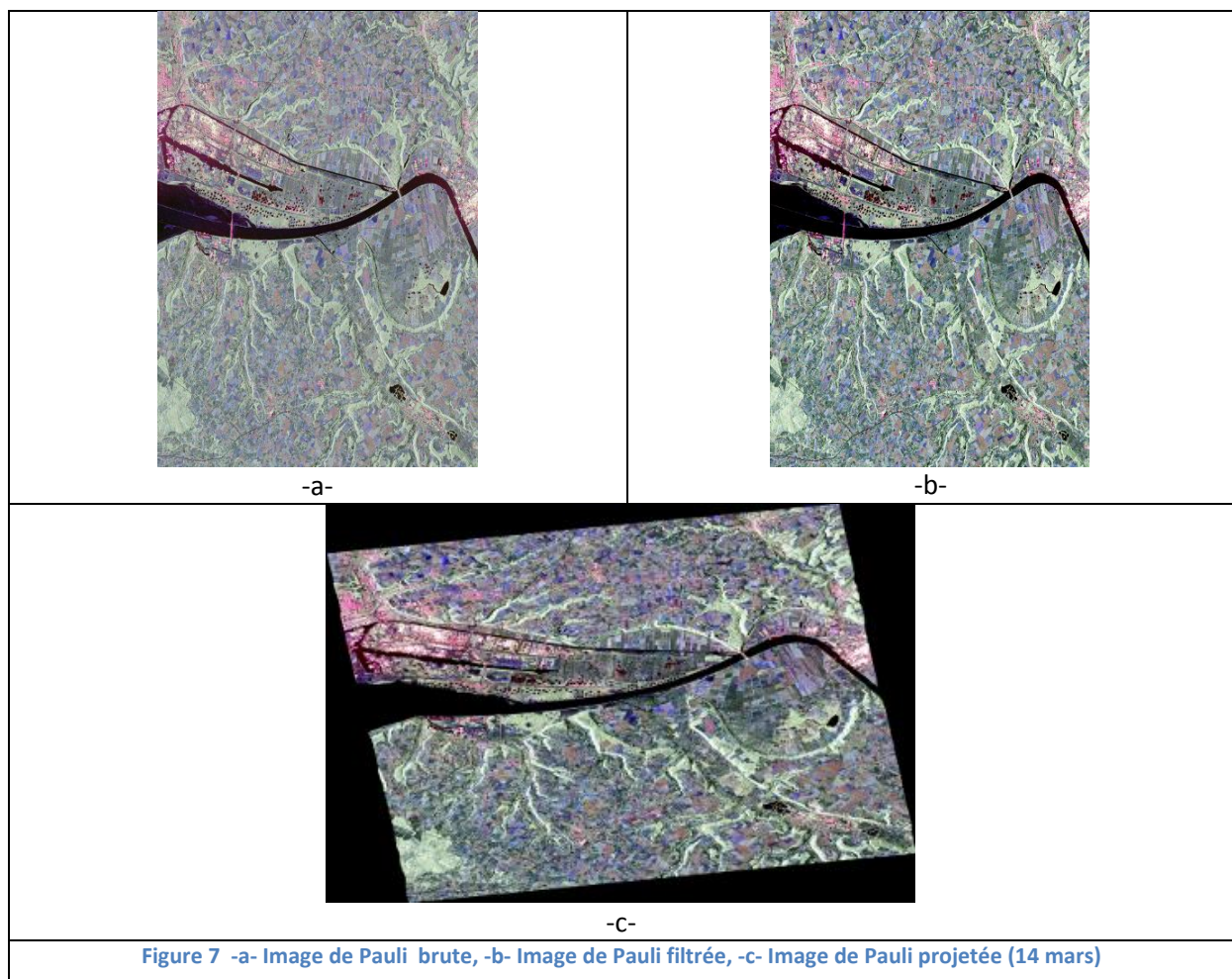


Figure 7 -a- Image de Pauli brute, -b- Image de Pauli filtrée, -c- Image de Pauli projetée (14 mars)

4 Segmentation

Une segmentation binaire eau/non-eau, développée par l'IETR lors du projet de Pleine-Fougères, est réalisée sur le paramètre polarimétrique d'entropie de Shannon directement lié à la puissance du signal rétrodiffusé. Les valeurs d'entropie de Shannon de l'eau se démarquent bien de la majorité des

autres types d'occupation du sol vu leurs faibles valeurs. Ce paramètre augmente avec la présence de végétation et devient très élevé en présence de roselière (Figure 8).

4.1 Entropie de Shannon

L'entropie de Shannon est calculée à partir de la matrice de cohérence T3 sous le logiciel PolSARpro.

$$SE = SE_I + SE_P \quad (1.1)$$

Où SE est l'Entropie de Shannon, SE_I , sa composante en intensité et SE_P , sa composante polarimétrique qui se définissent ainsi :

$$SE_I = \frac{\pi e Tr[T]}{3} \quad (1.2)$$

$$SE_P = \log \left(27 \frac{\det[T]}{Tr[T]^3} \right) \quad (1.3)$$

Avec Tr , l'opérateur trace et \det , le déterminant.

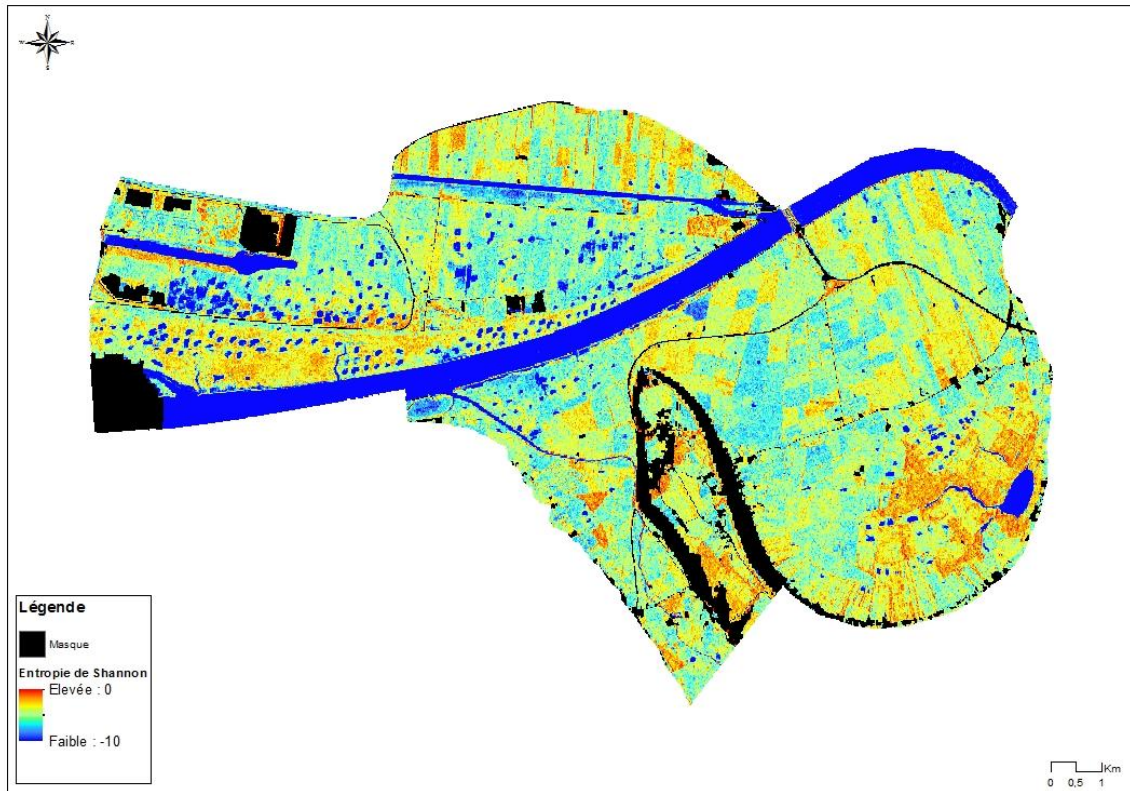


Figure 8 Entropie de Shannon du 14 mars (masque en noir)

4.2 Méthode de segmentation

La méthode de segmentation existante est basée sur l'utilisation de l'entropie de Shannon normalisée avec un seuil de 0,2665. Les principaux avantages de cette méthode sont que ce paramètre a des valeurs comprises entre 0 et 1 et qu'elle est assez robuste si la configuration de l'image radar varie. Néanmoins, la normalisation de ce paramètre est faite en fonction des valeurs minimum et maximum de l'image, valeurs pouvant varier d'une image à l'autre selon les caractéristiques de la zone imagée (bâtiment, mer, champs, forêt ...). Les paramètres de

segmentation initiaux sont choisis afin que le nombre minimum de pixels par zone d'eau détectée soit de 30 en considérant un voisinage de 8 pixels.

4.3 Ajustement de la méthode

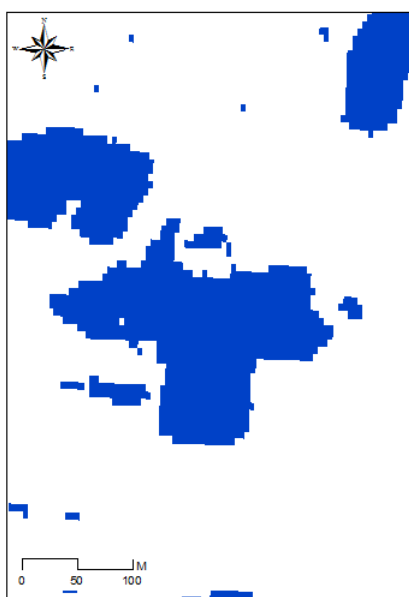
Lors du test de la méthode de segmentation sur la première image du 14 mars, les valeurs min et max de l'image sont très différentes des valeurs obtenues sur les images utilisées pour le développement de la méthodologie ce qui fausse la valeur normalisée. L'explication est assez simple : les images acquises dans la région de Pleine-Fougères en Bretagne sont essentiellement constituées de champs agricoles alors que le site d'étude de ce projet se trouve entouré par des bâtiments, des champs et par la mer. Afin de palier à ce problème, l'entropie de Shannon sans normalisation est utilisée. Le seuil correspondant au seuil normalisé est fixé à -8,4 dB en mode d'acquisition FQ27 et FQ30. Des histogrammes de différentes zones de la région ont été effectués afin de valider ce seuil.

Le seuil devra être ajusté pour des images acquises sur des orbites éloignées étant donné que l'entropie de Shannon varie selon l'intensité du signal rétrodiffusé et que l'intensité varie selon l'angle d'incidence.

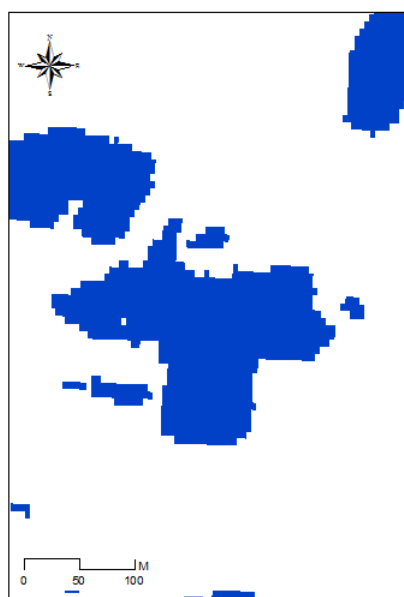
Dans le cadre du projet de Pleine-Fougères où le but était d'étudier l'évolution temporelle d'une très grande mare dans une zone humide, le nombre minimum de pixels par zone d'eau détectée était de 30 en considérant un voisinage de 8 pixels. Dans le cadre du présent contrat, le nombre de pixels par zone d'eau a été réévalué étant donné la réalité du terrain : de nombreuses mares, assez petites sont présentes sur le site d'étude. Les paramètres suivants ont été testés :

Population	30	8	4	1
Voisins	8	4	4	4

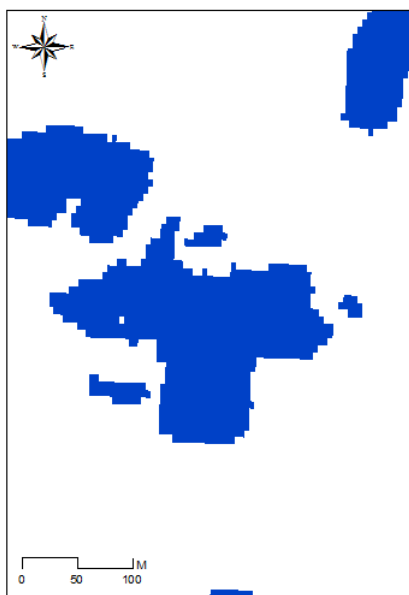
Les résultats sont montrés pour la mare de référence 76417 sur l'image de mars (Figure 9). Ils indiquent qu'avec une population ou un nombre de voisins trop important, certaines zones en eau ne sont plus détectées comme à l'est de la mare et au sud ouest. De même si la population est trop petite, quelques pixels apparaissent un peu partout sur l'image comme au nord de la mare. Les paramètres utilisés dans cette étude sont une population de 4 et un nombre de voisins de 4, permettant un bon compromis entre la détecter les petites mares et limiter la présence de pixels de bruit dans la segmentation.



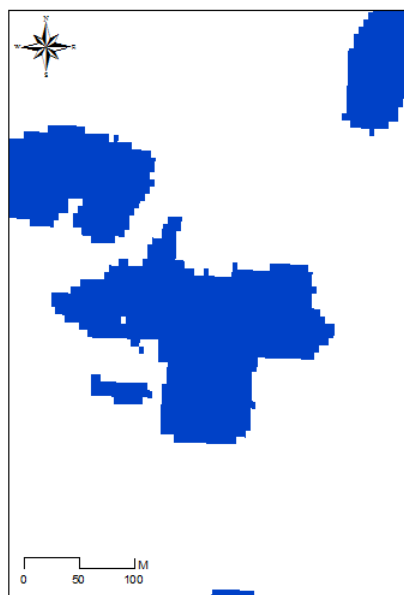
-a- 1|4



-b- 4|4



-c- 8|4



-d- 30|8

Figure 9 Segmentation de la mare 46417 (Site 1) pour différents paramètres le 14 mars

4.4 Validation du seuil à -8,4 dB

Afin de valider le seuil de -8,4 dB, des histogrammes de différentes sous-zones de la région d'étude ont été analysés (Figure 10) et le résultat de la segmentation de la mare 76417 a également été observé afin de s'assurer que les limites des mares étaient bien détectées avec ce seuil (Figure 11).

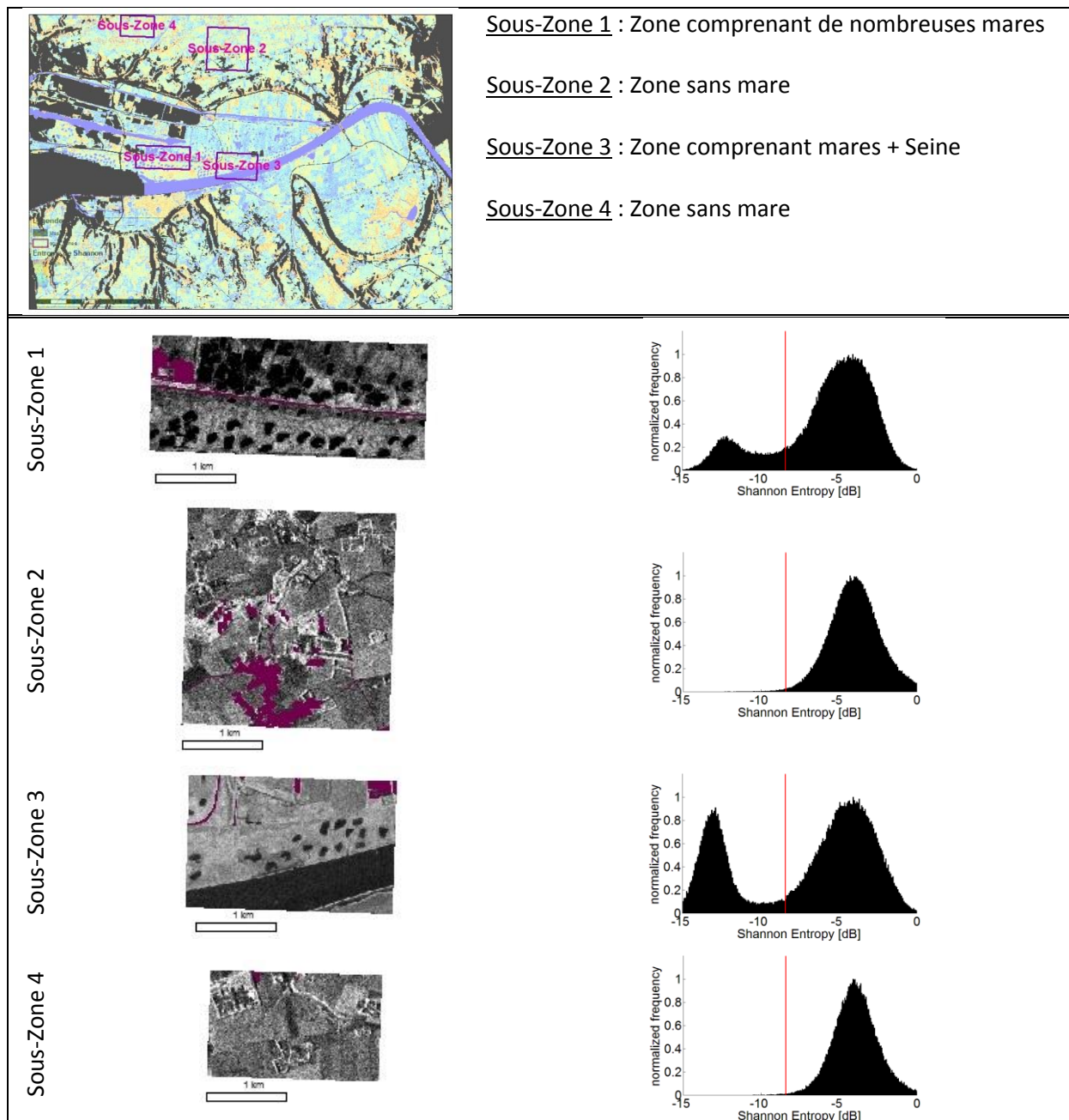


Figure 10 Entropie de Shannon au 14 mars de différentes zones de la région d'étude.

Les sous-zones 1 et 3 contenant des mares présentent 2 pics distincts alors que les zones sans mares ne présentent qu'un seul pic. En rouge sur les histogrammes, la limite de -8.4 dB.

Le seuil de -8,4 dB correspond bien à la limite des pixels en eau et en non-eau. Les histogrammes des sous-zones 2 et 4 démontrent qu'un nombre négligeable de pixels seraient classifiés comme étant de l'eau dans les zones sans eau. Le pic des pixels d'eau se distingue clairement du pic des pixels sans-eau sur les sous-zones 1 et 3. Il est donc approprié d'utiliser une segmentation par seuillage du paramètre de l'entropie de Shannon pour classifier les pixels d'eau.

L'analyse de la mare 76417 au 14 mars démontre que le seuil correspond bien aux valeurs des pixels en eau, et ce, jusqu'au contour de la mare. Sur la Figure 11, tous les pixels dans les teintes de jaune et de rouge ont une valeur inférieure à -8,4 dB alors que tous les pixels de plus de -8,4 dB sont dans les teintes allant du vert au bleu. La démarcation est très nette entre les pixels d'eau et les pixels

environnants pour le paramètre d'entropie de Shannon. Le seuil est donc considéré comme ne nécessitant pas d'ajustement et est conservé à -8,4 dB.

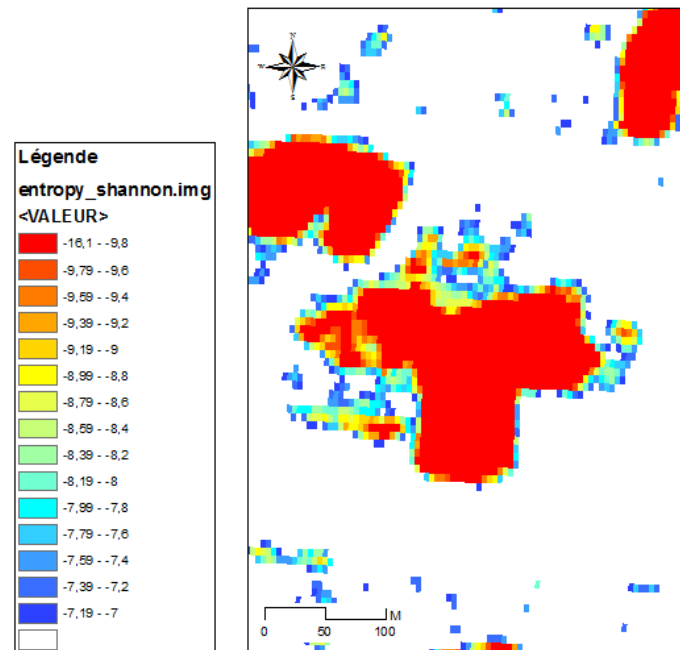


Figure 11 Entropie de Shannon de la mare 76417 sur l'image du 14 mars

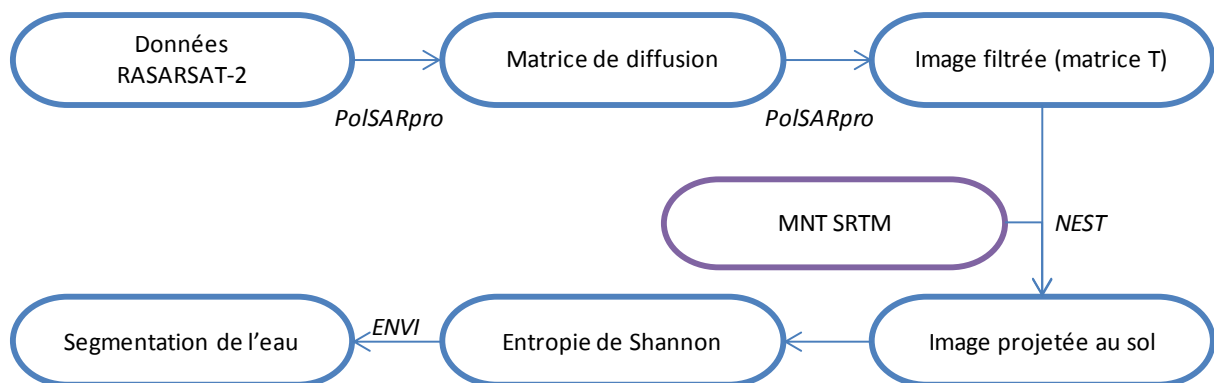


Figure 12 Chaîne de la segmentation

5 Résultats

Les résultats issus de la segmentation sont présentés pour les quatre premières images (mars à octobre). Pour chaque date, les résultats sont divisés en deux parties distinctes : la détection globale des zones en eau et l'étude plus détaillée de différents sites (Figure 13).

Pour l'étude globale, l'image a été divisée en trois zones d'intérêt contenant respectivement : les prairies subhalophiles (zone 1), les prairies hodes (zone 2) et le marais vernier (zone 3). Au total, huit sites représentent les mares et les prairies pour lesquelles des relevés GPS ou des observations précises ont été faits sont étudiés plus en détails.

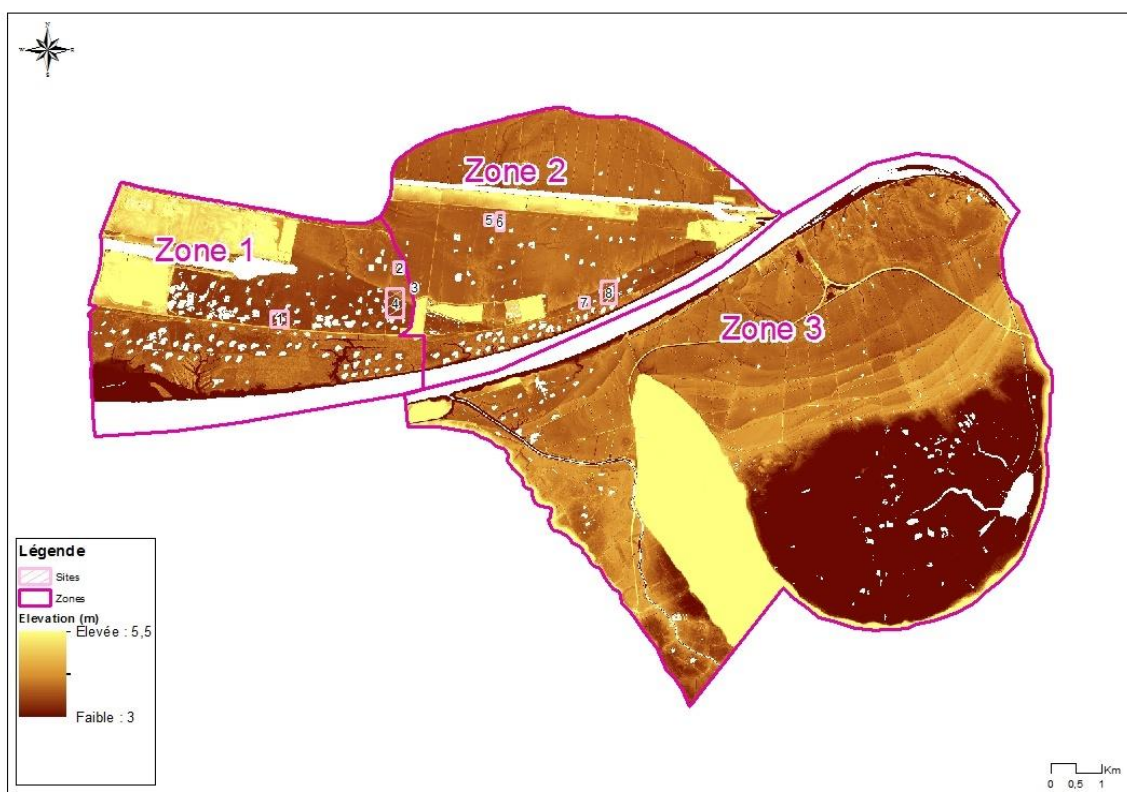


Figure 13 Zones et sites d'étude

5.1 Image du 14 mars

5.1.1 Détection sur la zone entière

Les résultats de la segmentation permettent de retrouver correctement toutes les mares en eau sur les trois zones ainsi que la grand-mare du marais Vernier.

Sur la zone 1 (Figure 14), la comparaison aux photos prises d'avion permet de valider globalement la bonne détection des mares en eau. Le radar ayant une résolution de 5 m, il est difficile de détecter les bras de baissière inondée comme observé sur la photo 2. De plus, les champs inondés visibles aux reflets du soleil sur la photo 2 ne sont pas non plus détectés. Sur la zone 2 (Figure 15), la détection des mares en eau est aussi correcte. Par contre les prairies inondées dans le coin gauche de la photo 1 et à l'ouest de la mare 76462 sur la photo 2 ne sont pas détectées. La présence d'eau est indiquée sur les champs situés en hauteur entre le canal de Tancarville et les prairies hodes.

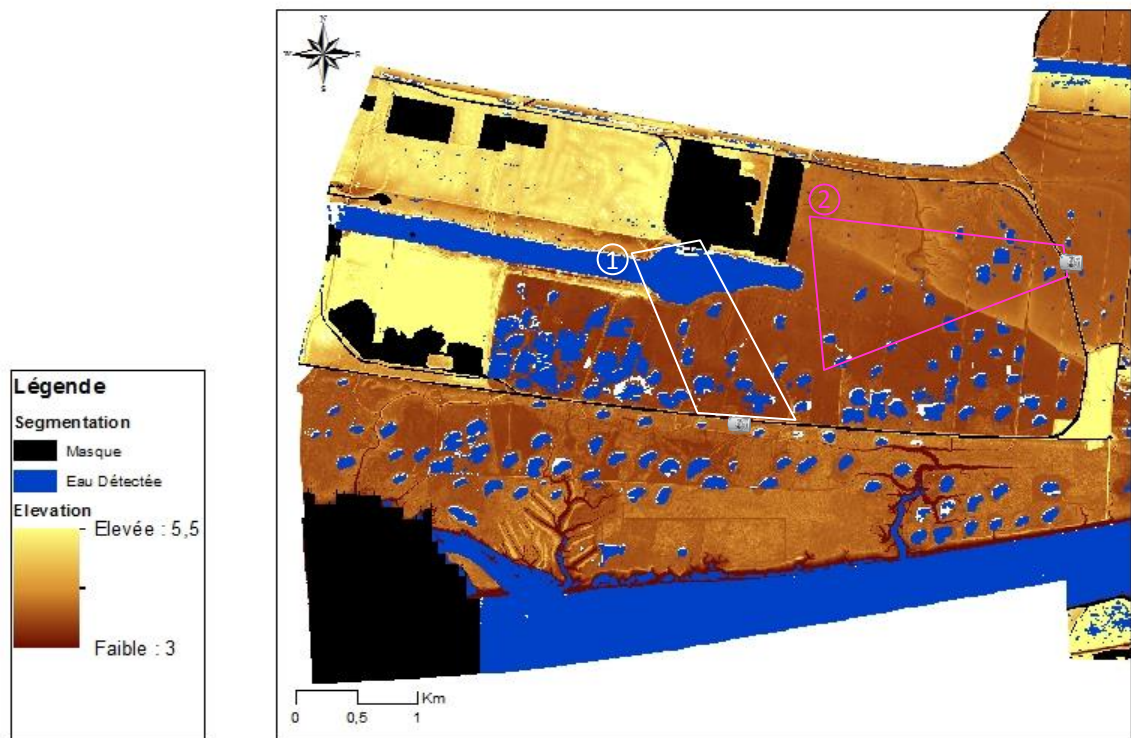


Figure 14 Segmentation de la Zone 1, image du 14 mars

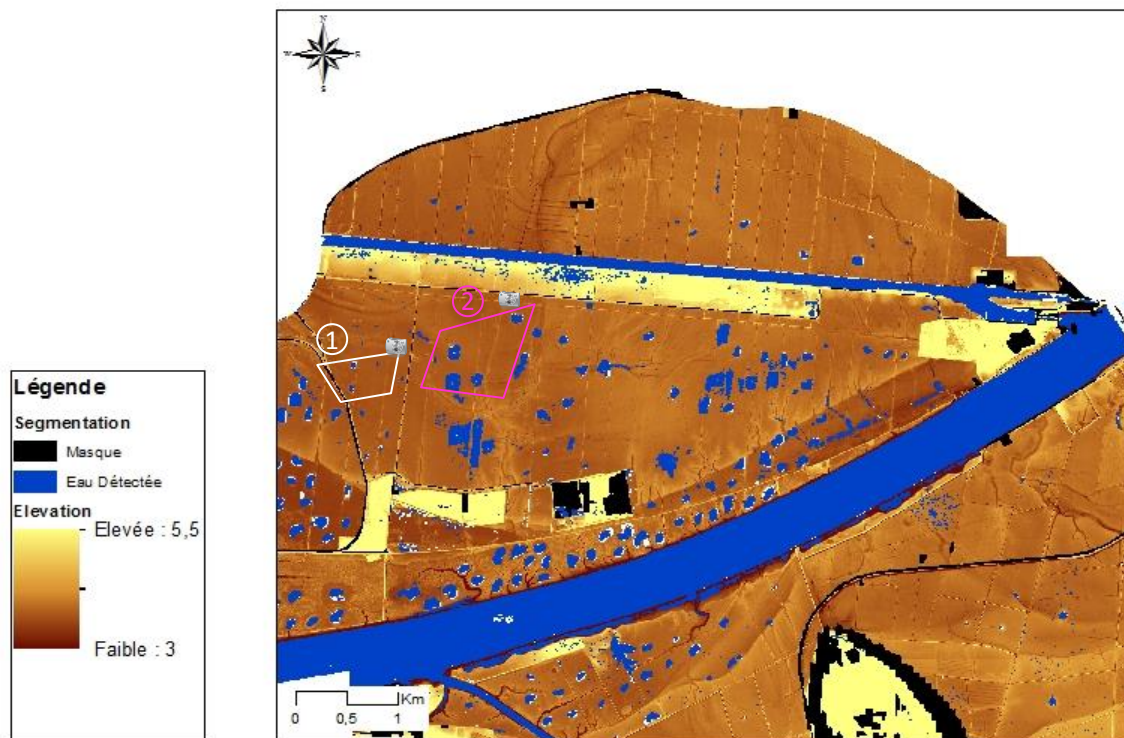


Figure 15 Segmentation de la Zone 2, image du 14 mars

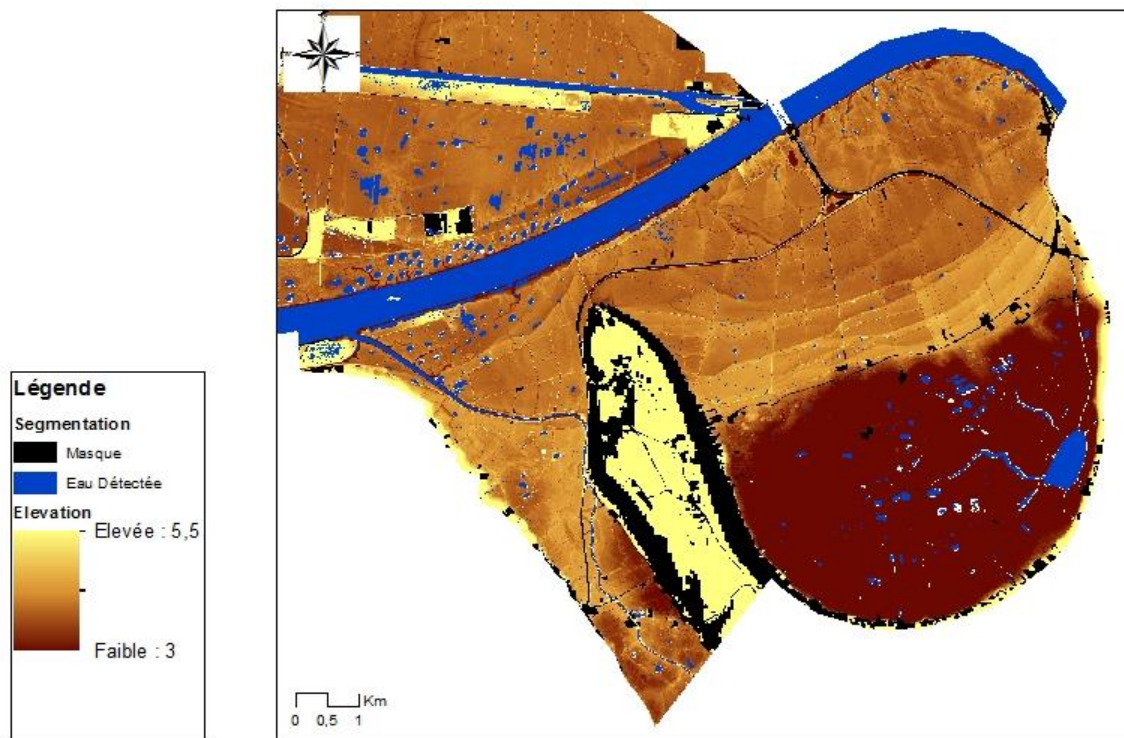


Figure 16 Segmentation de la Zone 3, image du 14 mars

5.1.2 Etude détaillée de sites

Pour valider la méthodologie, les résultats sur différents sites sont analysés en détail. La mare 76417 sera suivie pour toutes les acquisitions. Pour le mois de mars, un relevé GPS très précis a été réalisé par la maison de l'estuaire. En plus du contour de l'eau libre, différentes parties de la mare en eau avec présence de végétation ont été repérées avec le taux de recouvrement spécifié (Figure 17). La détection de l'eau libre correspond à un pixel près au contour GPS de la mare. La zone de clap est en partie détectée. La prairie inondée est détectée si le recouvrement est inférieur à 80%. Pour les mares 76462 et 76453, les zones détectées correspondent aux relevés GPS, le léger décalage est certainement dû à la projection de l'image radar avec le MNT de 90m de résolution. Un pixel au centre est de la mare 76462 n'est pas détecté, la deuxième photo aérienne démontre une présence importante de végétation à cet endroit de la mare.

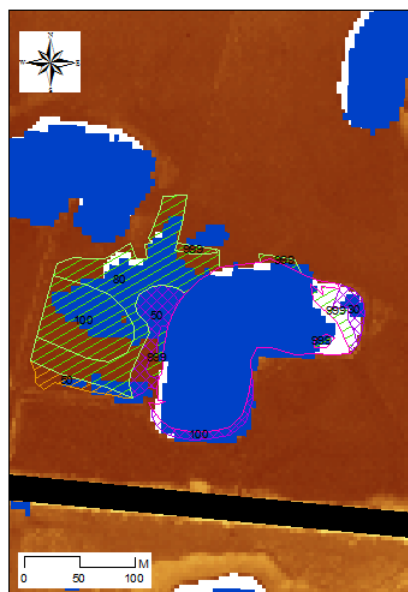
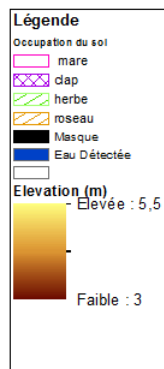
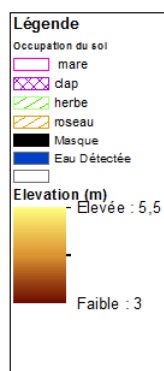
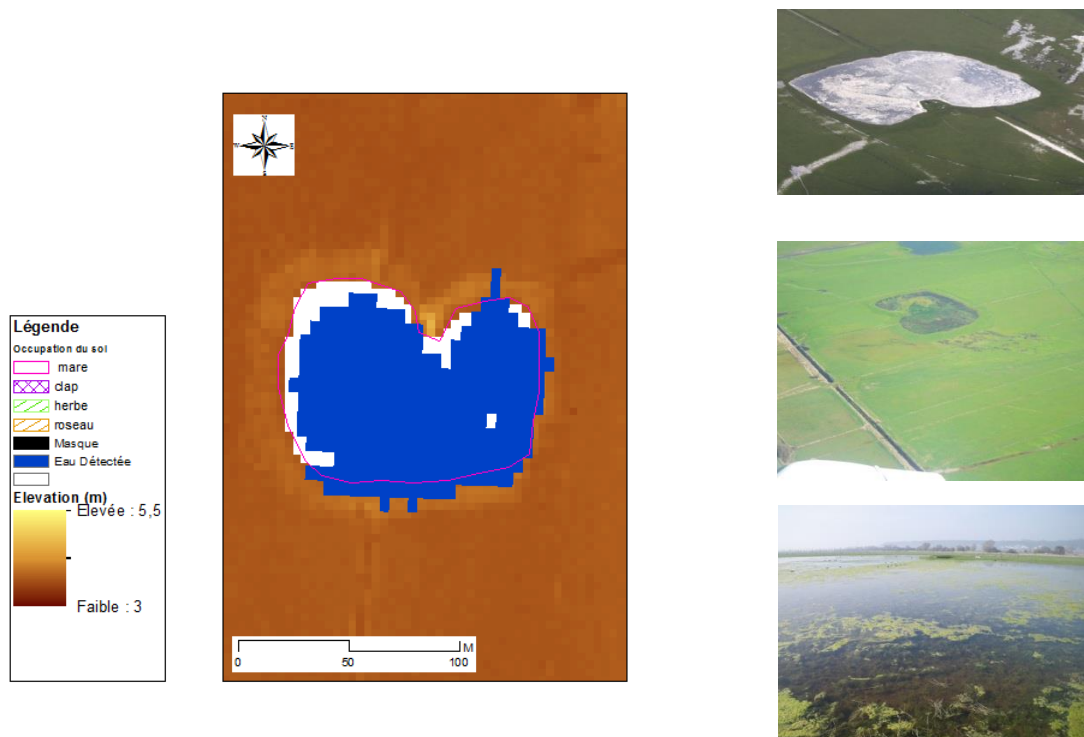


Figure 17 Segmentation de la mare 76417, image du 14 mars



Vue de la mare depuis le nord-est

Figure 18 Segmentation de la mare 76453, image du 14 mars



Vue de la mare depuis le nord-ouest

Figure 19 Segmentation de la mare 76462, image du 14 mars

5.2 Image du 07 avril

5.2.1 Détection sur la zone entière

Pour la seconde image, les régions détectées en eau sont moins nombreuses avec une diminution de la taille des mares en eau et parfois la disparition de ces mares sur les zones 1 et 2. La grande mare est toujours aussi bien repérée. Pour le mois d'Avril, nous ne disposons pas de photos aériennes. Cependant, il est possible de croiser les résultats avec les observations terrain et les parties non détectées correspondent principalement à la présence de végétation (partie 5.7). Certains points des champs en hauteur au sud du canal de Tancarville sont encore détectés comme inondés.

De plus sur la Figure 22, certains champs apparaissent comme de l'eau, ce résultat est surprenant sachant que d'après les données météo, il n'y a pas eu de fortes pluies dans la période précédant l'acquisition radar. Ce phénomène sera étudié en détail dans la partie 6.1.

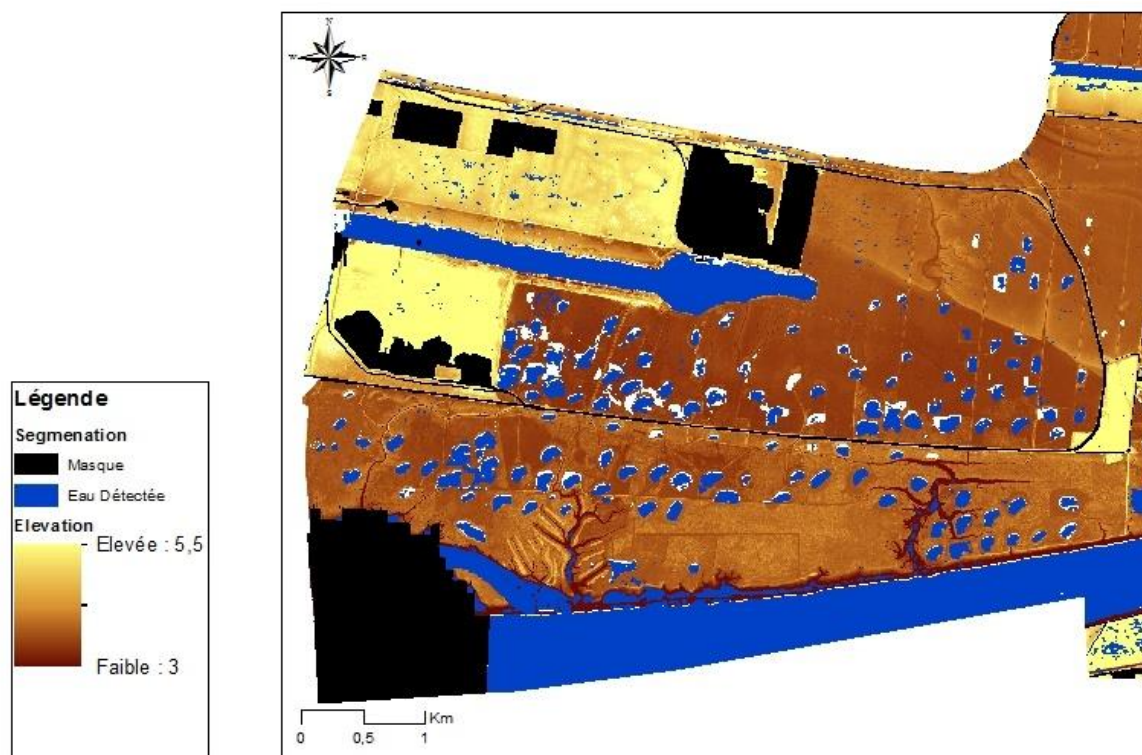


Figure 20 Segmentation de la Zone 1, image du 07 avril

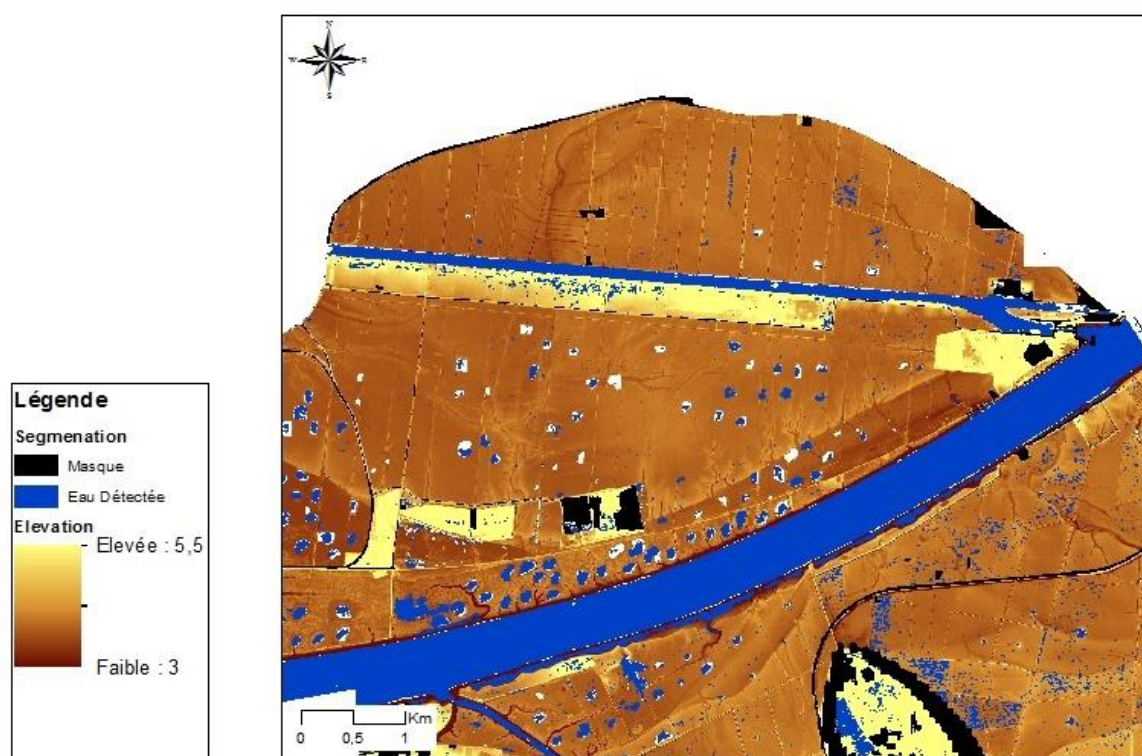


Figure 21 Segmentation de la Zone 2, image du 07 avril

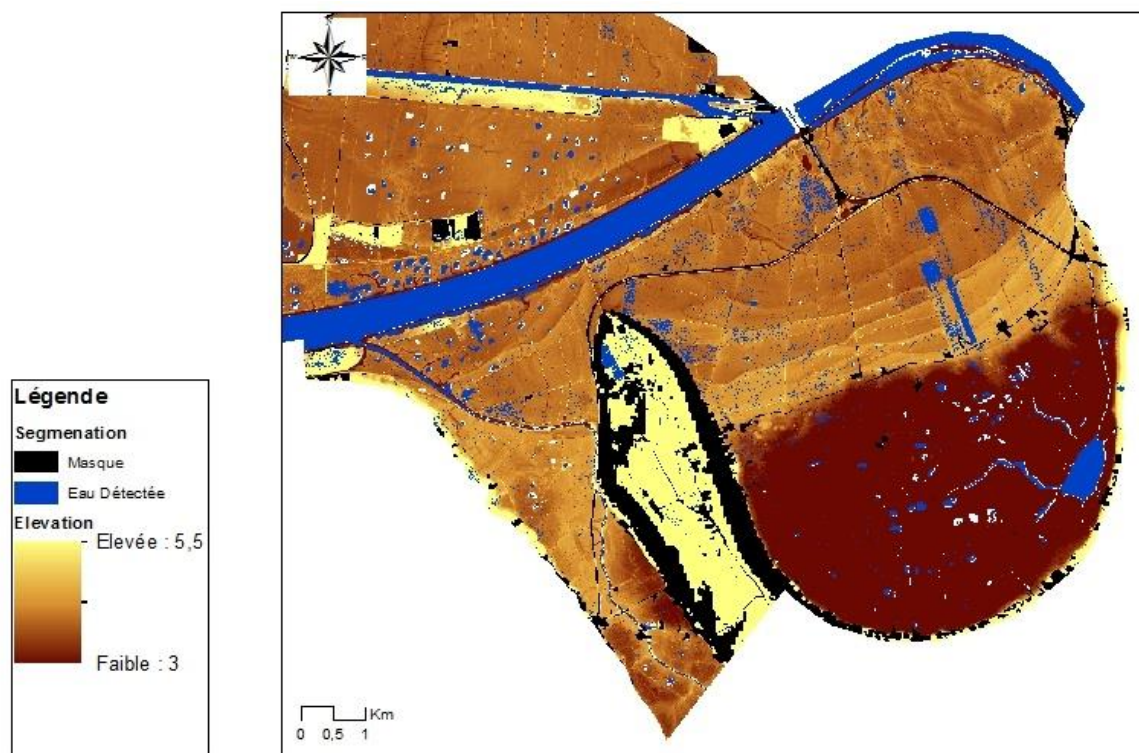
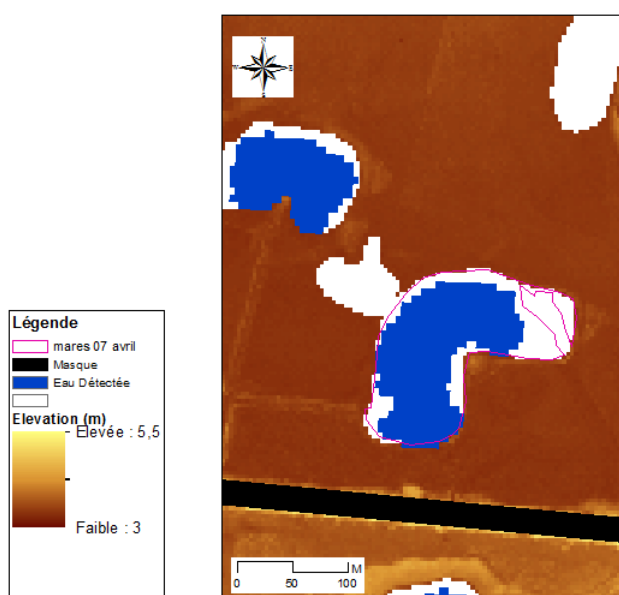


Figure 22 Segmentation de la Zone 3, image du 07 avril

5.2.2 Etude détaillée de sites

Pour la mare 76417, la zone en eau a fortement diminué et l'eau est très légèrement sous-détectée. La zone au nord-est de la mare n'est pas détectée en partie en raison de sa petite taille et de la présence de végétation.



Nord-est de la mare



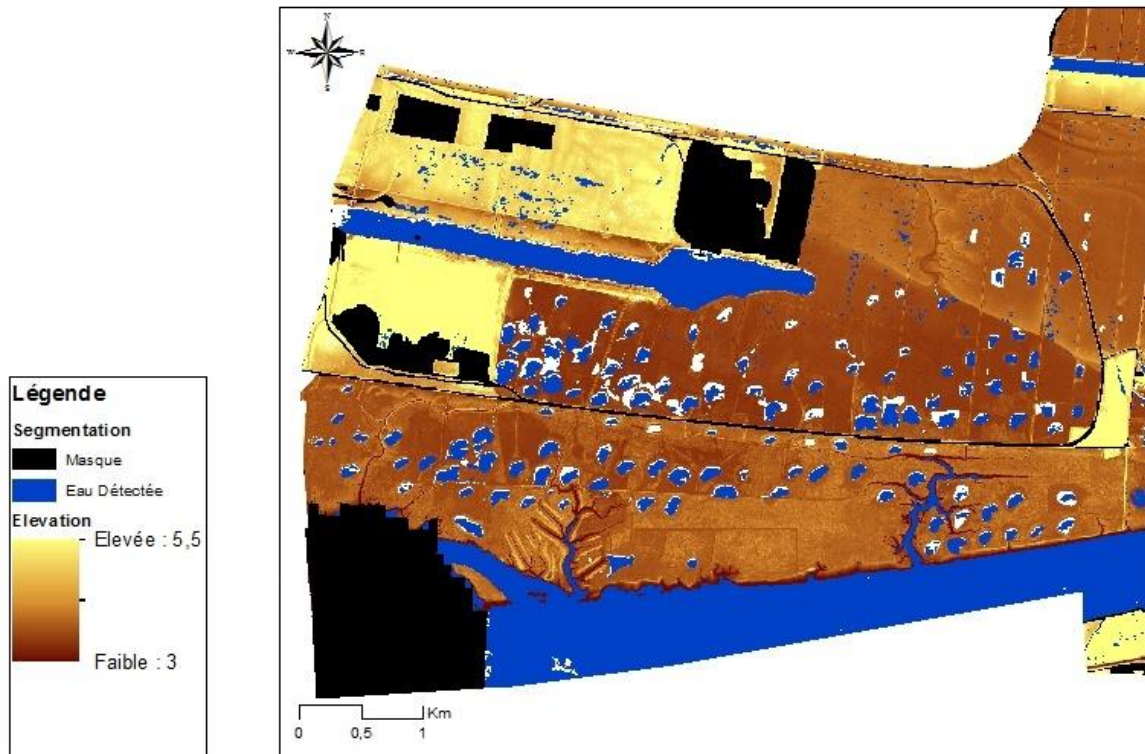
Figure 23 Segmentation de la mare 76417, image du 7 avril

5.3 Image du 01 mai

5.3.1 Détection sur la zone entière

Comme pour l'image acquise précédemment, la présence de végétation pose quelques problèmes sur la détection des mares d'eau surtout dans les prairies hodes. Certaines mares sont asséchées mais une majorité reste en eau.

De plus, certains champs sont aussi détectés comme inondés. Le même phénomène a été observé au mois d'Avril, or pour le mois de mai, les fortes pluies mesurées les jours précédant l'acquisition du radar ont pu inonder certains champs agricoles nus ou avec peu de végétation.



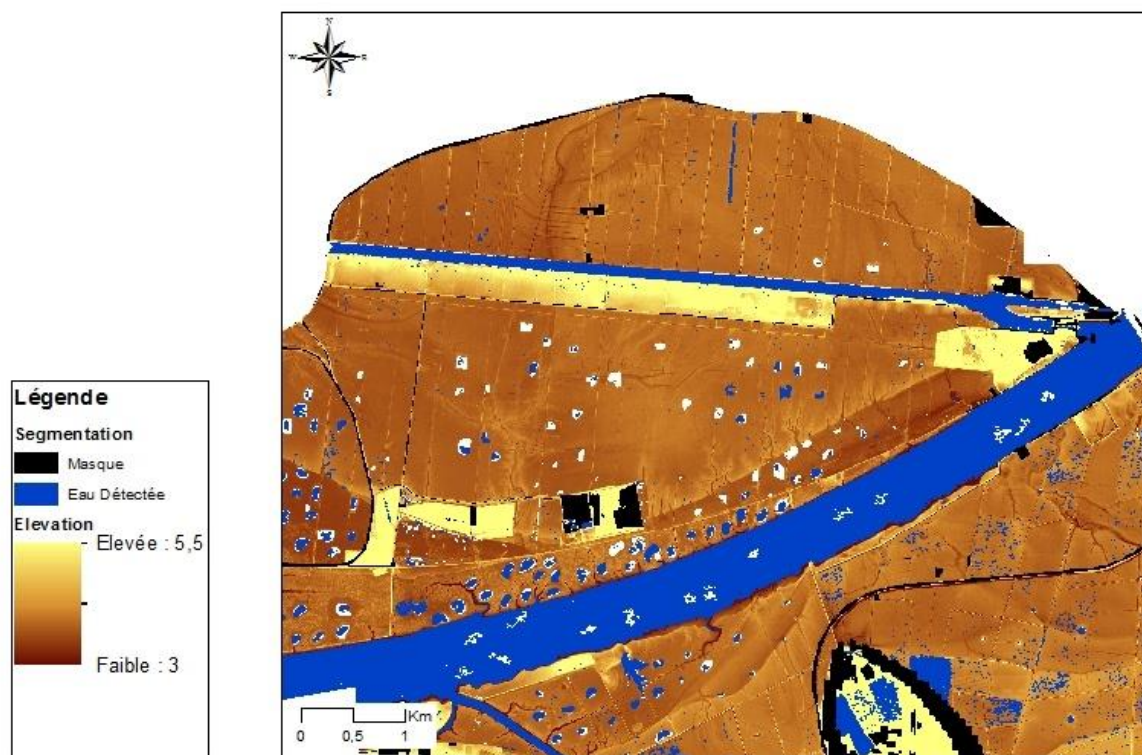


Figure 25 Segmentation de la Zone 2, image du 01 mai

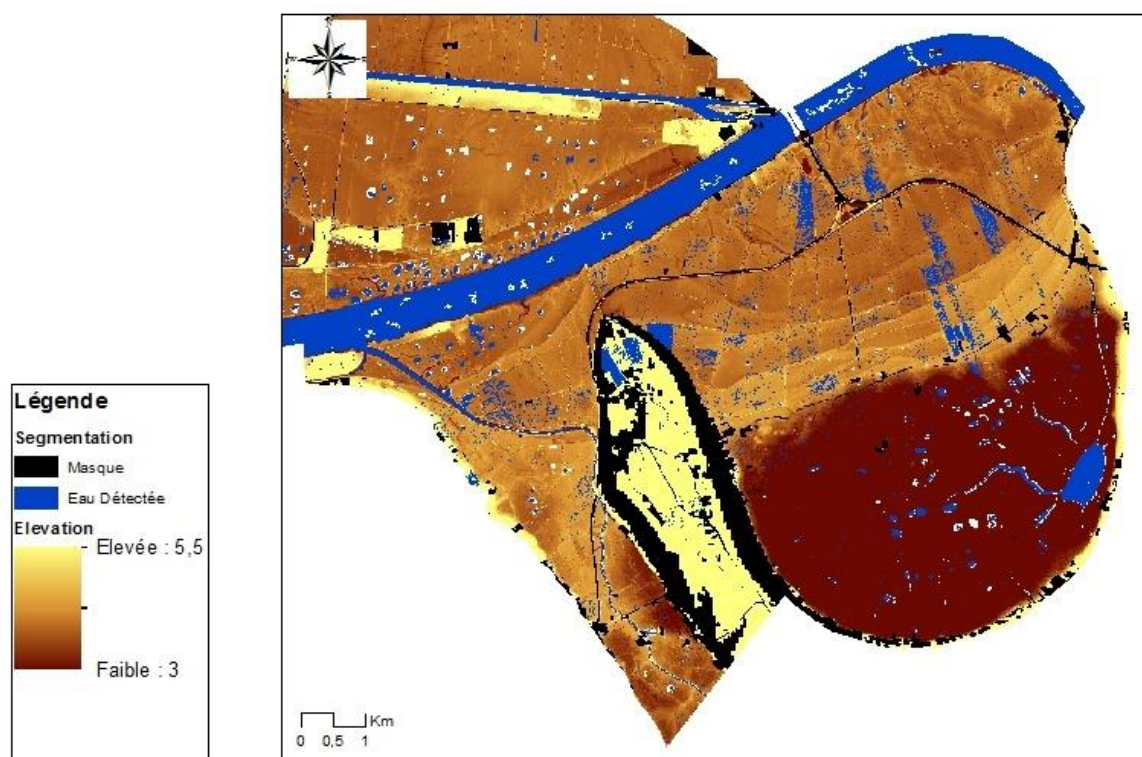


Figure 26 Segmentation de la Zone 3, image du 01 mai

5.3.2 Etude détaillée de sites

Les résultats pour la mare 76417 sont similaires à ceux d'avril avec sur les photos, une augmentation de la végétation sur la mare.

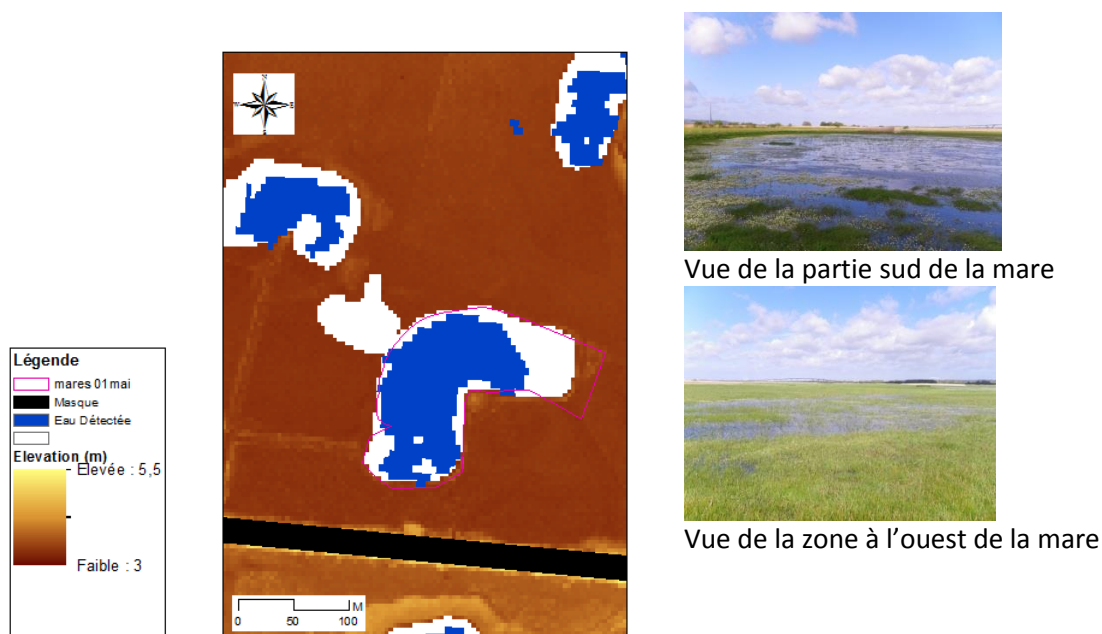


Figure 27 Segmentation de la mare 76417, image du 1^{er} mai

5.4 Image du 31 octobre

L'image du 31 octobre a été acquise dans une géométrie un peu différente des autres images. Un petit problème a eu lieu lors du prétraitement des images avec la diffusion des bâtiments qui « bavent » sur un morceau de l'image à l'ouest avec le grand port du Havre et à l'est avec l'usine (Figure 28). Cette erreur de prétraitement provient du fournisseur d'image lors de la création de l'image, étape pendant laquelle, le bruit a surement été amplifié. Le GIPSA a été avisé de cette anomalie qui devrait, somme toute, avoir une influence mineure sur le traitement des données, puisque la bavure ne touche que très peu la réserve naturelle.



Figure 28 Span en dB de l'image du 31 octobre

5.4.1 Détection sur la zone entière

Les résultats sont assez différents de ceux acquis sur les images de Printemps avec de nombreuses prairies détectées inondées, phénomène dû en majeure partie aux très fortes pluies plus qu'à l'intervention humaine sur les vannes du marais. Sur la zone 1, les observations terrain et les photos prises de la colline montrent bien la grande zone inondée dans les prairies.

Sur la zone 3, les prairies représentées sur la photo 1 dans le Marais Vernier sont correctement détectées inondées. Elles n'étaient pas saturées et inondées sur les images de printemps.

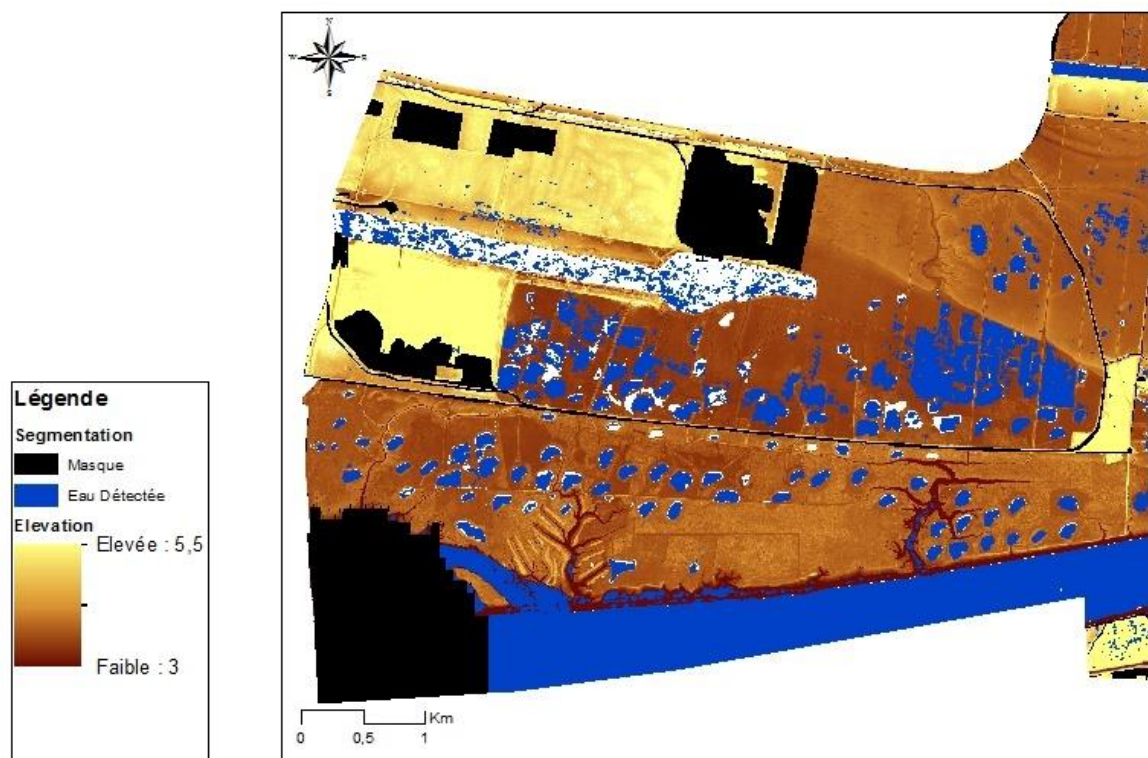


Figure 29 Segmentation de la Zone 1, image du 31 octobre

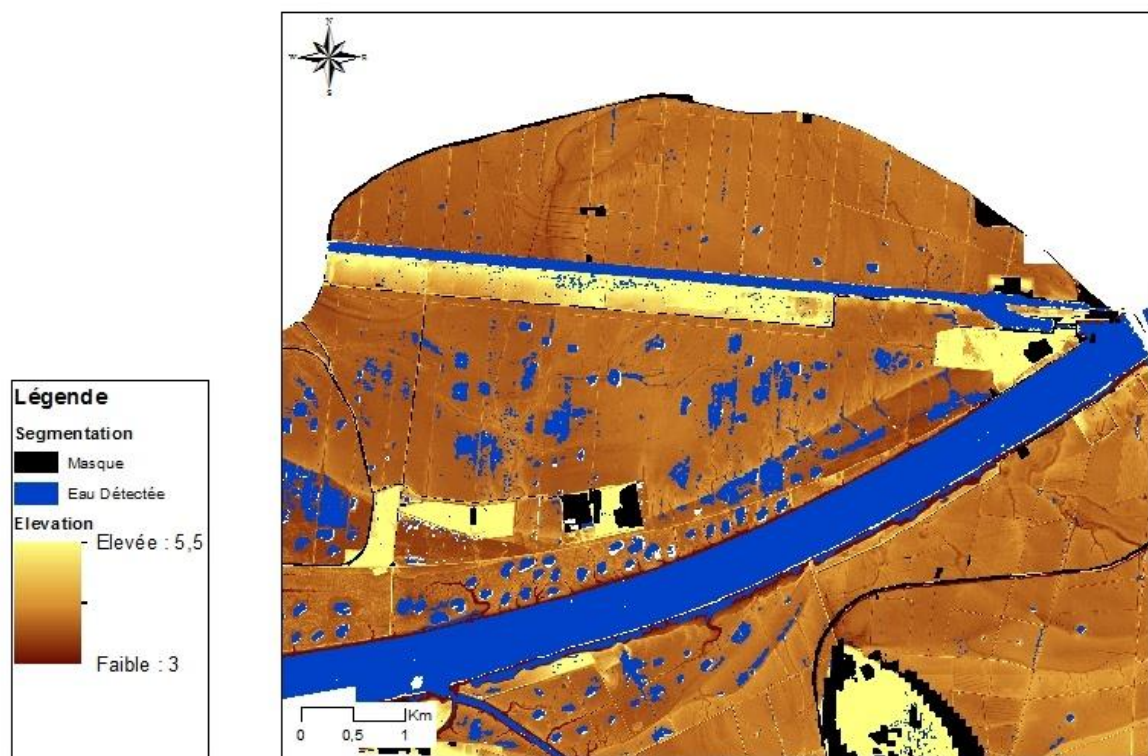


Figure 30 Segmentation de la Zone 2, image du 31 octobre

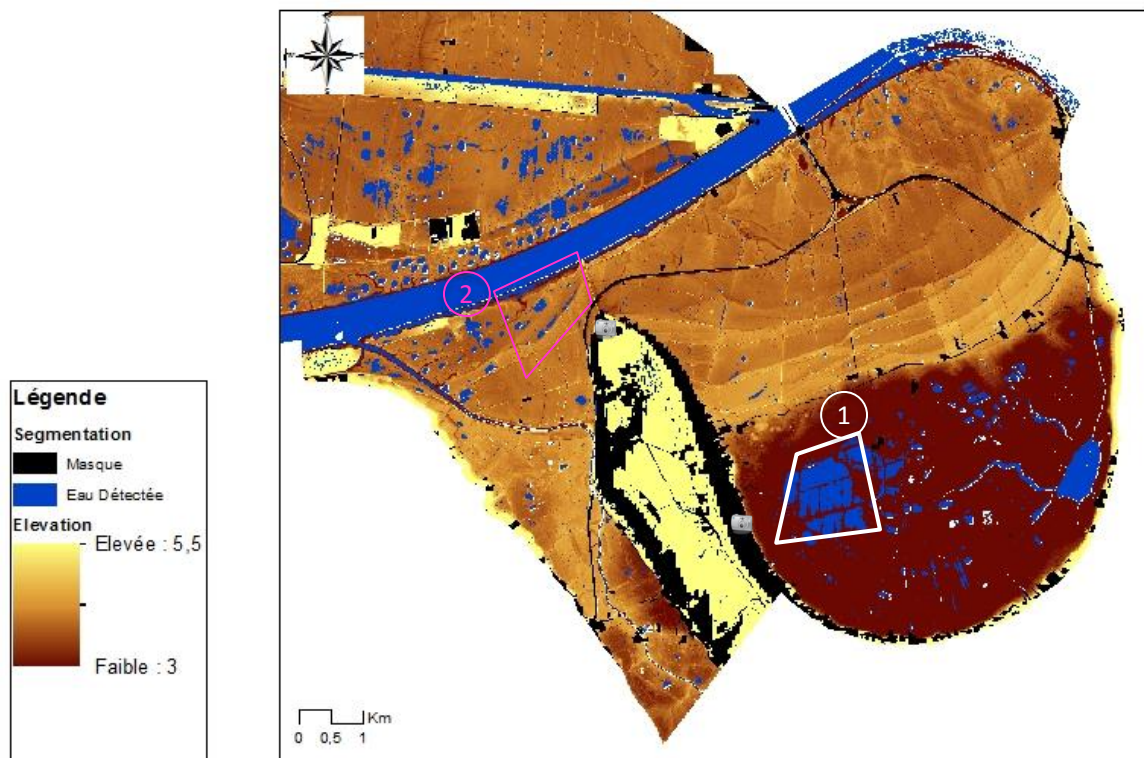


Figure 31 Segmentation de la Zone 3, image du 31 octobre

5.4.2 Etude détaillée de sites

La mare 76417 est complètement détectée avec une inondation tout autour de la mare comme observé sur les photos aériennes de décembre. Le site 4 (Figure 39) correspondant à la prairie observée en détail sur le terrain est bien détecté inondé dans la partie sud où la végétation ne recouvre pas plus de 20% de l'eau. Pour la partie nord du site pour laquelle l'eau est minoritaire (plus de 50% de végétation) est en grande partie détectée. Le profil GPS acquis lors de l'étude de cette prairie permettra de valider exactement ces résultats en délimitant la zone de saturation. Les résultats sur la seconde prairie inondée étudiée (Figure 40) montrent que l'eau libre (70 à 80% d'eau visible) est toujours bien détectée mais il est difficile de savoir si les parties avec 50% d'eau libre sont détectées sans le relevé GPS. A priori, elles ne sont pas très bien détectées.

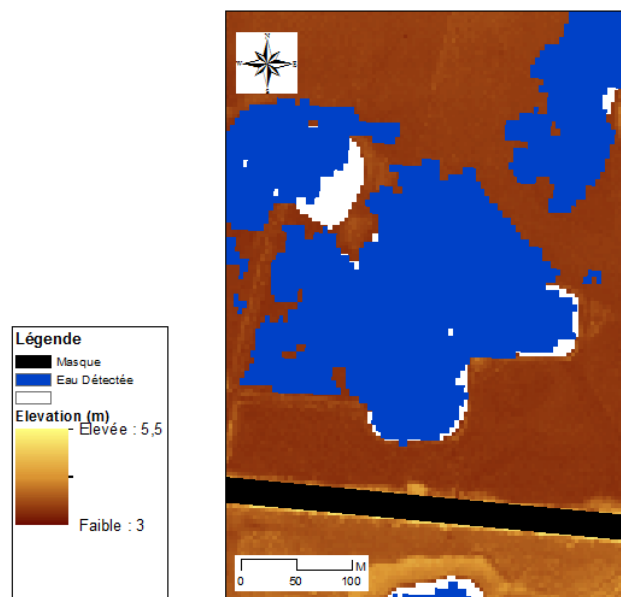


Figure 32 Segmentation de la mare 76417, image du 31 octobre

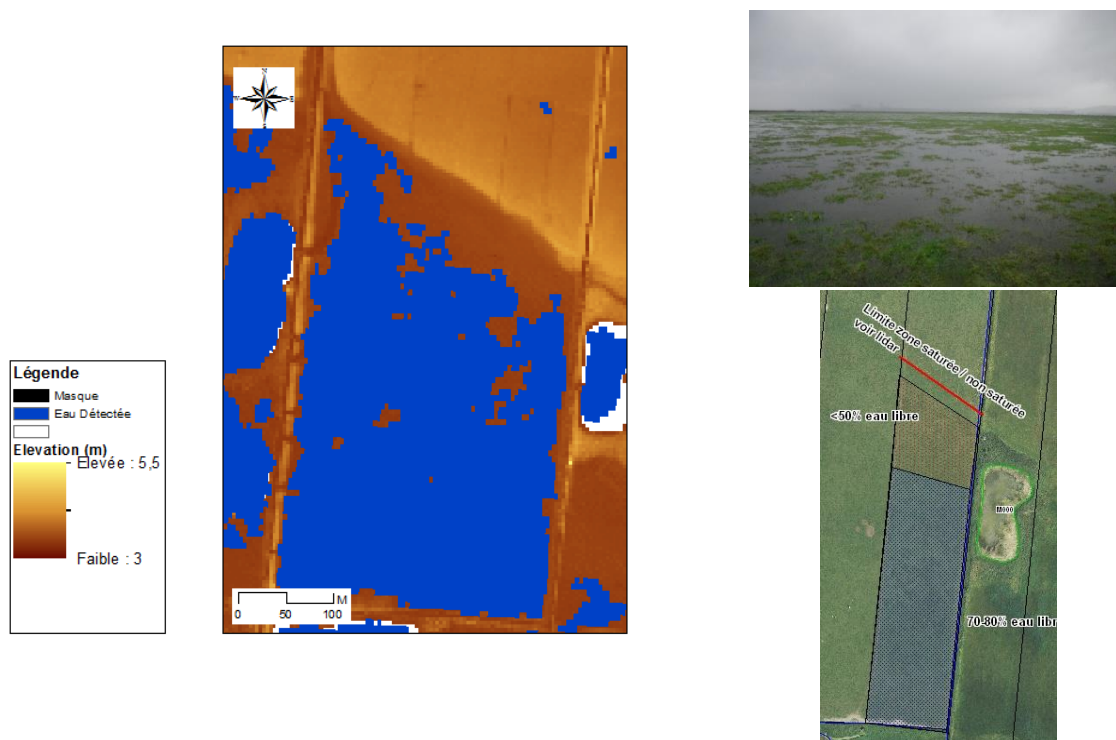


Figure 33 Segmentation du site 4 (référence Figure 13), image du 31 octobre

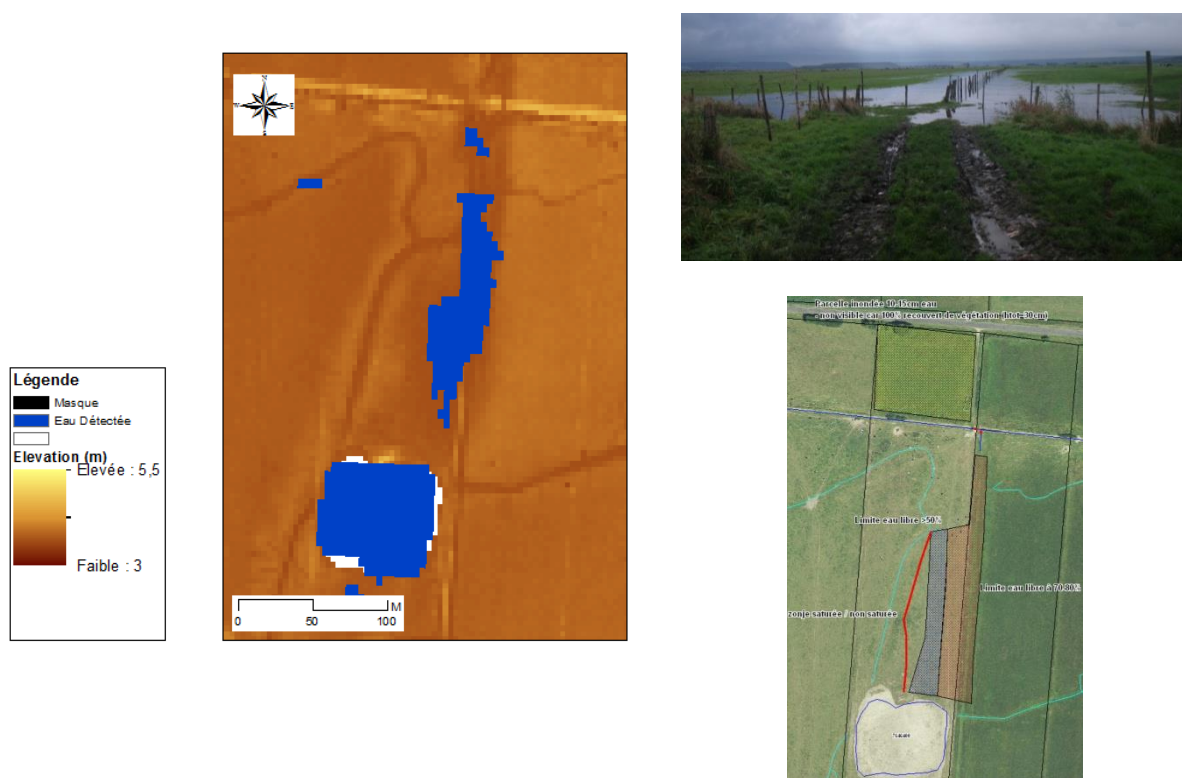


Figure 34 Segmentation du site 6 (référence Figure 13), image du 31 octobre

5.5 Image du 3 décembre

La dernière image traitée a été acquise le 3 décembre 2012. L'inondabilité est importante comme celle obtenue avec l'image d'octobre avec cependant des différences en terme de répartition

géographique. Sur les prairies hodes et subhalophiles, la zone inondée est plus importante. Les résultats sont validés à l'aide des photos aériennes.

5.5.1 Détection sur la zone entière

Les prairies subhalophiles sont complètement inondées sur la partie EST comme le montre la photo. Seule l'eau libre apparente et dépassant majoritairement de la végétation est détectée. La même observation peut être faite sur les prairies Hodes avec de nombreuses prairies inondées. Cependant, les bras d'eau dont la largeur est trop fine ne peuvent pas être détectés, quelques parties plus larges sont classées comme de l'eau.

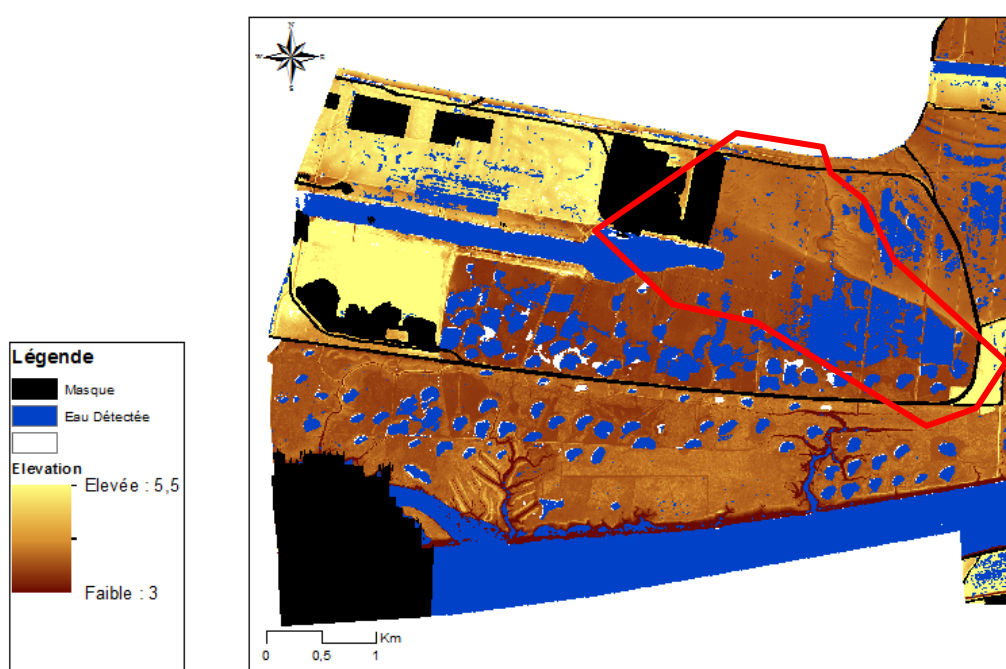


Figure 35 Segmentation de la Zone 1, image du 3 décembre

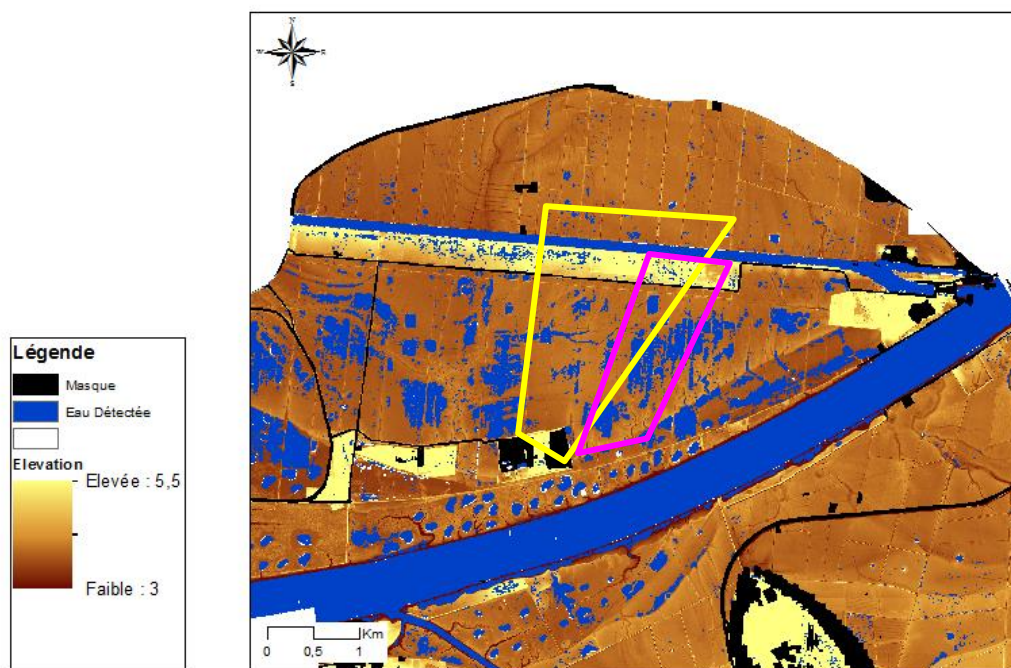


Figure 36 Segmentation de la Zone 2, image du 3 décembre

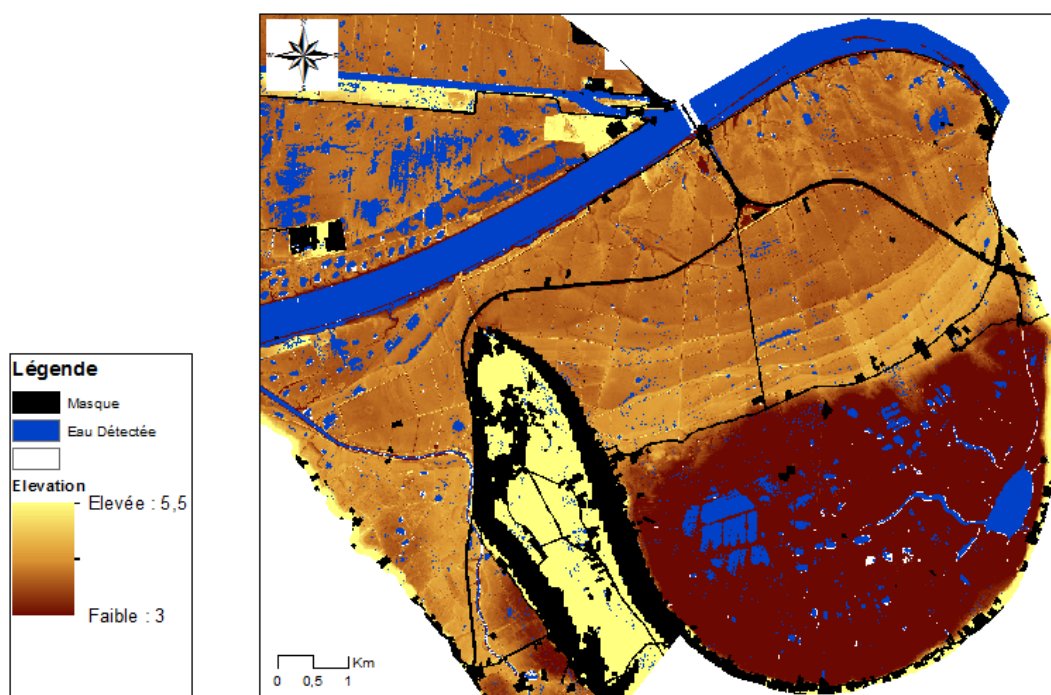


Figure 37 Segmentation de la Zone 3, image du 3 décembre

5.5.2 Etude détaillée de sites

Les sites étudiés en octobre sont aussi analysés. L'empreinte en eau est un peu plus forte en décembre qu'en octobre.

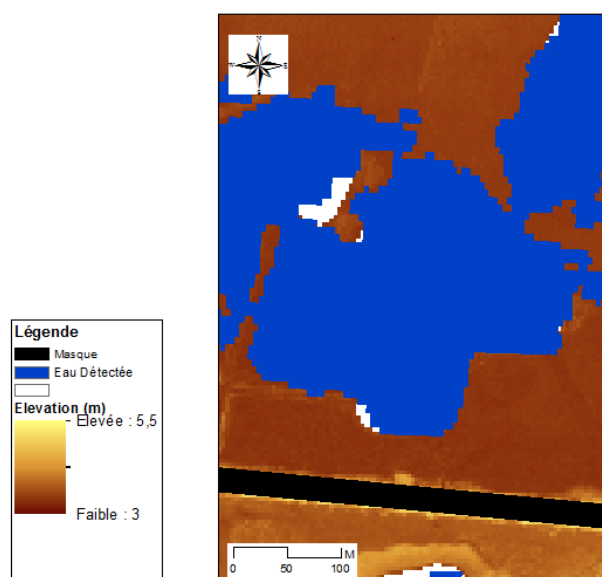


Figure 38 Segmentation de la mare 76417, image du 3 décembre

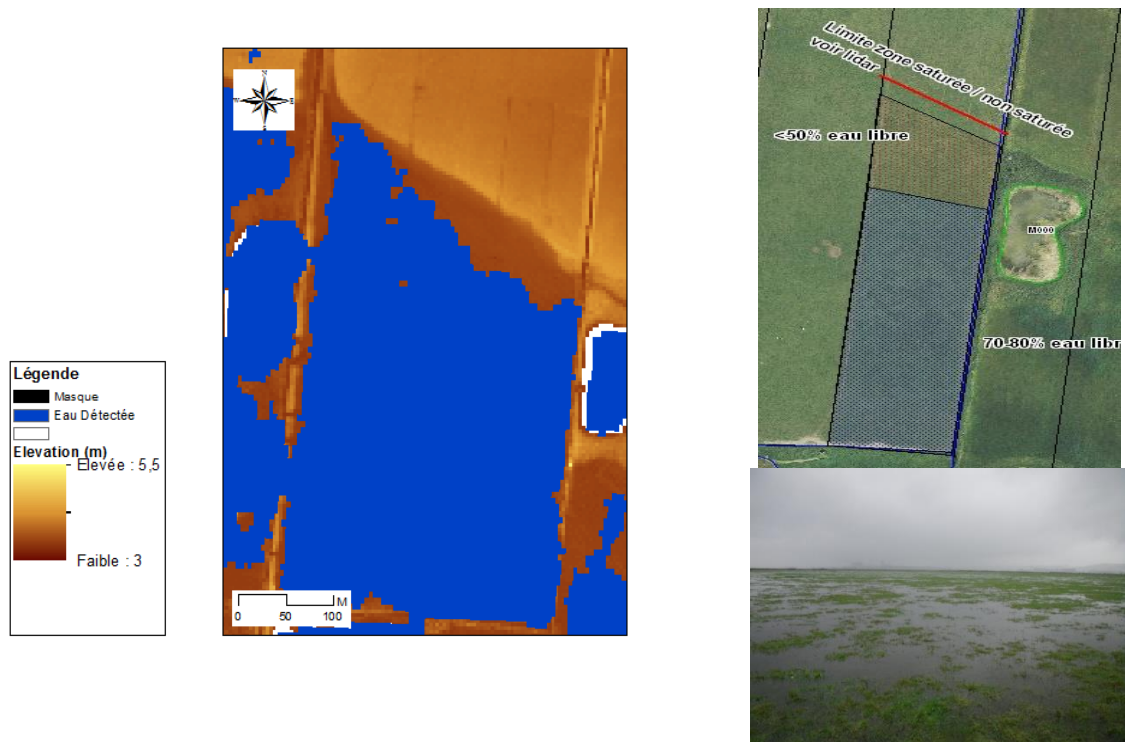


Figure 39 Segmentation du site 4 (référence Figure 13), image du 3 décembre

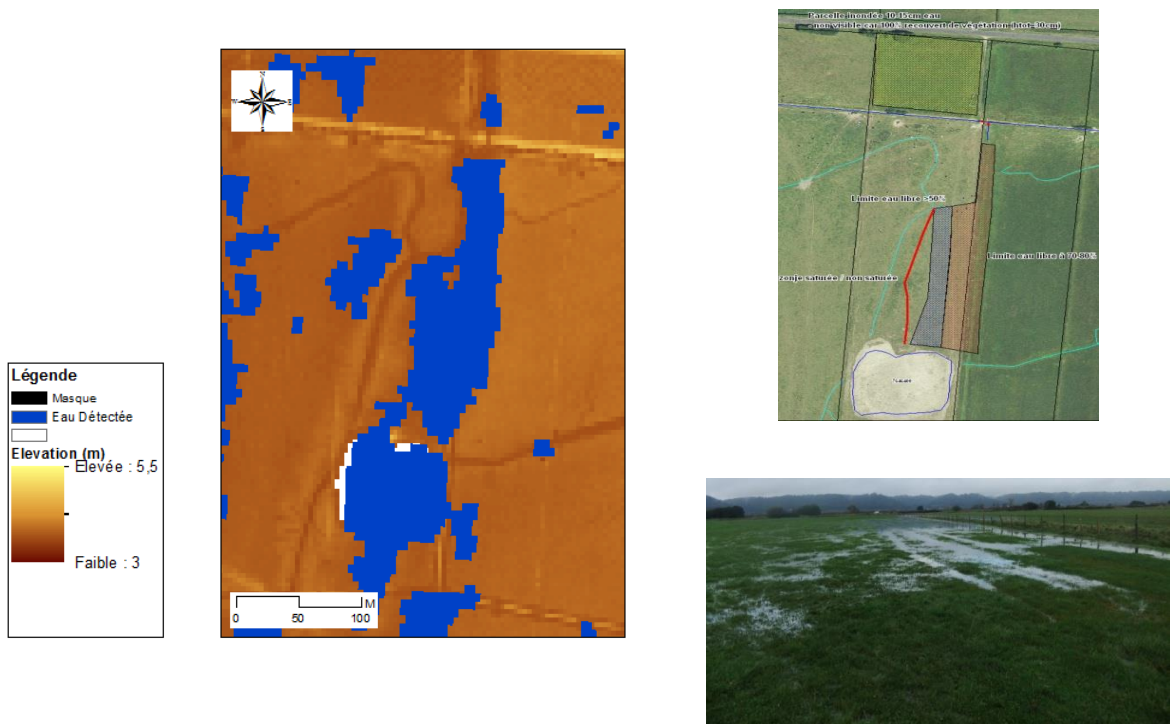


Figure 40 Segmentation du site 6 (référence Figure 13), image du 3 décembre

5.6 Tableau récapitulatif

Les zones en eau libre comme les mares sont très bien détectées ainsi que les prairies inondées à plus de 60%. Cependant les limites de la méthode sont atteintes lorsqu'il y a une végétation trop

dense ou trop haute. Tous les problèmes de détection pour le printemps sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau 4 Comparaison des observations terrain et de la cartographie RSO

Numero Mare (ref chasse)	Observations			Conclusion
	14/03/2012	05/04/2012	26/04/2012	
76462		vegetation 100%	vegetation 100%	trop de végétation
	détection de la mare	aucune détection (un petit point) puissance augmente	aucune détection	
764170	clap	clap+vegetation	clap+vegetation	trop de végétation
	détection de la mare	partie ouest de la mare disparue partie est non détectée	peu de changement petite partie est non détectée	
764230	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	diminution globale du contour	diminution légère par rapport au 07-avr	
764240	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	diminution très légère sur les bords	aucun changement par rapport au 07-avr	
764530	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	diminution au sud est	aucun changement	
764780		en eau	vegetation 100%	trop de végétation?
	détection de la mare	aucune détection	reste un point d'eau (quelques pixels)	
764850			à sec	
	détection de la mare	diminution forte du contour	reste un point d'eau au nord (quelques pixels)	
MPH004		vegetation 100%	vegetation 100%	trop de végétation
	détection de la mare	aucune détection	aucune détection	

5.7 Limitations

5.7.1 Eau sous végétation

L'une des limitations de la méthode est la présence d'eau sous un dense couvert végétal. Il s'agit d'une limitation connue des images RSO en bande-C puisque le signal est fortement influencé par la végétation à la surface de l'eau et la puissance rétrodiffusée provient principalement de la multiple diffusion de l'onde sur le couvert végétal.

Cette limitation était connue avant le début du projet. Néanmoins il a été mentionné, lors de la réunion du 6 juin 2012, qu'il serait nécessaire d'avoir un indice de la possibilité de présence d'eau sous végétation. Il n'est pas possible d'obtenir un tel indice avec l'utilisation seule de l'entropie de Shannon.

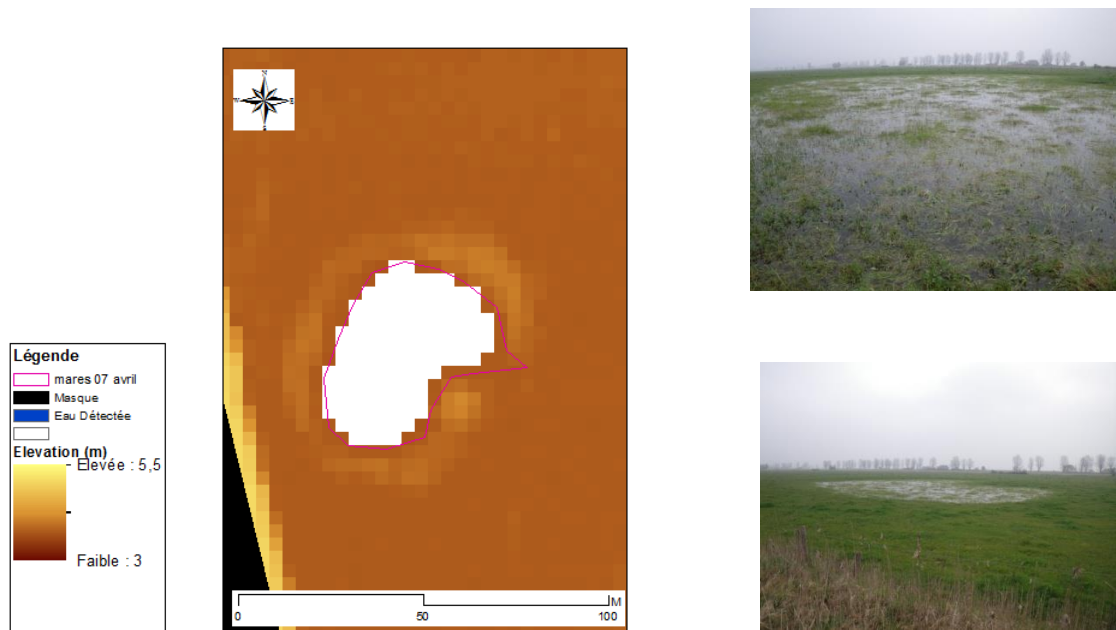


Figure 41 Segmentation de la mare MPH004, image du 7 avril

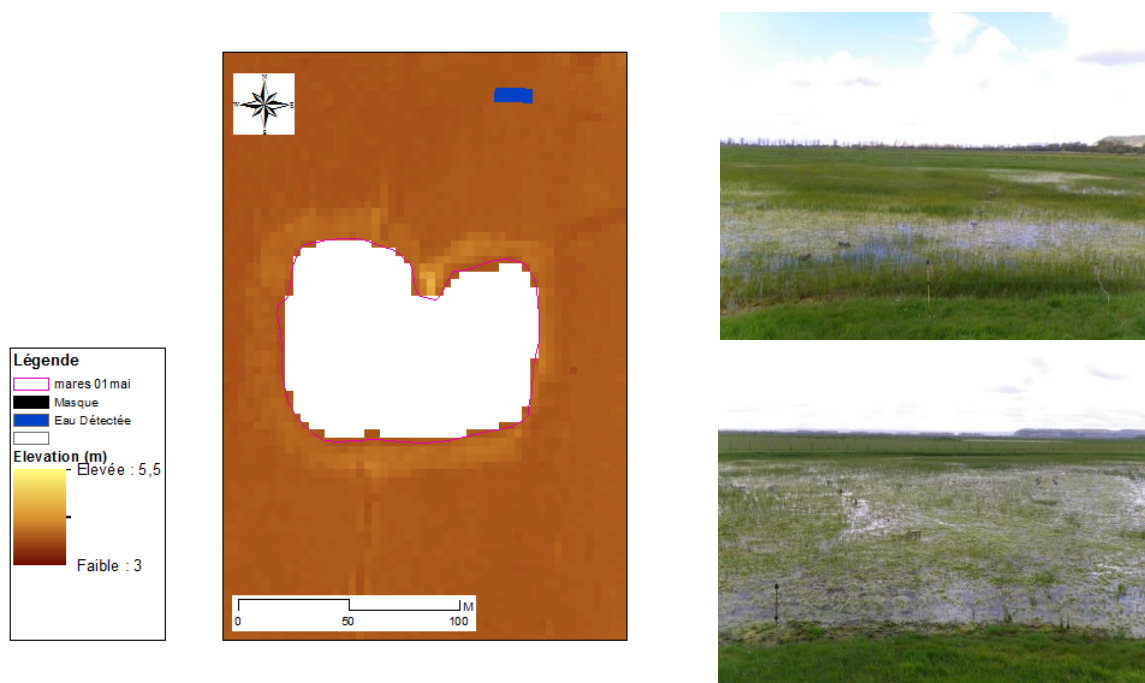


Figure 42 Segmentation de la mare 76462, image du 1^{er} mai

5.7.2 Champ nus labourés

Au 7 avril et au 1^{er} mai (en moindre quantité), des champs nus labourés ont une valeur d'entropie de Shannon d'environ -10 dB et seront donc classifiés comme étant de l'eau (Figure 43). La signature radar de ces champs est fort similaire à celle de l'eau : le signal rétrodiffusé est très faible, et il s'agit principalement d'une diffusion de surface. Etant donné qu'il n'y a pas eu de pluies significatives avant l'acquisition d'avril, rien ne laisse supposer que ces champs aient été inondés.

Il est à noter que la plupart des champs nus labourés qui posent problème pour la segmentation eau/non-eau par entropie de Shannon sont en dehors des zones de mares.

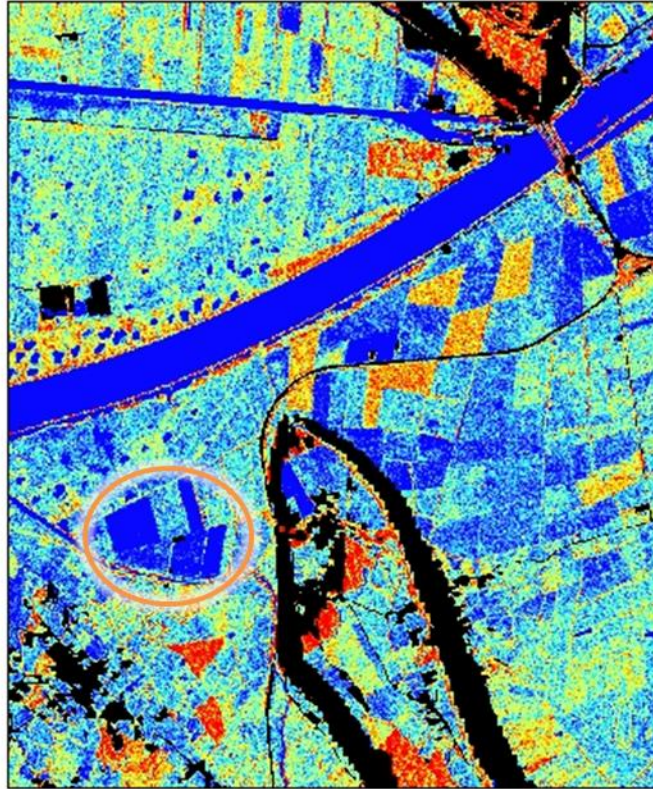


Figure 43 Entropie de Shannon entre -8 dB (bleue) et -2dB (rouge). Champs problématiques encadrés en orange

6 Évolution de la méthodologie

Afin de palier aux limitations rencontrées lors de l'application de la méthode originale, une amélioration utilisant l'information liée aux mécanismes de diffusion est présentée dans cette partie. On propose un masque α_1 pour éliminer les champs nus labourés ainsi qu'un indice qualitatif de présence d'eau sous végétation développé à partir d'une segmentation moins stricte de l'entropie de Shannon et de la décomposition de Freeman en 3 paramètres. Les paramètres α_1 et de la décomposition de Freeman ont été filtrés avec une fenêtre de Lee 7x7 puisqu'ils auraient été insuffisamment moyennés en filtrage 3x3 et donc non-significatifs.

6.1 Masque des champs nus (masque α_1)

Un des problèmes rencontrés sur les premiers résultats est la fausse-alarme dans l'algorithme de détection d'eau sur les champs nus. Afin de le résoudre, une méthode de détection de ces champs nus dont la signature radar de l'entropie de Shannon est similaire à celle de l'eau, est proposée. L'angle α_1 est utilisé pour différencier les zones d'eau des champs labourés puisque ces derniers présentent généralement un angle α_1 plus faible que les mares. Le masque est réalisé par seuillage pour des angles α_1 entre 0 et 15° et un minimum de 200 pixels par zone masquée pour tenir compte de la taille des parcelles agricoles.

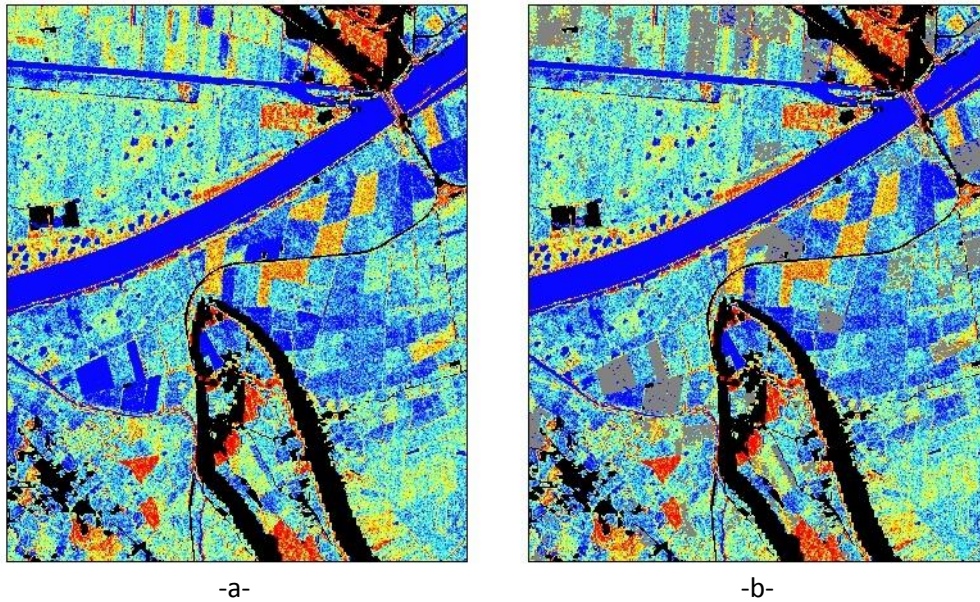


Figure 44 Image d'entropie de Shannon du 07 avril : -a- initiale, -b- avec le masque α_1

Le masque α_1 détecte la plupart des champs labourés, mais certaines zones restent problématiques. En effet, pour certains champs, les valeurs α_1 sont trop élevées pour être discriminées, ce qui peut aussi correspondre à des champs inondés. A noter que les problèmes de confusions surviennent principalement dans les zones en dehors de notre région d'intérêt principale où se trouvent les mares.

6.2 Amélioration de la détection de l'eau

La détection de l'eau sous végétation est déterminée qualitativement à l'aide d'une segmentation moins stricte de l'entropie de Shannon et de 2 critères liés à la décomposition de Freeman.

Etant donné que, pour les pixels où l'on retrouve de l'eau sous végétation, le signal rétrodiffusé est largement influencé par la végétation et donc plus fort, ajouter une tolérance de 1,4 dB (-7 dB au lieu de -8,4dB) permet de classifier une partie des pixels d'eau sous végétation comme étant de l'eau probable.

Par ailleurs, dans la décomposition incohérente de Freeman, la matrice de covariance est modélisée par la contribution de trois mécanismes de diffusion : volume Fv , double rebond Fd et surface Fs .

En général, à la surface de l'eau la contribution de la diffusion de volume est très faible. Le premier des deux critères liés aux paramètres de Freeman vise donc cette particularité.

$$Fv < 0,045 \quad (1.4)$$

Le deuxième critère tient compte du mécanisme de diffusion double rebond, qui peut être assez fort sur de la végétation inondée (l'onde est réfléchi sur l'eau et ensuite réfléchi sur la végétation) et de volume.

$$\frac{Fd}{Fv} > 0,7 \quad (1.5)$$

Les deux paramètres utilisés sont représentés pour l'image de mars sur les Figure 45 et Figure 46.

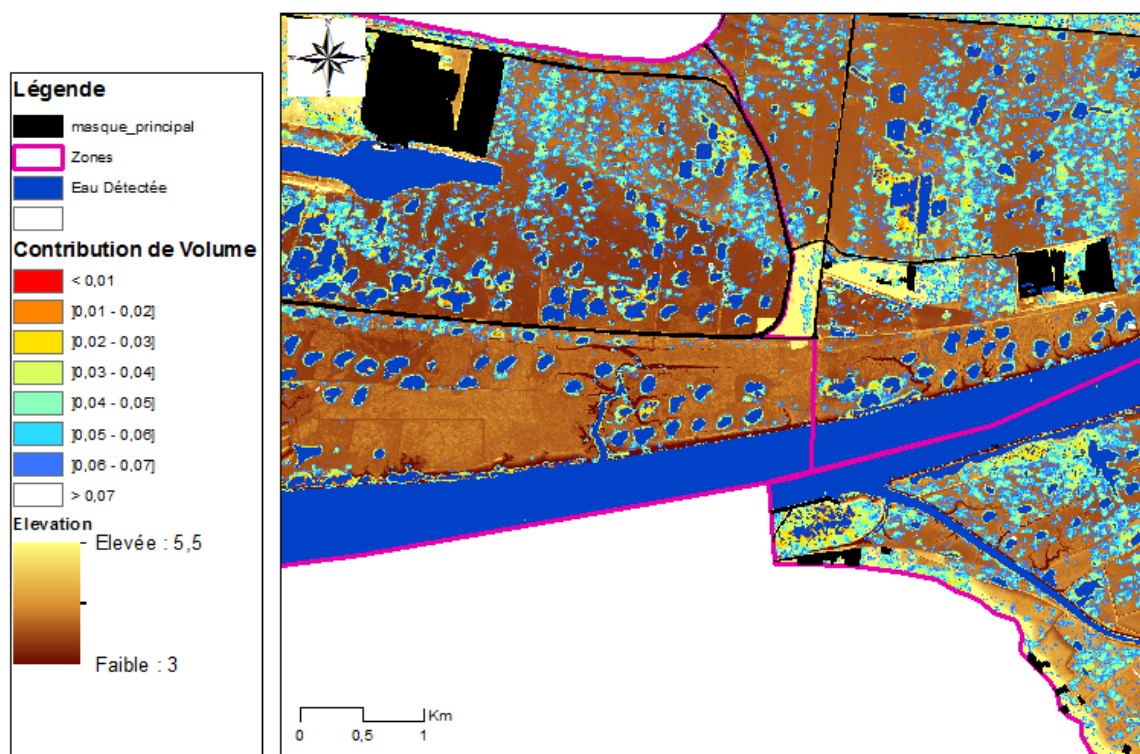


Figure 45 Contribution de la diffusion de volume, image du 14 mars

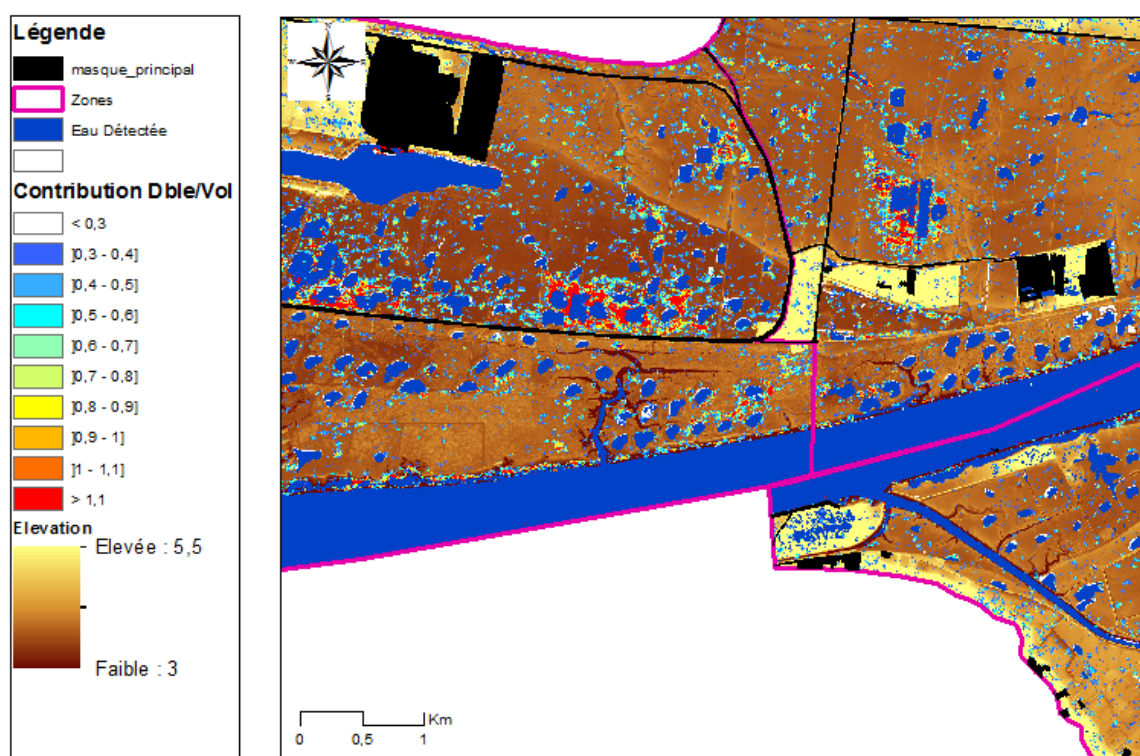


Figure 46 Contribution de la diffusion double rebond sur la diffusion de volume, image du 14 mars

Si seul le premier des critères est validé, il est considéré comme étant possible que se trouve de l'eau sous végétation. Si les deux critères sont respectés, il est considéré comme étant probable que se trouve de l'eau sous végétation.

6.3 Nouvelle méthode de segmentation

En tenant compte des modifications proposées aux sections précédentes, i.e. le masque α_1 et la détection de l'eau sous végétation (étude qualitative) ; une nouvelle chaîne de traitement est définie. Cette classification, décrite à la Figure 47 comporte les classes suivantes :

Tableau 5 Classes de la nouvelle méthode de segmentation

Classe	Nom	Description
1	Masque Principal	Le masque est composé de : <ul style="list-style-type: none"> • Ombres et recouvrements RSO • Angles d'incidence locale projetés inférieurs à 45° ou supérieurs à 52° • Zone artificialisées selon la carte d'occupation des sols
2	Masque α_1	Pixels du masque $\alpha_1 < 15^\circ$ afin d'éliminer la majorité des champs nus labourés.
3	Eau	Pixels détectés comme étant de l'eau
4	Non eau	Pixels non-détectés comme étant de l'eau
5	Eau possible (présence d'eau avec une probabilité très forte)	La diffusion volumique est faible, par contre, le rapport diffusion double-rebond, diffusion de volume est inférieur à 0,7
6	Eau probable (présence d'eau avec une probabilité 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

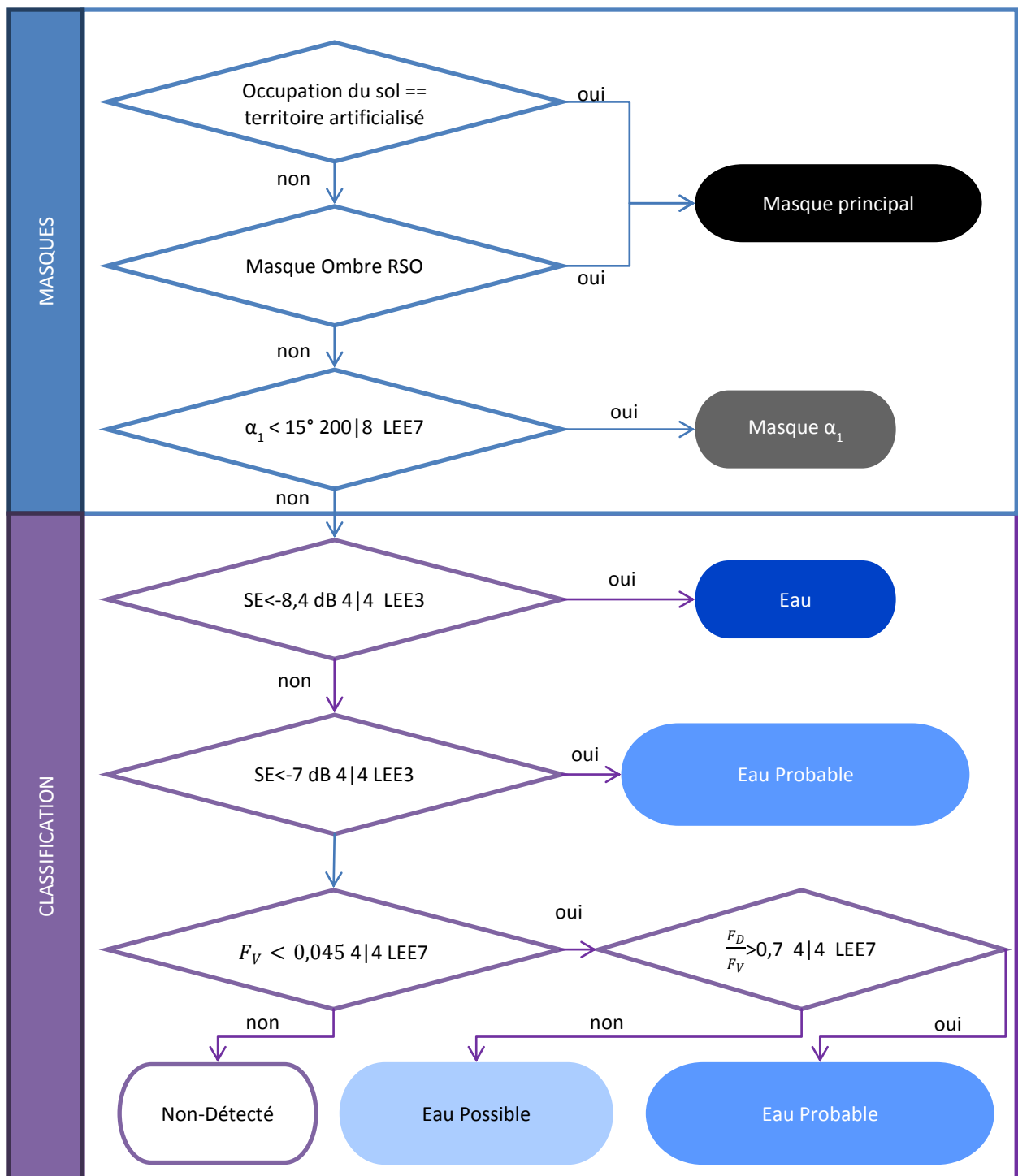


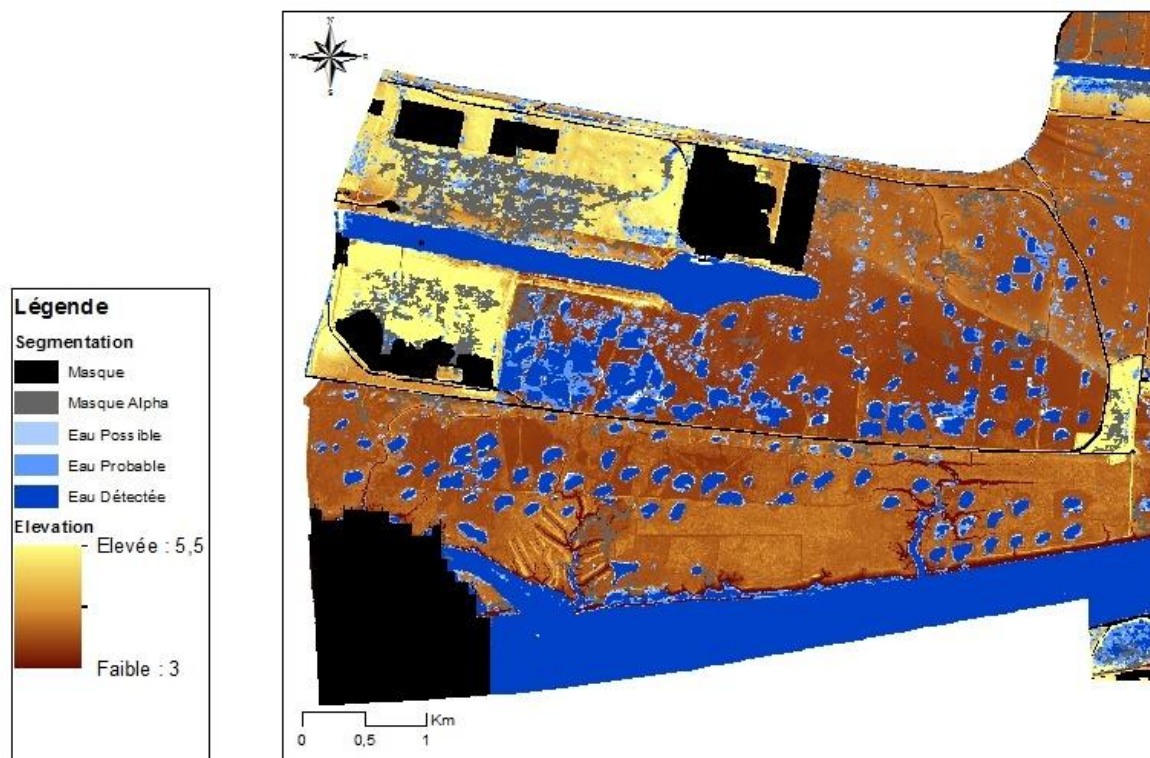
Figure 47 Arbre de décision de la nouvelle méthode

7 Résultats de la nouvelle segmentation

7.1 Image du 14 mars

7.1.1 Détection sur la zone entière

Pour l'image de mars, la nouvelle méthode de décision permet de détecter un peu plus d'eau surtout dans la classe eau possible autour des mares et dans les prairies. L'amélioration concerne principalement les prairies inondées comme montré sur la zone 1 des prairies Hodes (Figure 48) à l'endroit de la photo 2 (Figure 14) devant les mares. La même constatation peut être faite sur les prairies subhalophiles à partir de la photo 1 où la partie de prairie non-détectée avec la segmentation initiale devient de l'eau probable. L'eau présente sur les champs ou prairies au sud du canal de Tancarville n'est pas masquée. Cette zone est très souvent détectée en eau sur les images, il serait intéressant d'aller voir sur place les caractéristiques de ces terrains pour mieux comprendre les résultats.



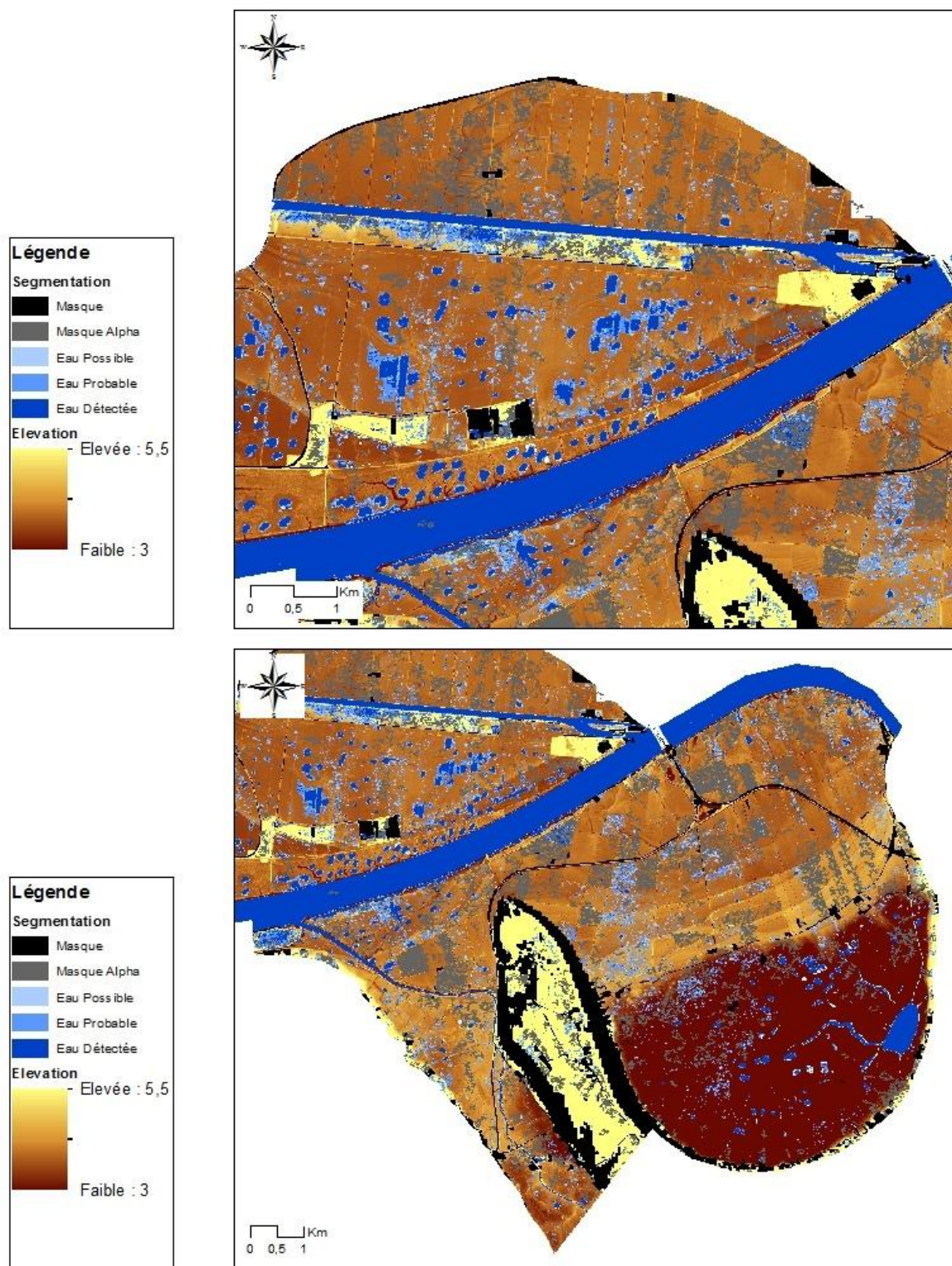


Figure 48 Segmentations des 3 zones, image du 14 mars

7.1.2 Etude détaillée de sites

Les résultats sur la mare 76417 (Figure 49) montrent que la zone de clap et l'eau recouverte partiellement de végétation (type prairie ou fleur hydrophiles) comme représentée sur la photo du milieu sont classées comme eau probable et possible. La zone complètement recouverte de

végétation à l'est de la mare reste bien non-détectée. La zone au nord de la mare est avec la nouvelle méthode proposée détectée comme de l'eau probable et possible, ce qui d'après la photo aérienne correspond à la vérité terrain. Pour les mares 76462 et 76453, très peu de différences sont à noter hormis les bords des mares. Ces résultats sont en meilleure adéquation avec les constatations faites sur le terrain que ceux obtenus avec la méthode initiale.

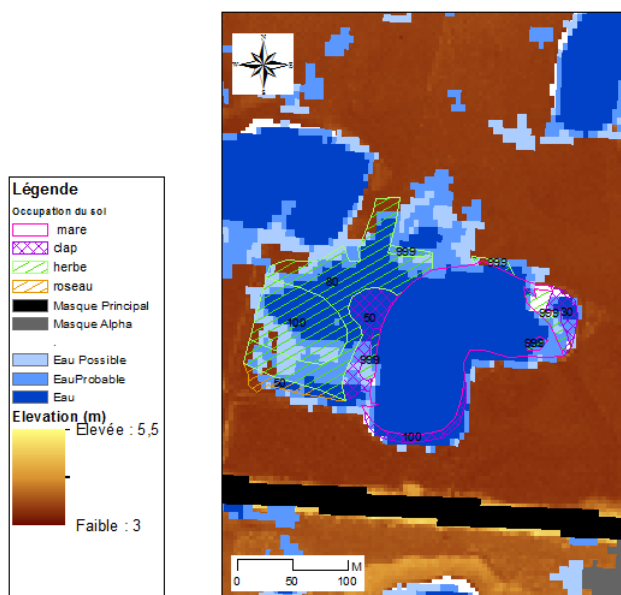
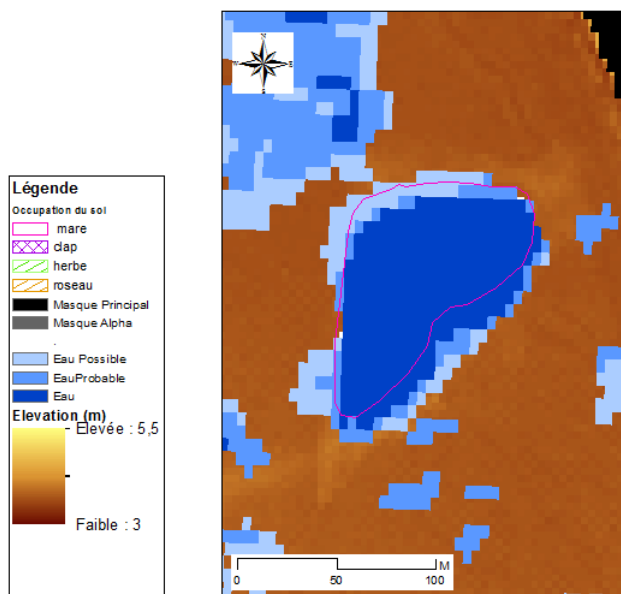
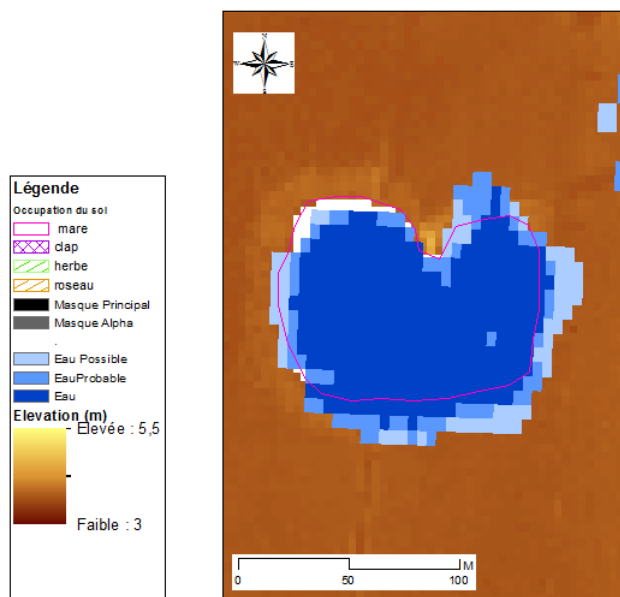


Figure 49 Segmentation de la mare 76417, image du 14 mars



Vue de la mare depuis le nord-est

Figure 50 Segmentation de la mare 76453, image du 14 mars



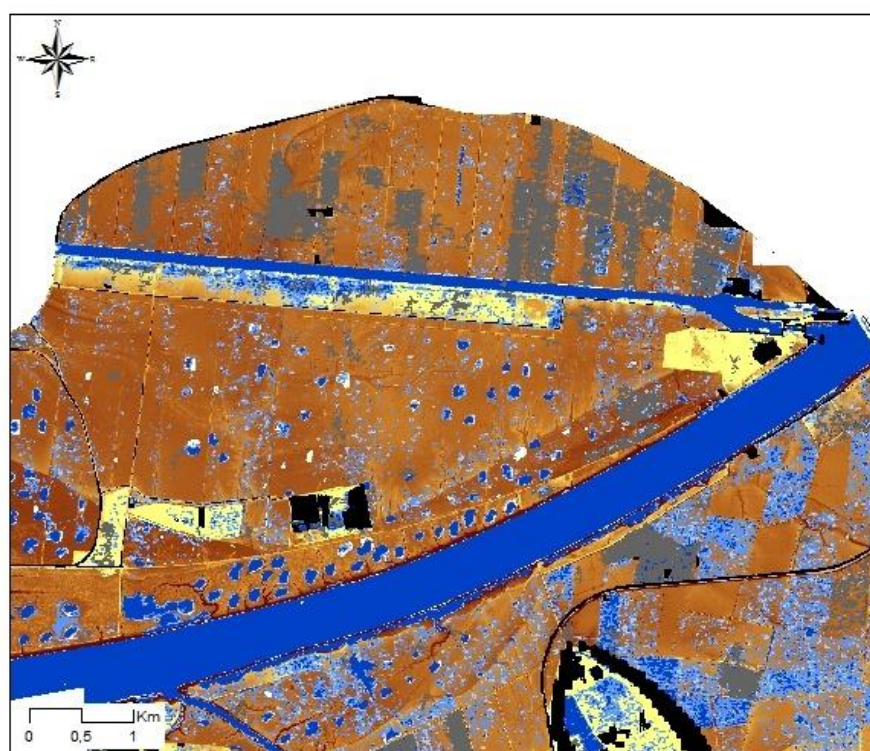
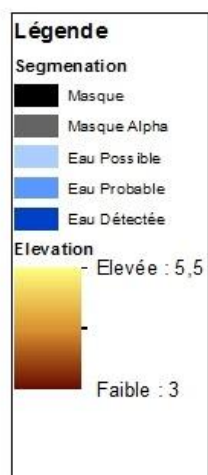
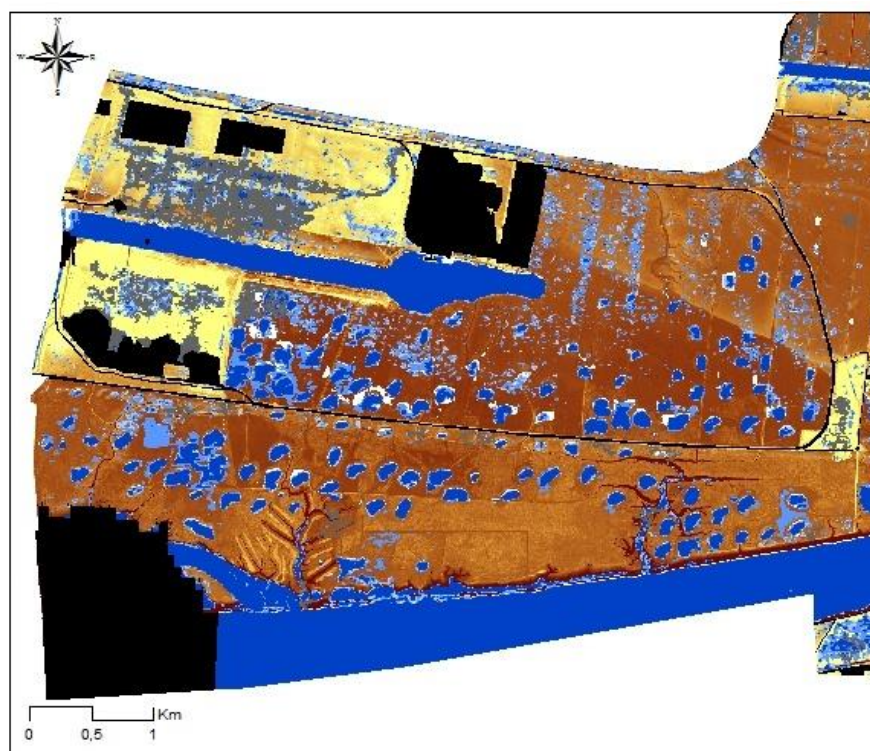
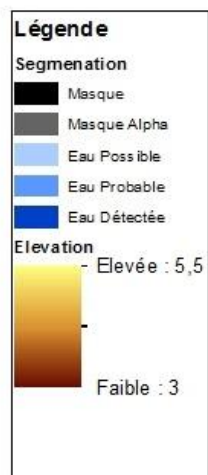
Vue de la mare depuis le nord-ouest

Figure 51 Segmentation de la mare 76462, image du 14 mars

7.2 Image du 07 avril

7.2.1 Détection sur la zone entière

Les résultats présentés dans la partie 5 indiquaient pour l'image d'avril comme pour l'image de mai une sous-détection des mares en eau recouvertes de végétation. Le but de cette nouvelle segmentation est aussi de détecter l'eau dans ces mares. Dans la zone 2, de nombreuses mares non détectées au départ sont détectées comme eau possible. Dans la zone 1, les mares ont été toutes détectées en eau mais souvent leurs emprises en eau ont été sous-estimées, la nouvelle méthode permet de repérer plus d'eau. Cependant, sur les trois zones et particulièrement dans le marais Vernier, de nombreux champs sont détectés en eau. Ce point sera aussi étudié sur les autres images pour valider ou non ces résultats.



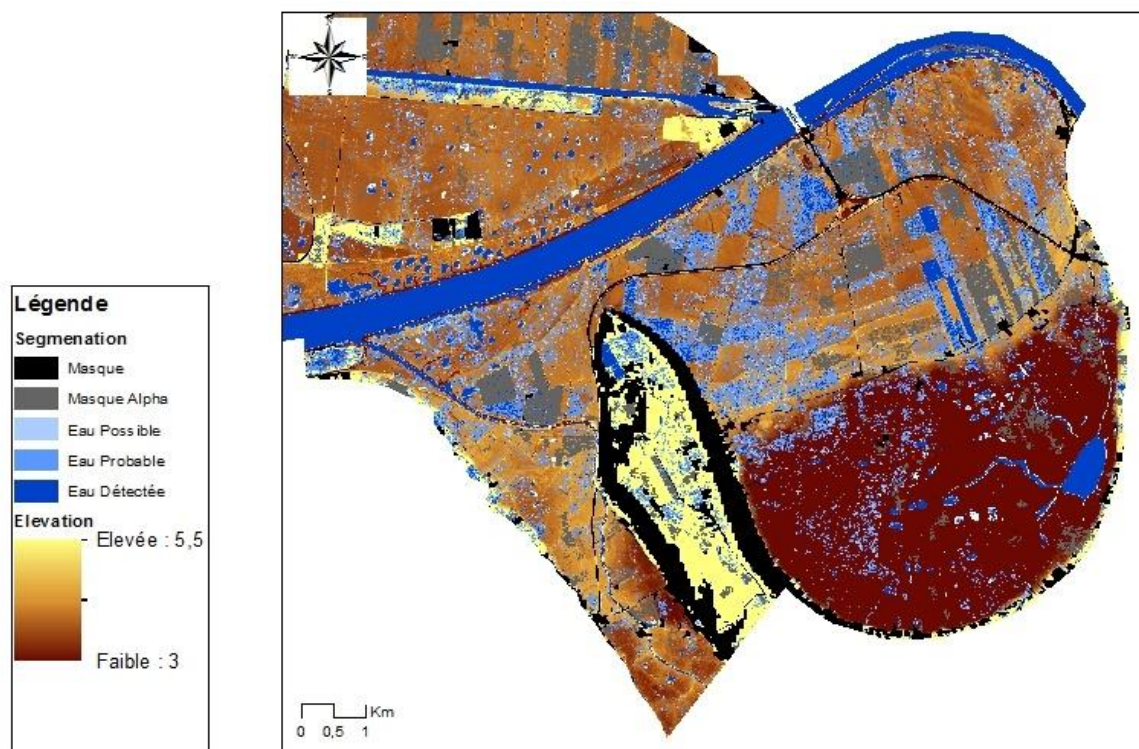


Figure 52 Segmentations des 3 zones, image du 07 avril

7.2.2 Etude détaillée de sites

Dans la mare 76417, quelques pixels sont détectés avec la nouvelle segmentation comme eau probable sur la petite région inondée au nord-est montrée au centre de la première photo. Au nord-ouest de la mare, vers le haut de la 3^{ème} photo, la région submergée qui n'est pas détecté sur la segmentation initiale est classée comme eau probable.

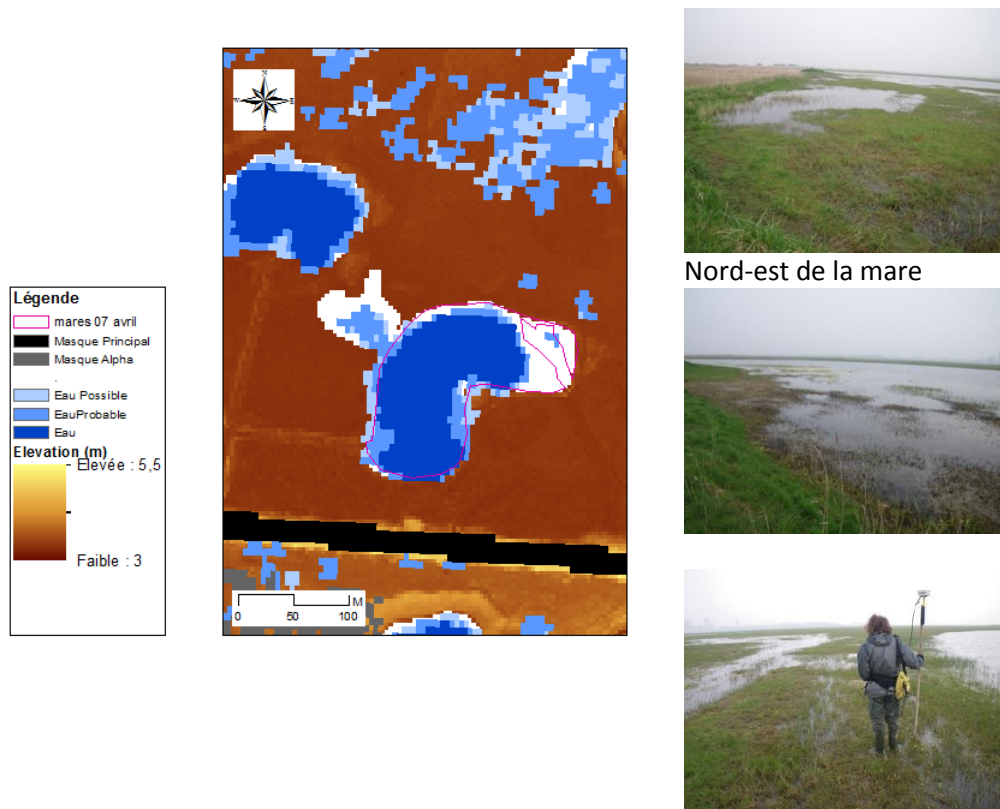
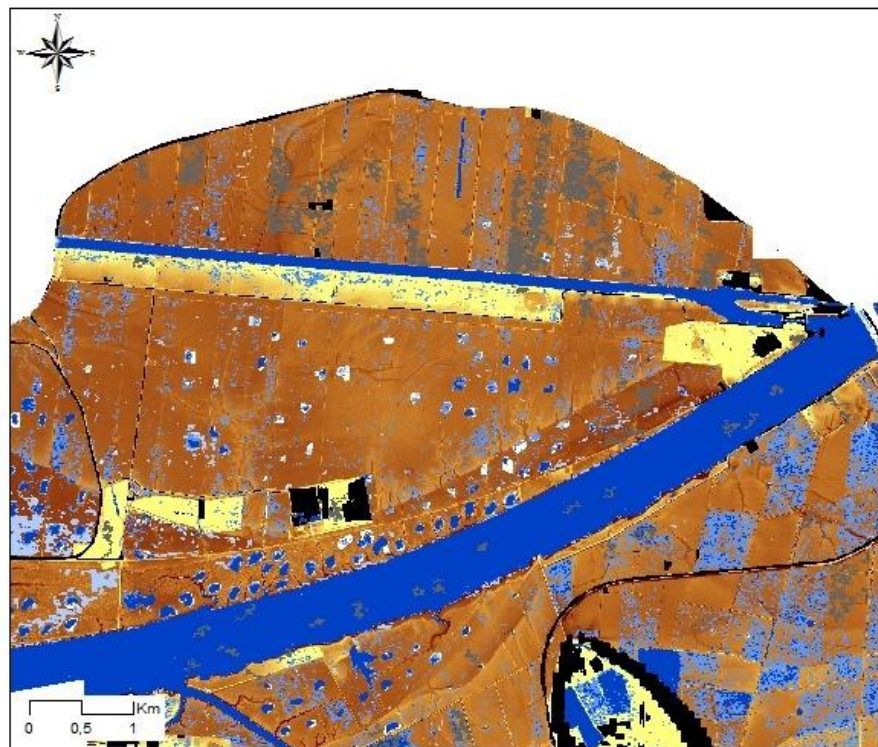
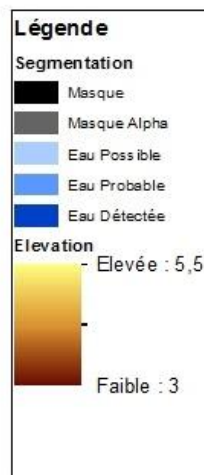
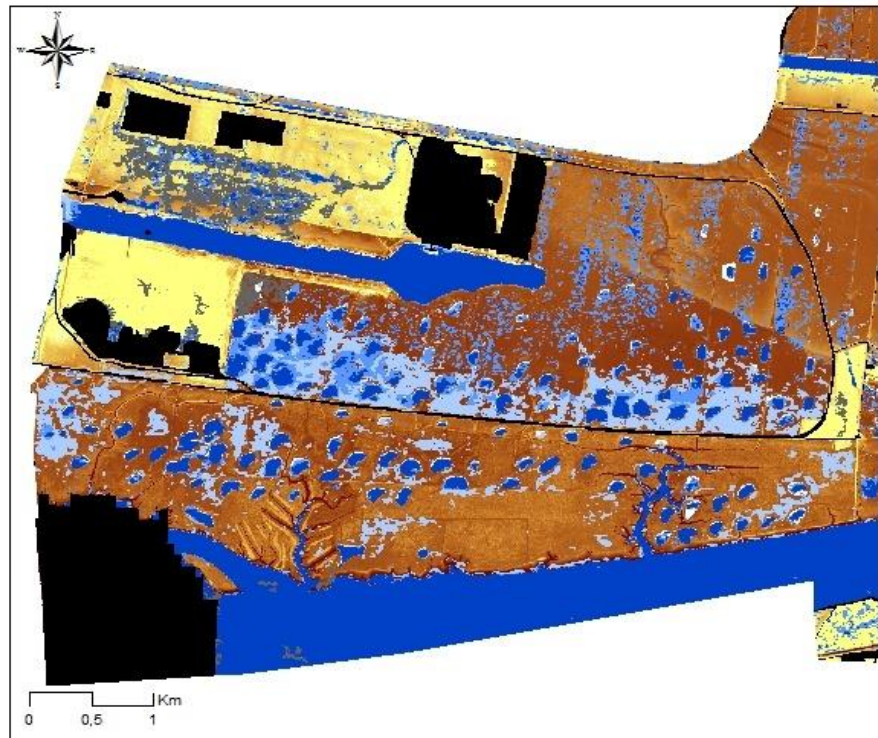
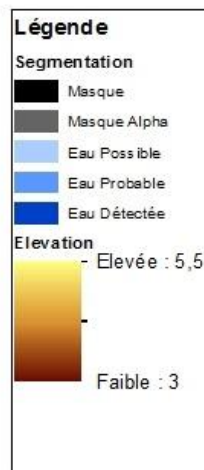


Figure 53 Segmentation de la mare 76417, image du 7 avril

7.3 Image du 01 mai

7.3.1 Détection sur la zone entière

Avec la nouvelle méthode de classification, les zones en eau sont beaucoup plus nombreuses, surtout dans les praires Hodes où quasiment toute la roselière est détectée en eau possible. Ce n'est pas le cas pour la roselière le long de la Seine. Les fortes pluies peuvent en partie expliquer ces résultats. Sans photo aérienne, ces conclusions restent incertaines.



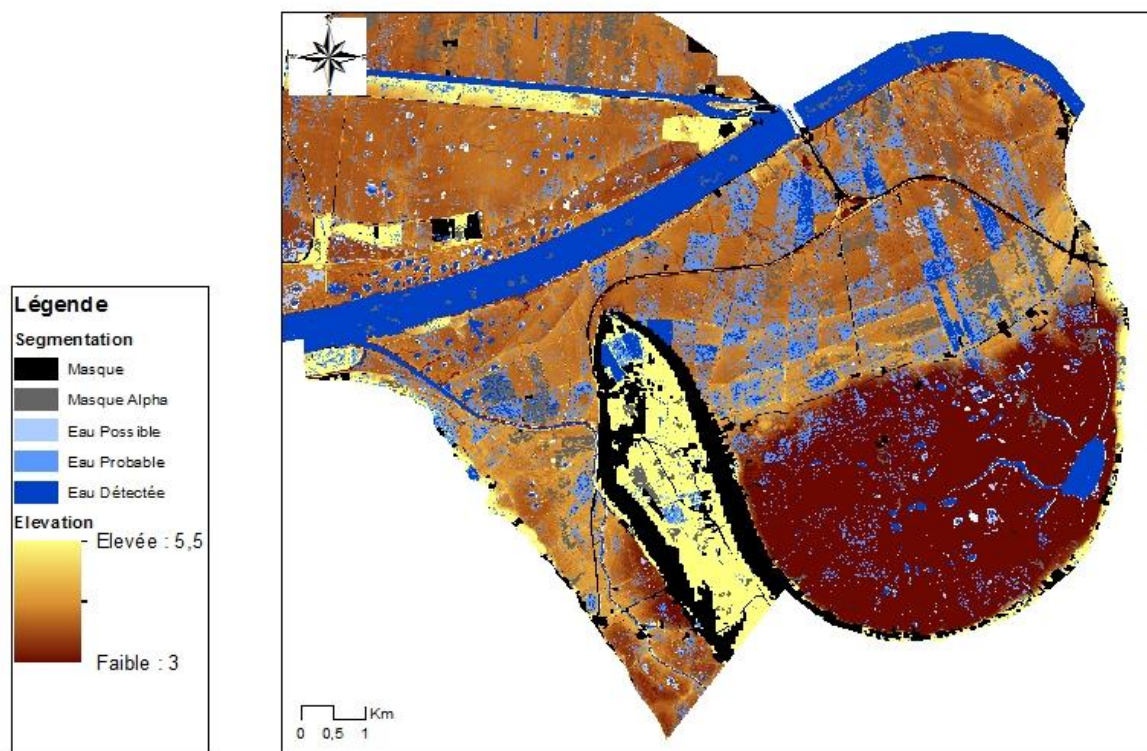


Figure 54 Segmentations des 3 zones, image du 1^{er} mai

7.3.2 Etude détaillée de sites

La classe eau probable (présence d'eau avec une probabilité très forte) représente les parties de la mare illustrées par les photos. Toute les régions en eau mais recouvertes de 'herbe ou de petite végétation sont détectées. La classe eau possible (présence d'eau avec une probabilité forte) est plus difficile à valider. Elle correspond sur cette image à la roselière. Il serait intéressant de connaître les caractéristiques de la roselière à cette époque pour valider ces résultats.

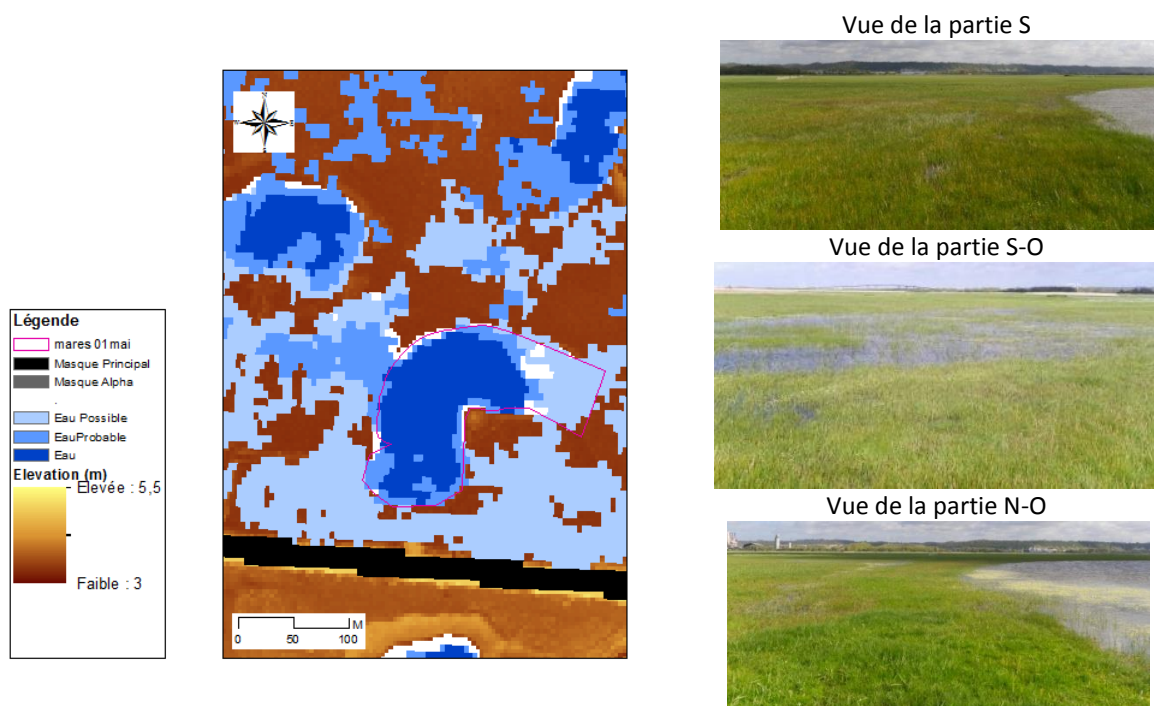
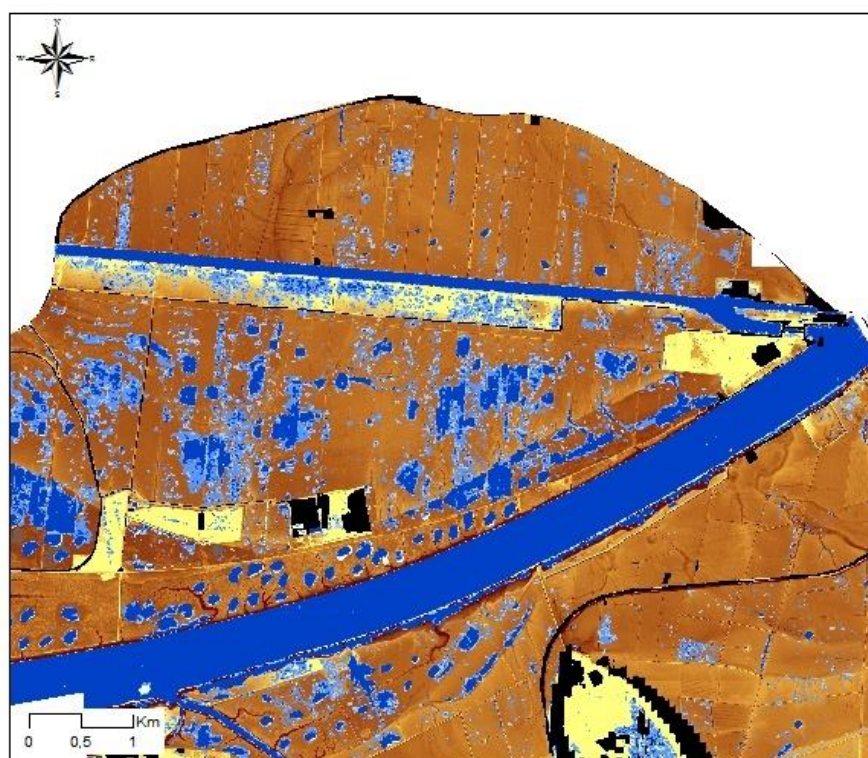
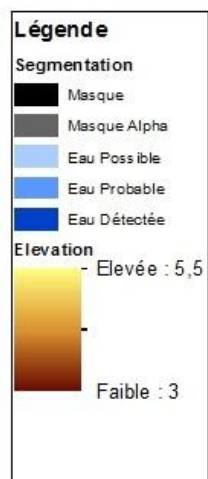
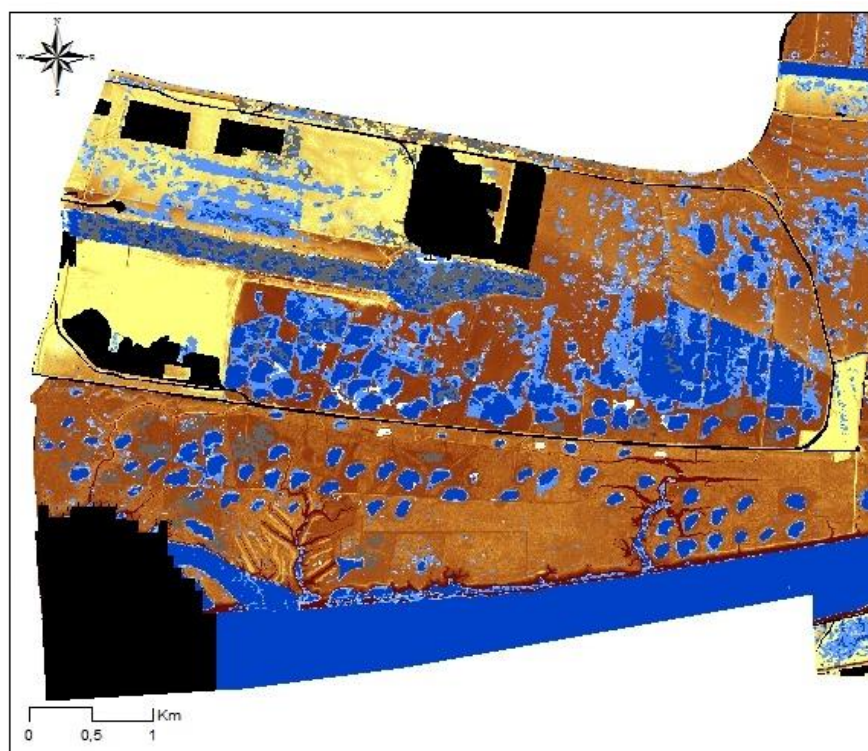
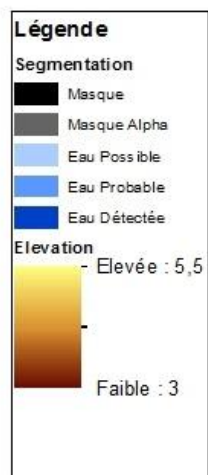


Figure 55 Segmentation de la mare 76417, image du 1^{er} mai

7.4 Image du 31 octobre

7.4.1 Détection sur la zone entière

Pour l'image d'octobre, les mares et les prairies sont détectées avec plus d'eau que la méthode initiale. Les résultats montrent que les classes eau probable et possible correspondent en partie aux baissières. L'entropie de Shannon ne fonctionne pas sur ces zones car le mécanisme de double rebond peut être important et la puissance rétrodiffusée est alors plus élevée que le seuil choisi initialement. Les prairies inondées sont aussi plus détectées car le mécanisme de diffusion multiple est pris en compte. Par ailleurs, une importante partie de la zone affectée par la bavure sur l'image due au prétraitement est masquée par le masque alpha sur le grand canal.



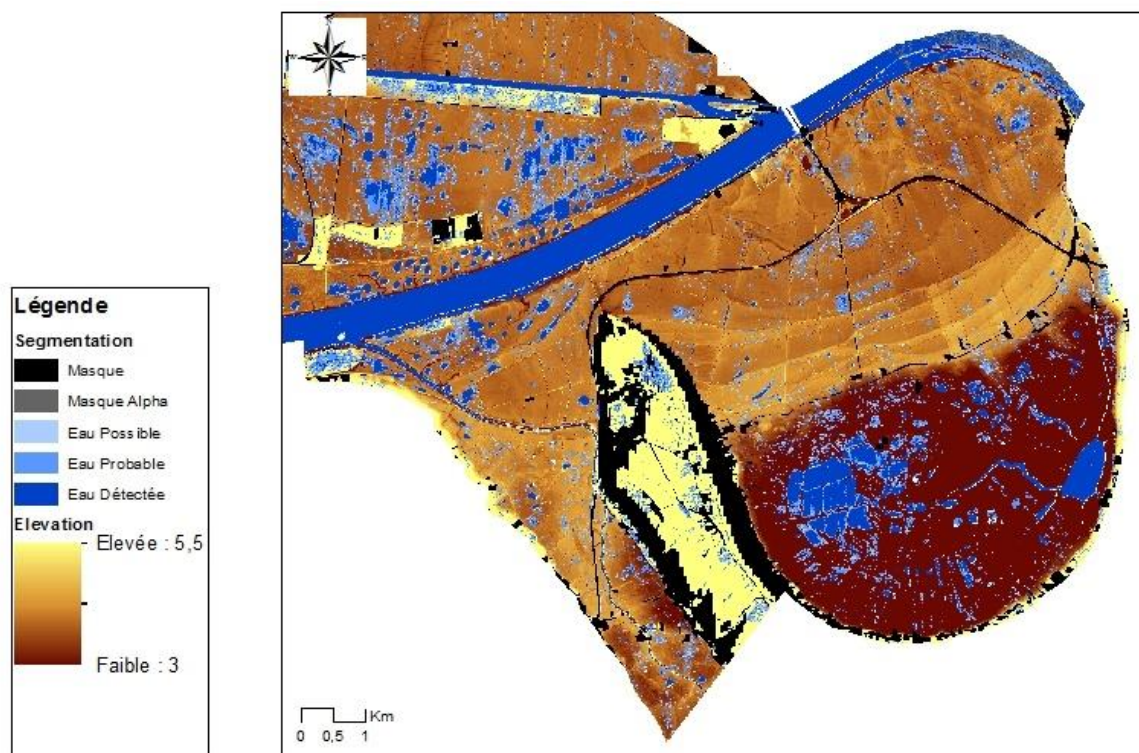


Figure 56 Segmentations des 3 zones, image du 31 octobre

7.4.2 Etude détaillée de sites

Le pourtour de la mare76417 (Figure 57) est détecté comme eau probable. En superposant à la carte d'occupation des sols réalisée en 2009, il est très intéressant de constater que la limite de l'eau détectée correspond à la limite entre les prairies et la roselière ce qui serait logique vu les conditions pluviométriques. Pour le site 4 (Figure 58), le nouvel arbre de décision permet principalement de combler les « trous » dans les résultats de la classification initiale. Le relevé GPS permettra de confirmer les contours de segmentation. Les résultats obtenus sur le dernier site étudié (Figure 59) montrent que les zones inondés à 50% ou moins sont détectées comme eau probable juste à côté de l'eau libre et comme eau possible ensuite ce qui est très logique.

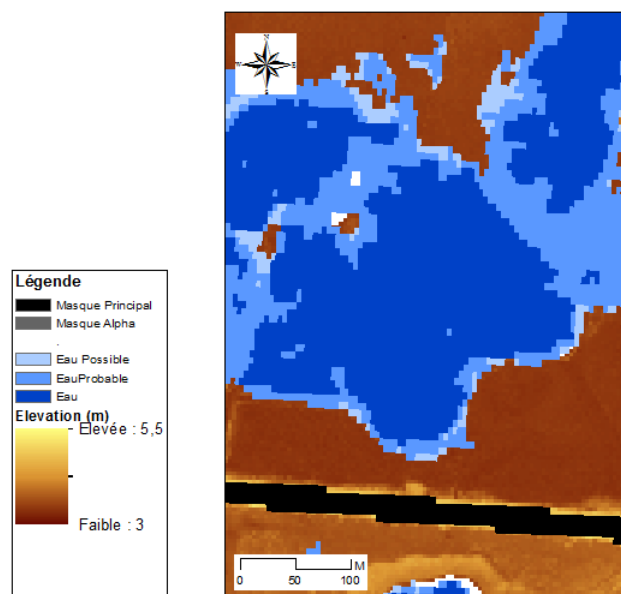


Figure 57 Segmentation de la mare 76417, image du 31 octobre

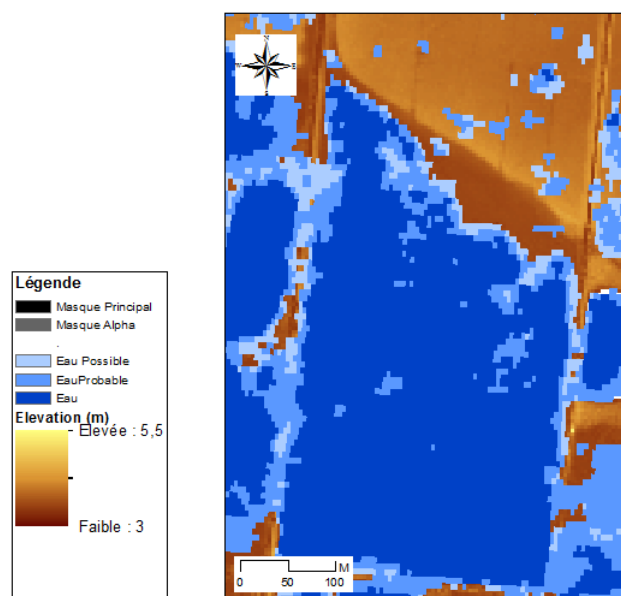


Figure 58 Segmentation du site 4 (référence Figure 13), image du 31 octobre

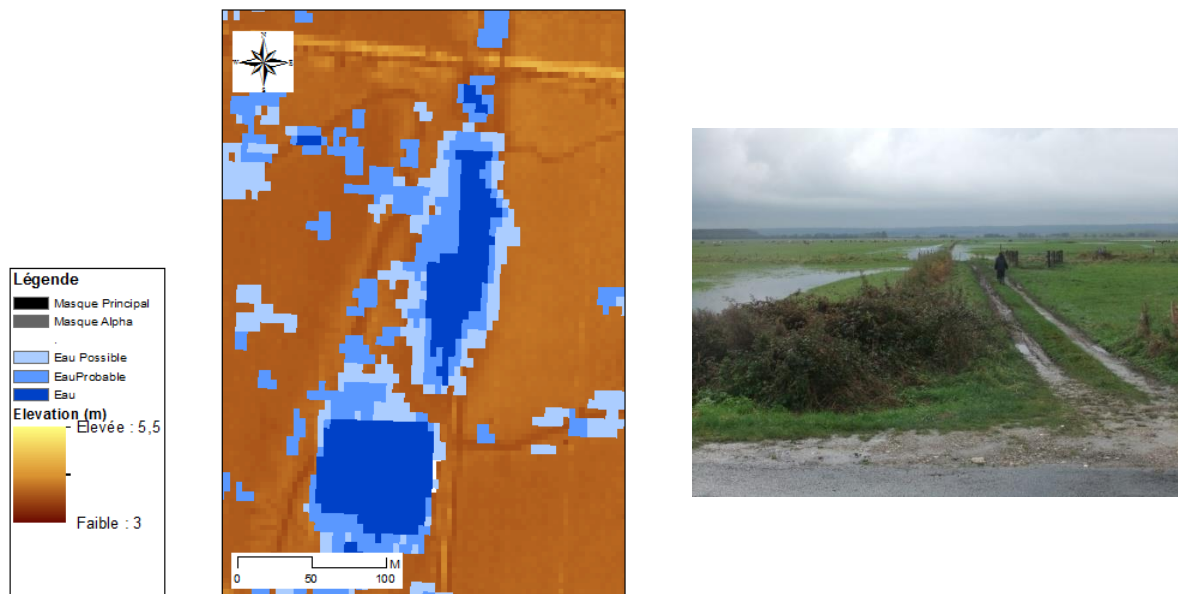
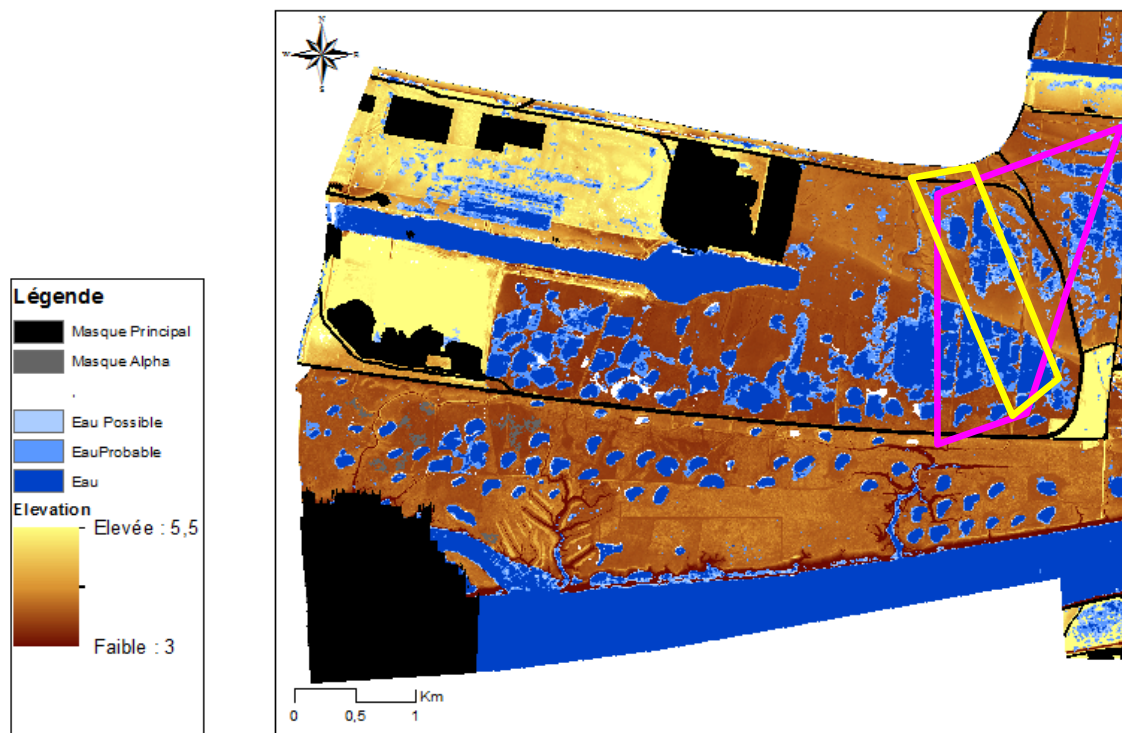


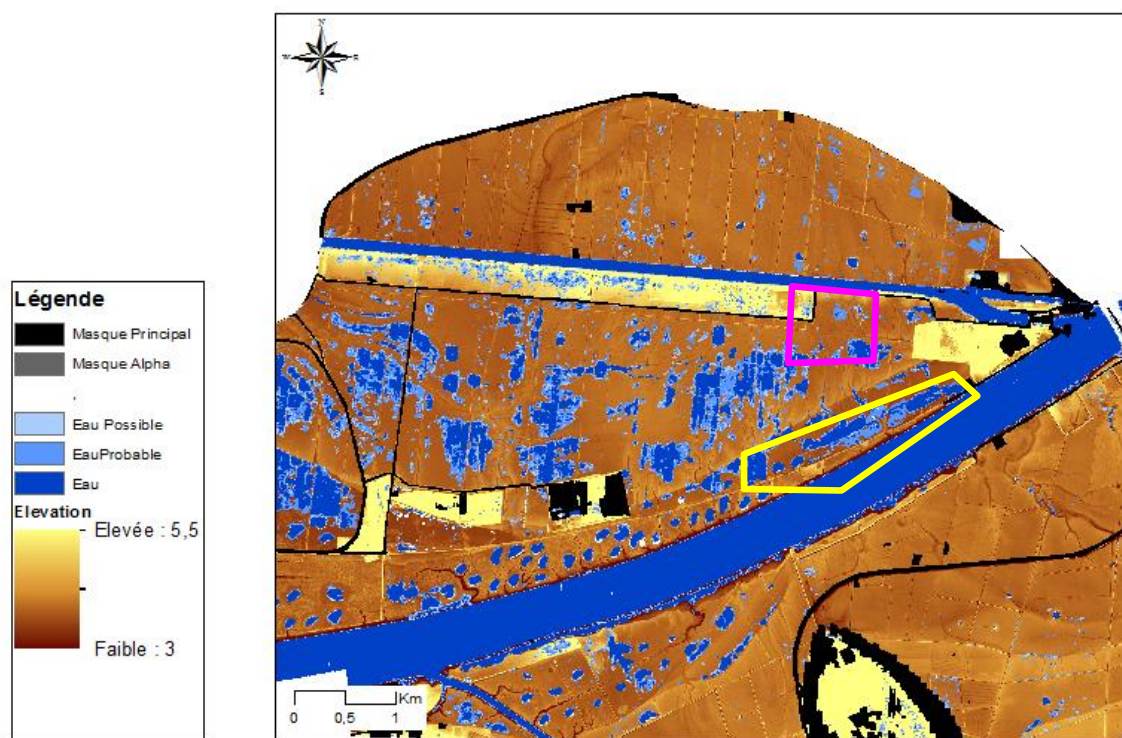
Figure 59 Segmentation du site 6 (référence Figure 13), image du 31 octobre

7.5 Image du 3 décembre

7.5.1 Détection sur la zone entière

Les prairies en eau sont mieux détectées avec la nouvelle méthode. Cependant la zone au nord des prairies hodes présentent des résultats assez étonnants, montrant de l'eau dans des champs qui ne paraissaient pas inondés sur le terrain.





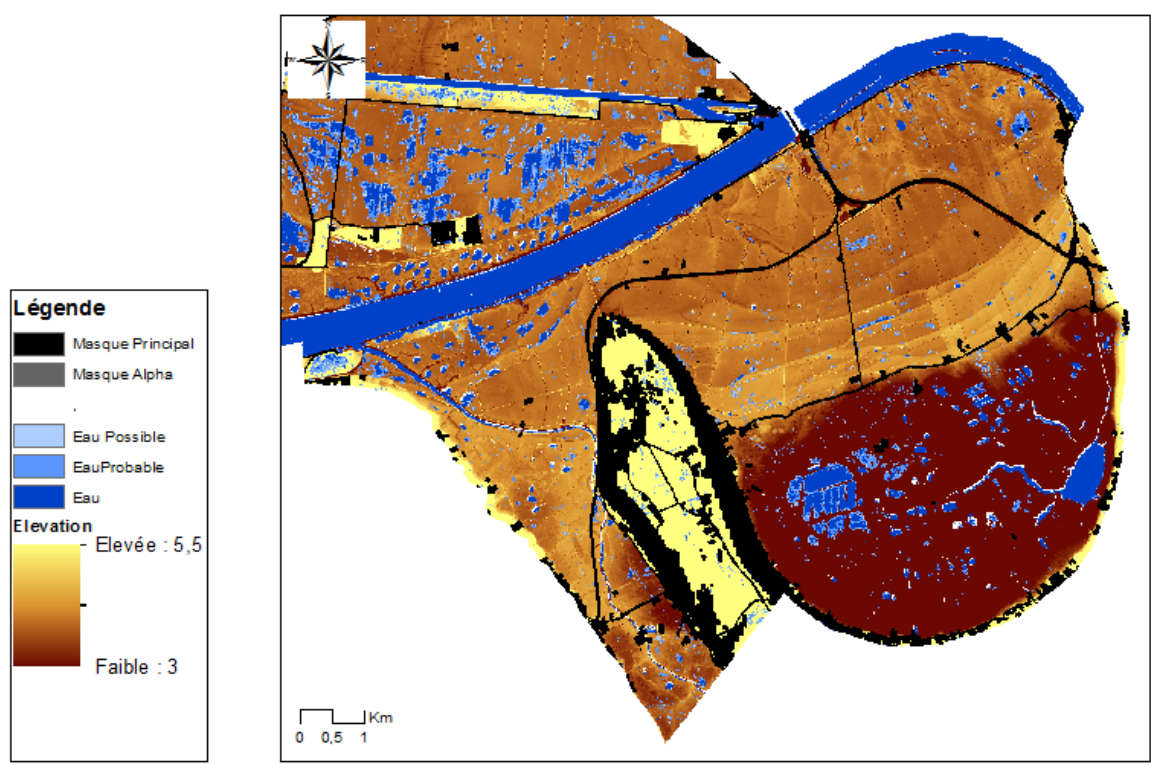


Figure 60 Segmentations des 3 zones, image du 3 décembre

7.5.2 Etude détaillée de sites

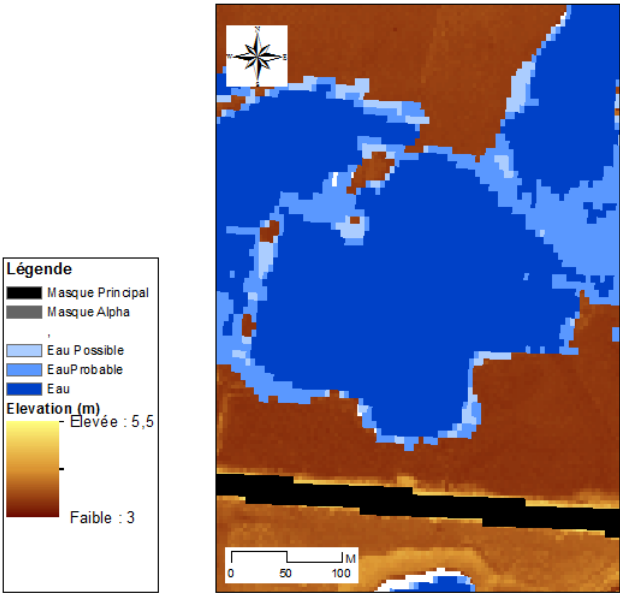


Figure 61 Segmentation de la mare 76417, image du 3 décembre

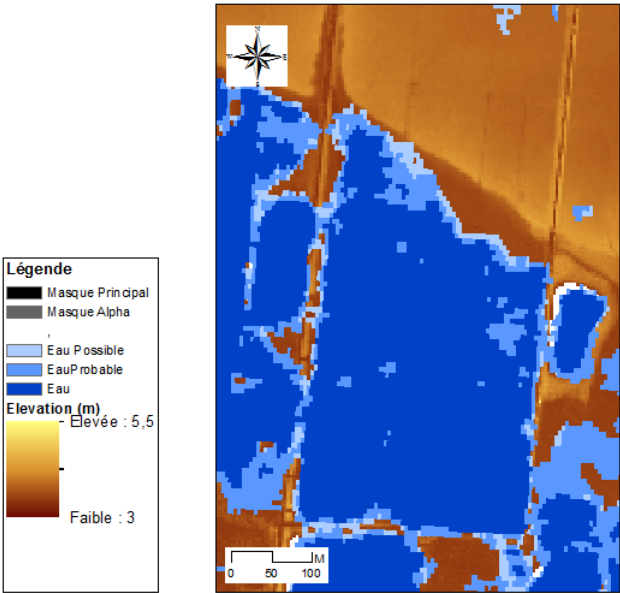


Figure 62 Segmentation du site 4 (référence Figure 13), image du 3 décembre

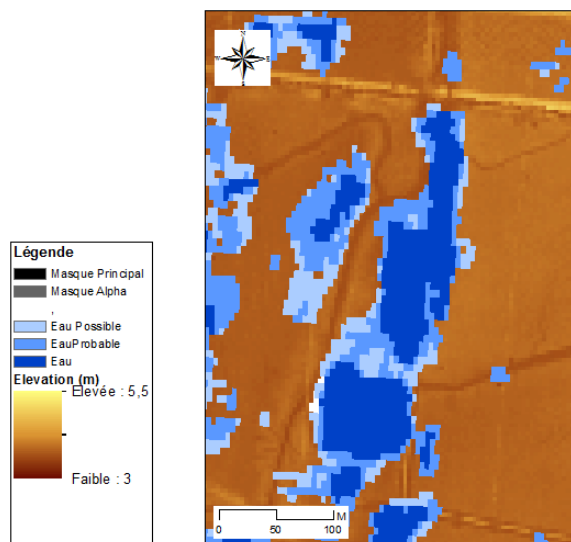


Figure 63 Segmentation du site 6 (référence Figure 13), image du 3 décembre

7.6 Tableau récapitulatif

Le tableau présenté en section 5.5 est repris et les avantages de la nouvelle segmentation sont indiquées sur la détection en eau des mares observées sur le terrain.

Tableau 6 Comparaison des observations terrain et de la cartographie RSO

Numero Mare (ref chasse)	Observations			Conclusion
	14/03/2012	05/04/2012	26/04/2012	
76462		vegetation 100%	vegetation 100%	Meilleure détection de la mare qu'en binaire
	détection de la mare	Détection de la moitié sud-est de la mare	Détection des ¾ Est de la mare	
764170	clap	clap+vegetation	clap+vegetation	Meilleure détection de la mare qu'en binaire
	détection de la mare un peu plus large qu'en binaire	détection de la mare un peu plus large qu'en binaire	mare bien détectée + détection de la roselière environnante	
764230	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	détection de la mare un peu plus large qu'en binaire	détection de la mare un peu plus large qu'en binaire	
764240	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	détection de la mare	détection de la mare	
764530	PAS DE VARIATION NOTABLE			Bien détectée
	détection de la mare	Détection de la mare	aucun changement	
764780		en eau	vegetation 100%	Détection partielle, trop de végétation?
	détection de la mare un peu plus large qu'en binaire	Détection de la moitié de la mare	quelques pixels supplémentaires de la mare par rapport à binaire	
764850			à sec	*bien détectée
	détection de la mare	détection de la mare mare plus large qu'en segmentation binaire		
MPH004		vegetation 100%	vegetation 100%	Détection partielle,

	détection de la mare plus large qu'en segmentation binaire	bien détectée	Détection partielle	trop de végétation
--	--	---------------	---------------------	--------------------

8 Dégradation de l'information polarimétrique

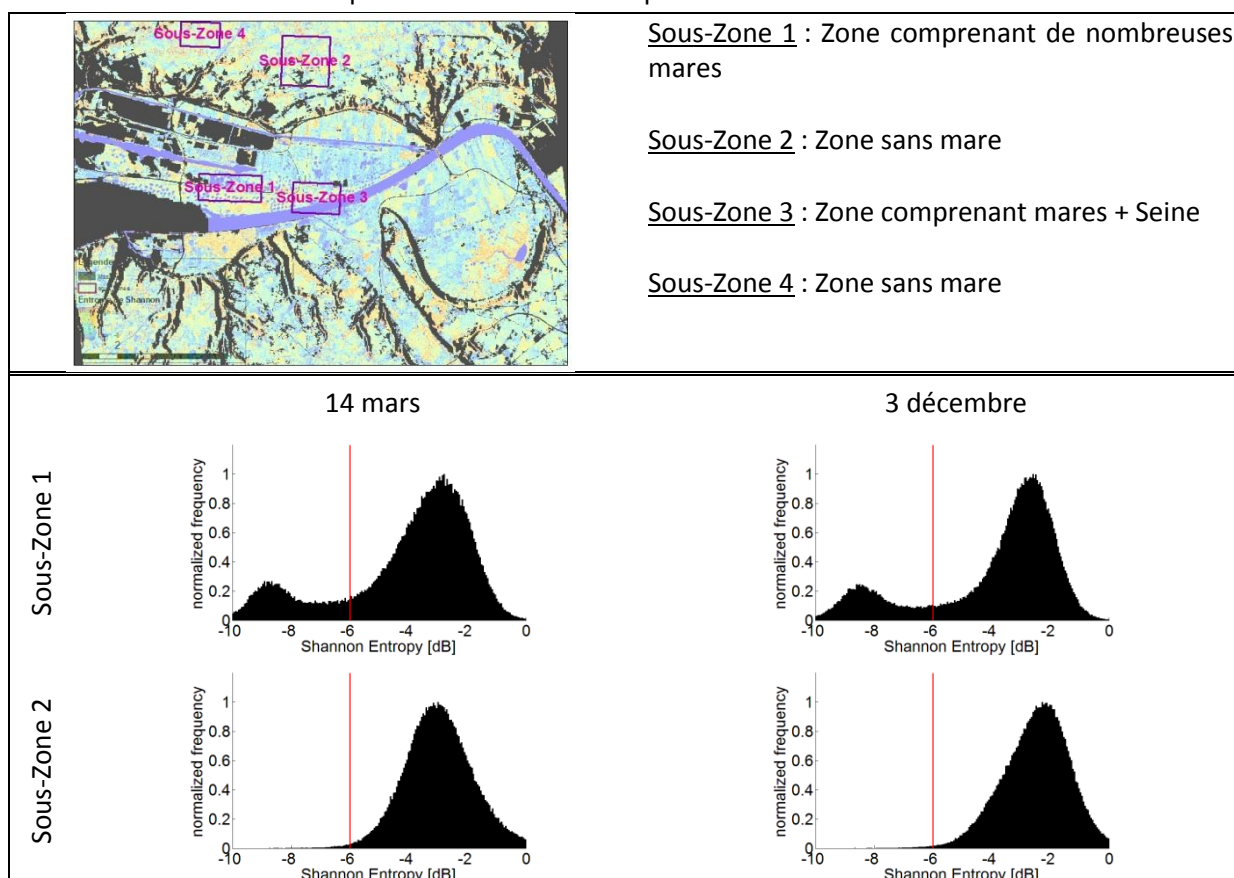
La méthode présentée dans la partie précédente nécessite l'utilisation de données polarimétriques (4 canaux de polarisation). Afin de minimiser les coûts d'une telle image, la méthode de segmentation eau/ non eau est adaptée à des données utilisant deux canaux polarimétriques (dual polarisation) et un canal polarimétrique (single polarisation). Seuls les résultats obtenus sur les images du 14 mars et du 3 décembre sont montrés dans le rapport.

8.1 Polarisation Double (Dual pol)

Les canaux utilisés sont les canaux HH et HV. Afin de définir le seuil, des histogrammes de différentes sous-zones de la région d'étude ont été analysés (Figure 64) pour les dates du 14 mars et du 3 décembre.

Les sous-zones 1 et 3 contenant des mares présentent 2 pics distincts alors que les zones sans mares ne présentent qu'un seul pic. En rouge sur les histogrammes, la limite par seuillage du paramètre de l'entropie de Shannon dual-pol pour classifier les pixels d'eau est fixée à -6 dB.

L'analyse de l'entropie de Shannon dual-pol de la mare 76417 au 14 mars (Figure 65) valide le choix de ce seuil et montre bien que la mare est détectée par le choix d'un seuil à -6 dB.



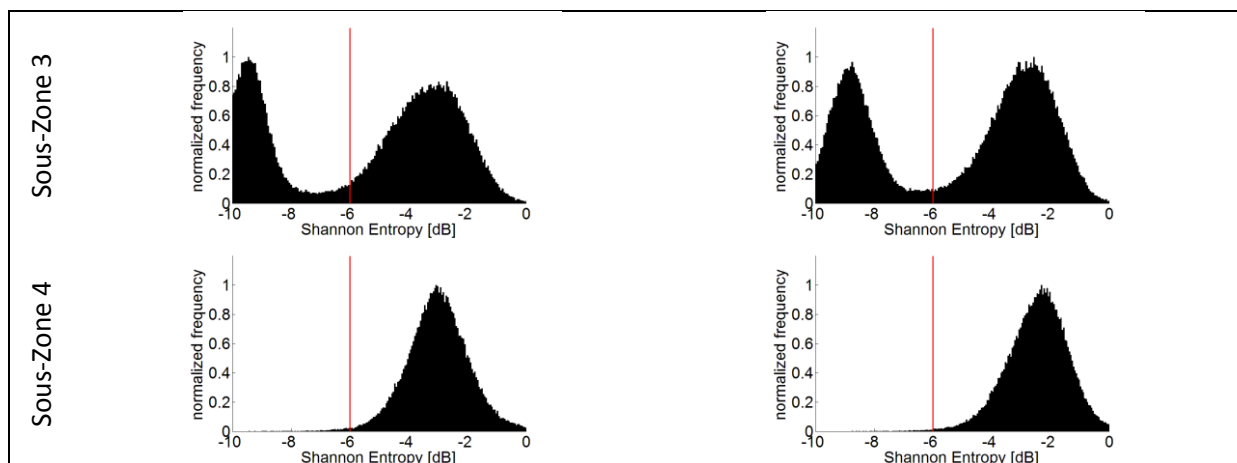


Figure 64 Histogrammes de l'entropie de Shannon en dual-pol sur les 4 sous-zones pour le 14 mars et le 3 décembre

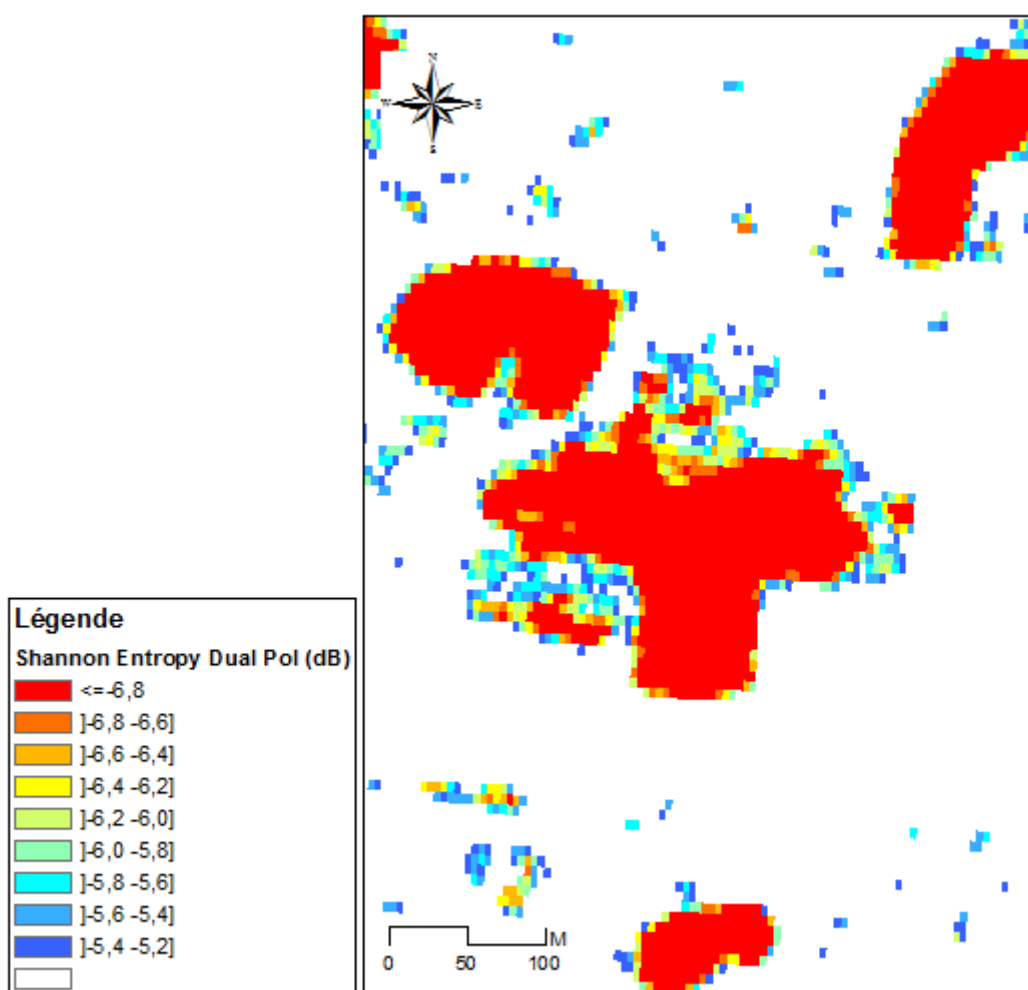


Figure 65 Entropie de Shannon de la mare 76417 sur l'image du 14 mars avec des données dual-pol

8.2 Polarisation Simple (Single pol)

L'utilisation d'un seul canal revient à utiliser simplement la puissance. Le canal sélectionné est le canal HH (polarisation horizontale). Comme précédemment, les histogrammes des zones avec et sans mares sont tracées (Figure 66) montrant une séparation un peu moins nette entre l'eau et les régions sans eau. Le seuil correspondant à la séparation eau / non-eau se situe à -19 dB et est indiqué par un trait rouge sur les histogrammes. La délimitation de la mare 7641 (Figure 67) est un peu moins stricte.

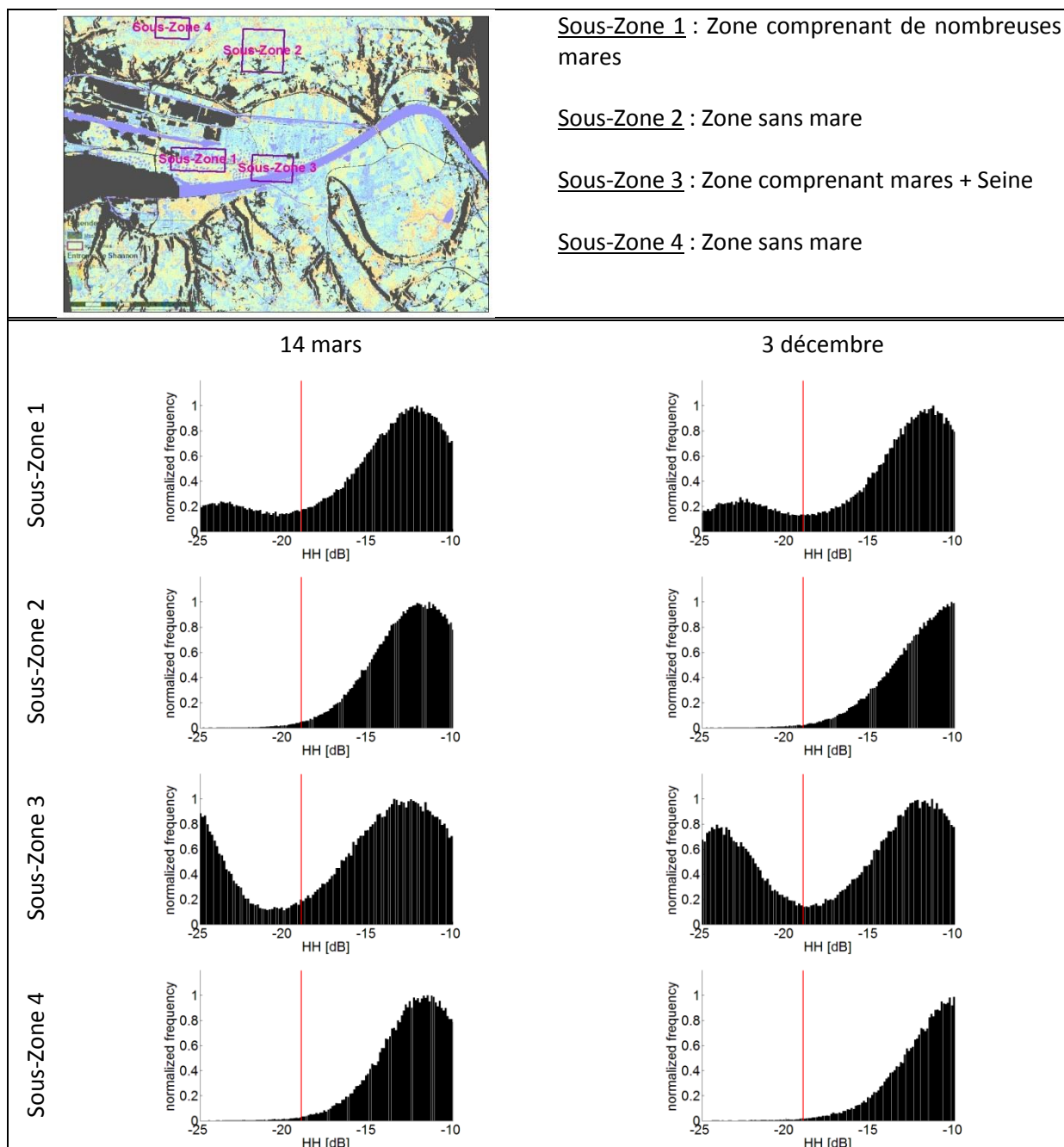


Figure 66 Histogrammes de la puissance en HH sur les 4 sous-zones pour le 14 mars et le 3 décembre

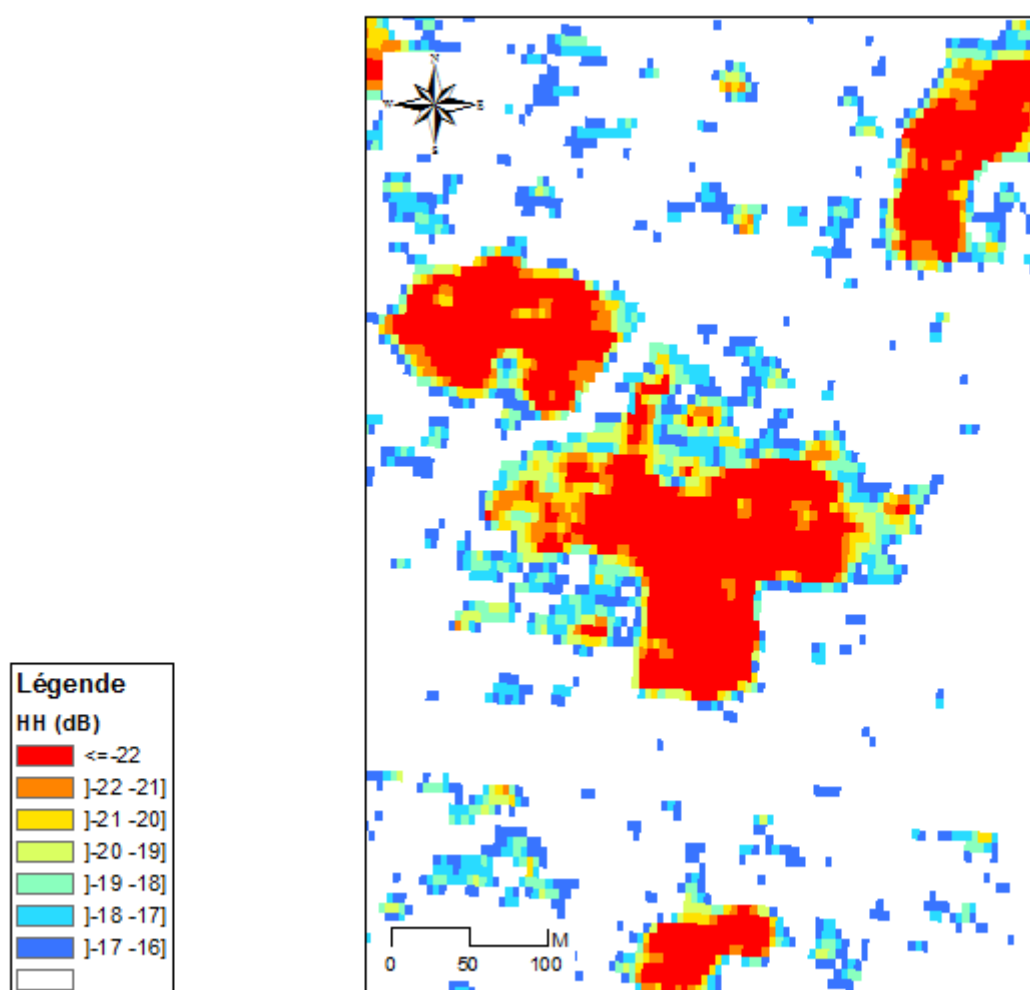


Figure 67 Puissance en HH (dB) de la mare 76417 sur l'image du 14 mars avec des données dual-pol

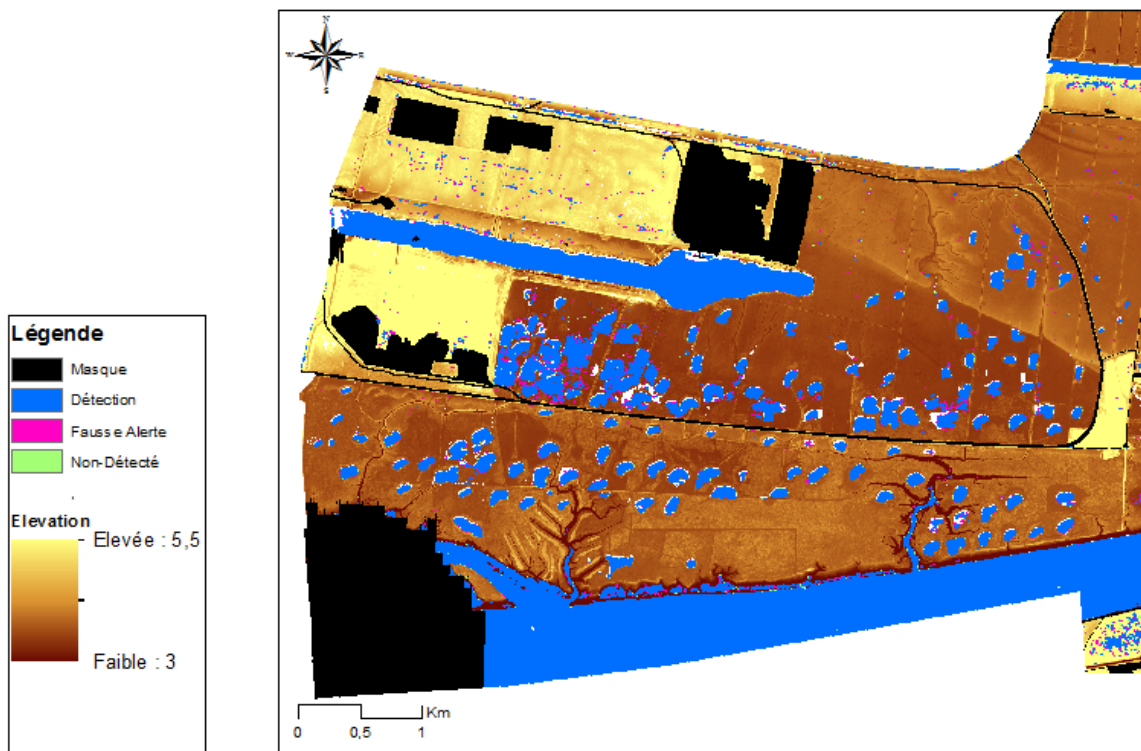
9 Résultats de la dégradation de l'information polarimétrique

Les résultats sont présentés pour les images de mars et de décembre par des cartes comparant les résultats obtenus avec la méthode initiale de segmentation utilisant quatre canaux de polarisation (Partie 4). La légende comporte 3 classes : en bleu détection avec les 2 méthodes (polarimétrique et dégradation), en rose classe fausse alerte (détecté avec dégradation de l'information et non-détecté avec l'information totale) et en vert non détecté (détecté avec l'information totale et non-détecté avec dégradation de l'information).

9.1 Par zone

9.1.1 Polarisation Double

Les résultats obtenus avec la dégradation de l'information polarimétrique sont très corrects pour les deux dates. Autour des mares, quelques pixels sont détectés comme de l'eau alors que ce n'était pas le cas pour la segmentation initiale.



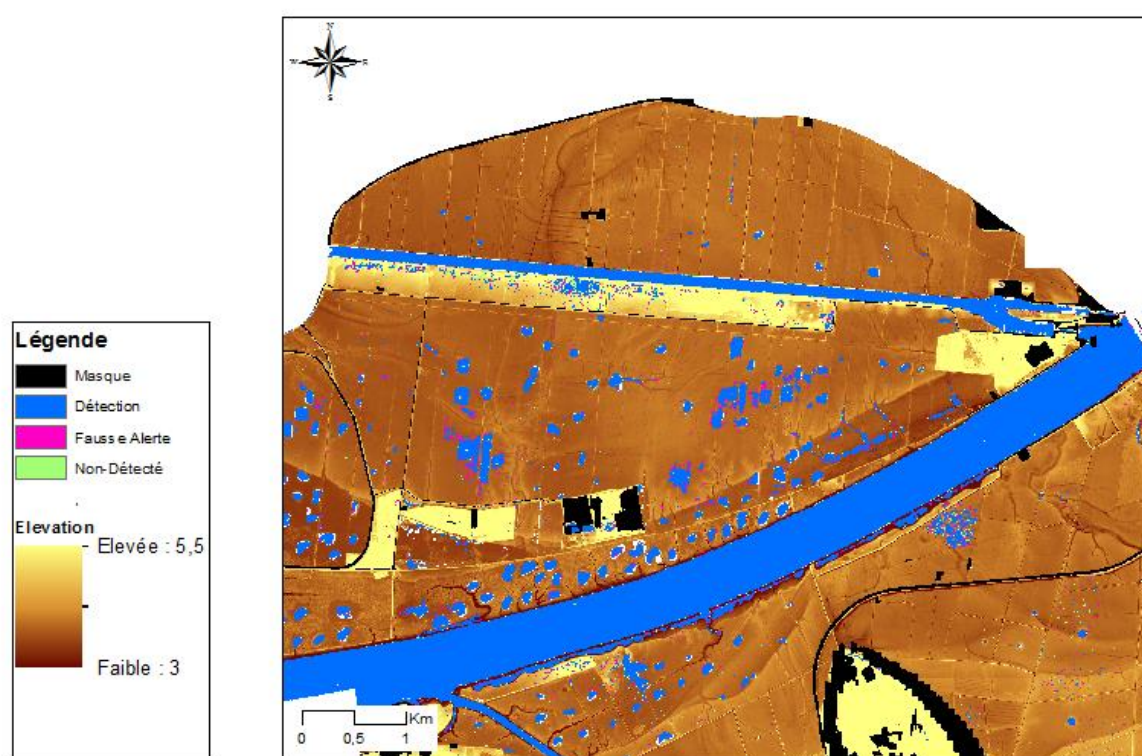
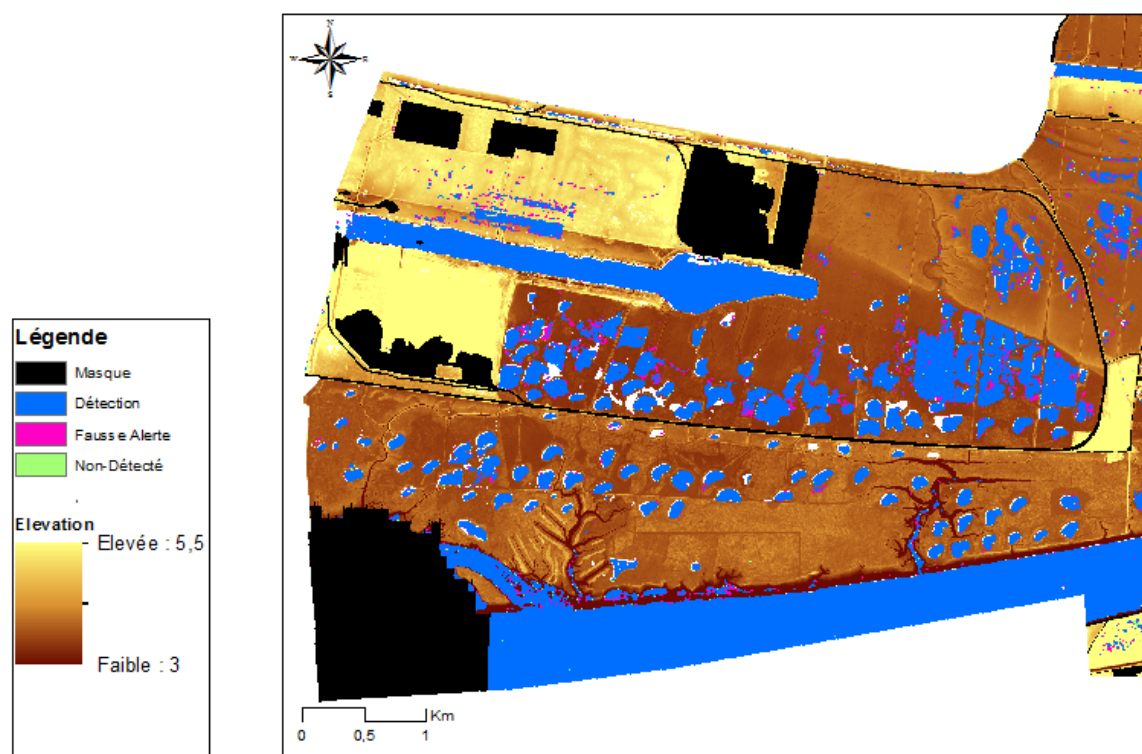


Figure 68 Segmentations avec polarisation double des 2 zones, image du 14 mars



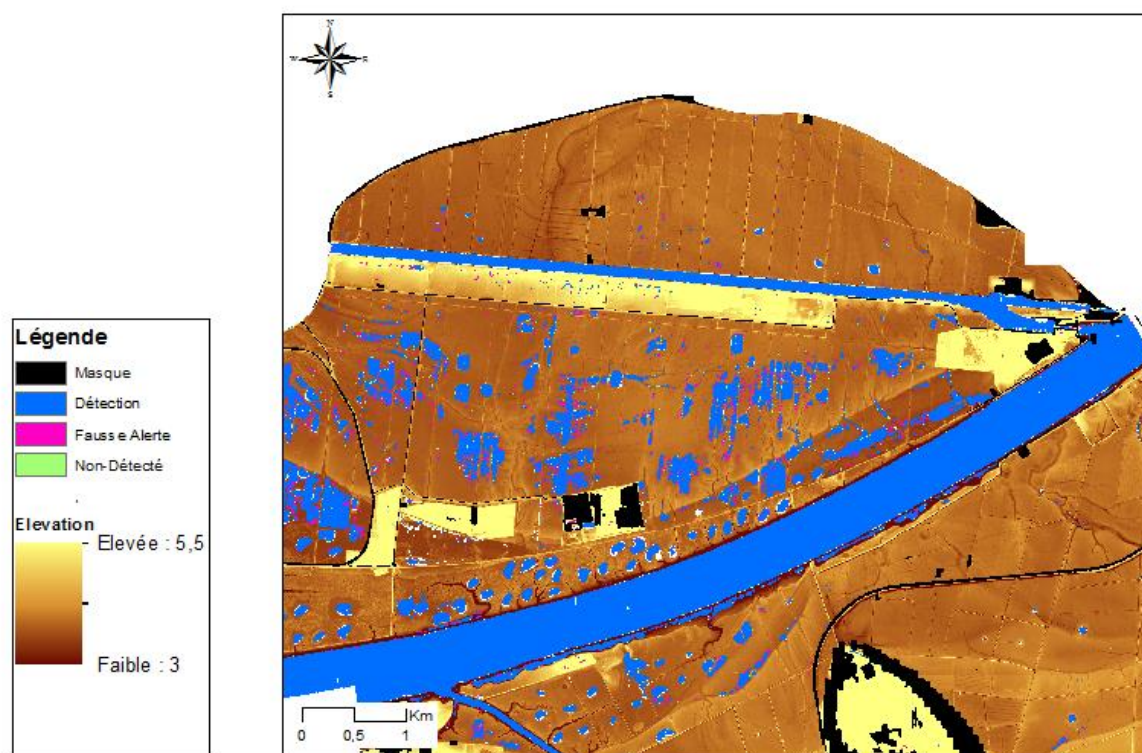


Figure 69 Segmentations avec polarisation double des 2 zones, image du 03 décembre

9.1.2 Polarisation Simple

Les résultats obtenus avec la polarisation simple sont corrects pour les deux dates mais le nombre de pixels « faux » est plus important. Comme pour la polarisation double, les contours des mares sont détectés comme de l'eau dans ma zone des prairies subhalophiles. De plus sur les prairies hodes, il ya de nombreuses zones non détectées sur l'image de décembre.

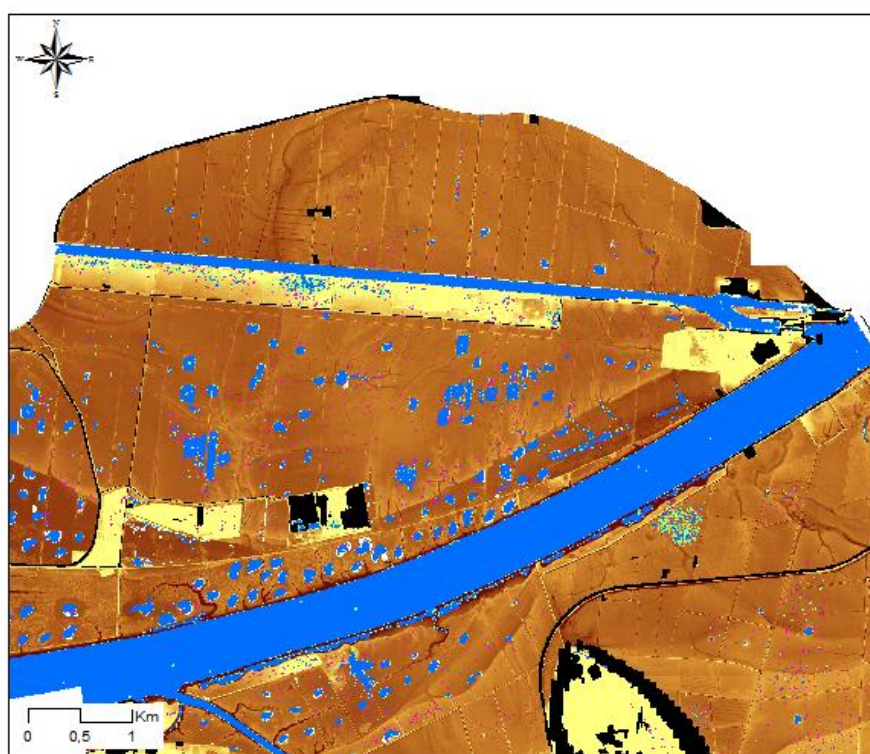
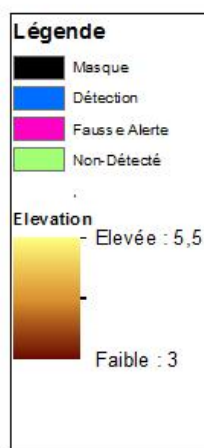
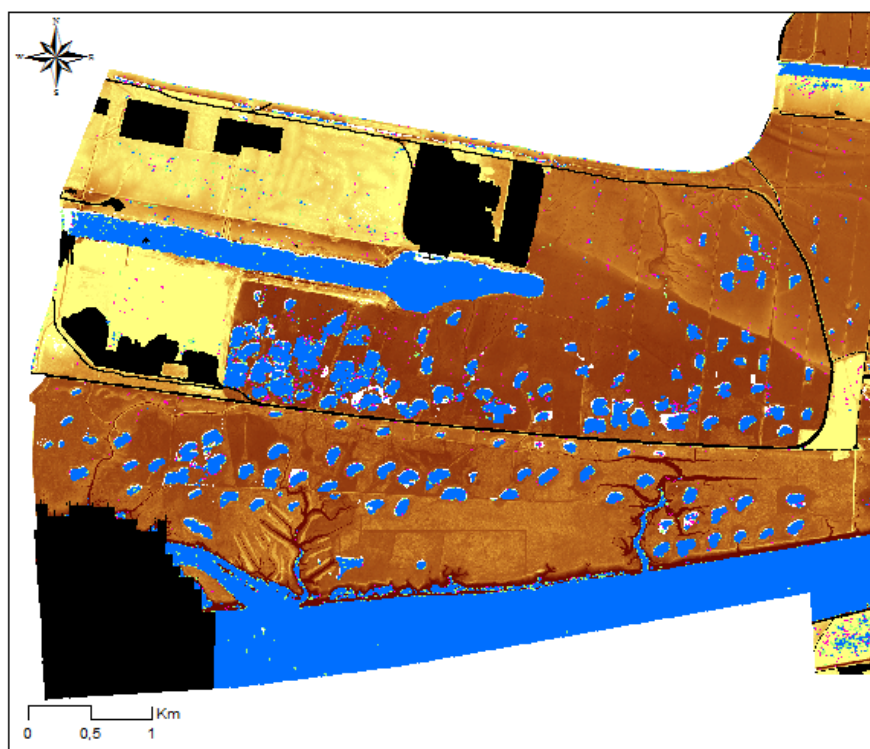
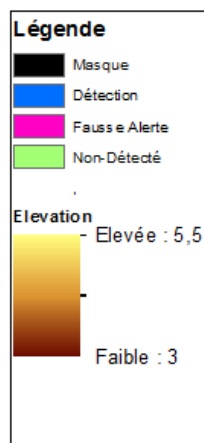


Figure 70 Segmentations avec polarisation simple des 2 zones, image du 14 mars

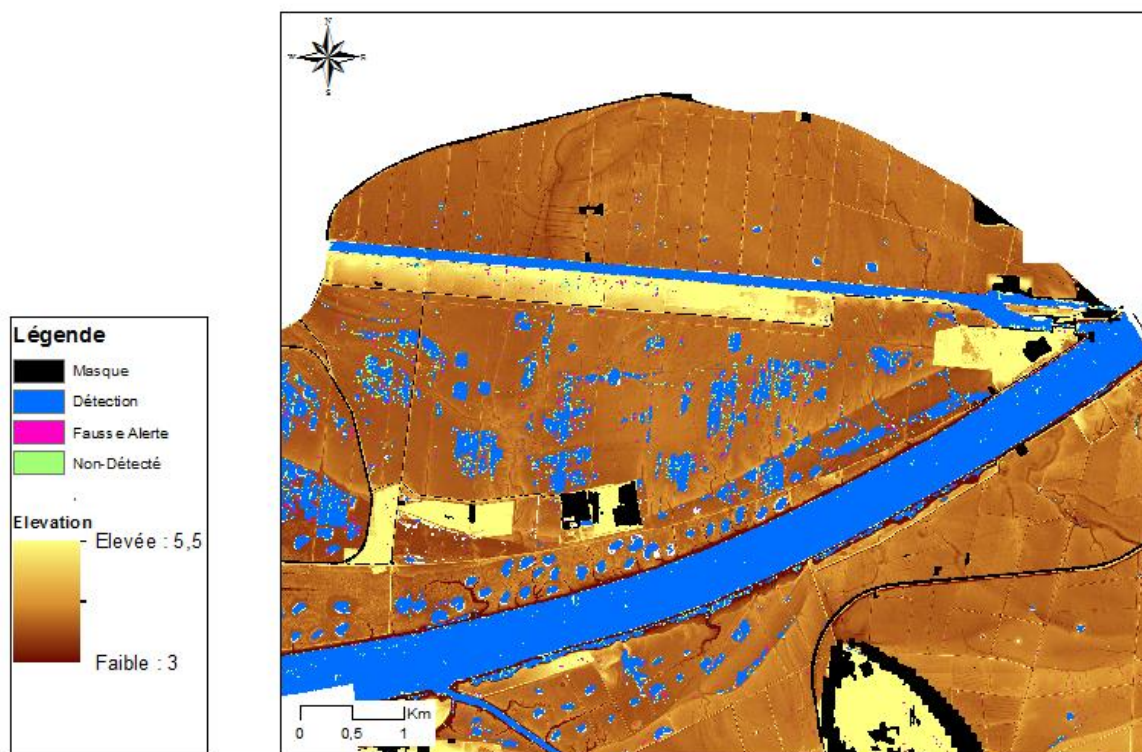
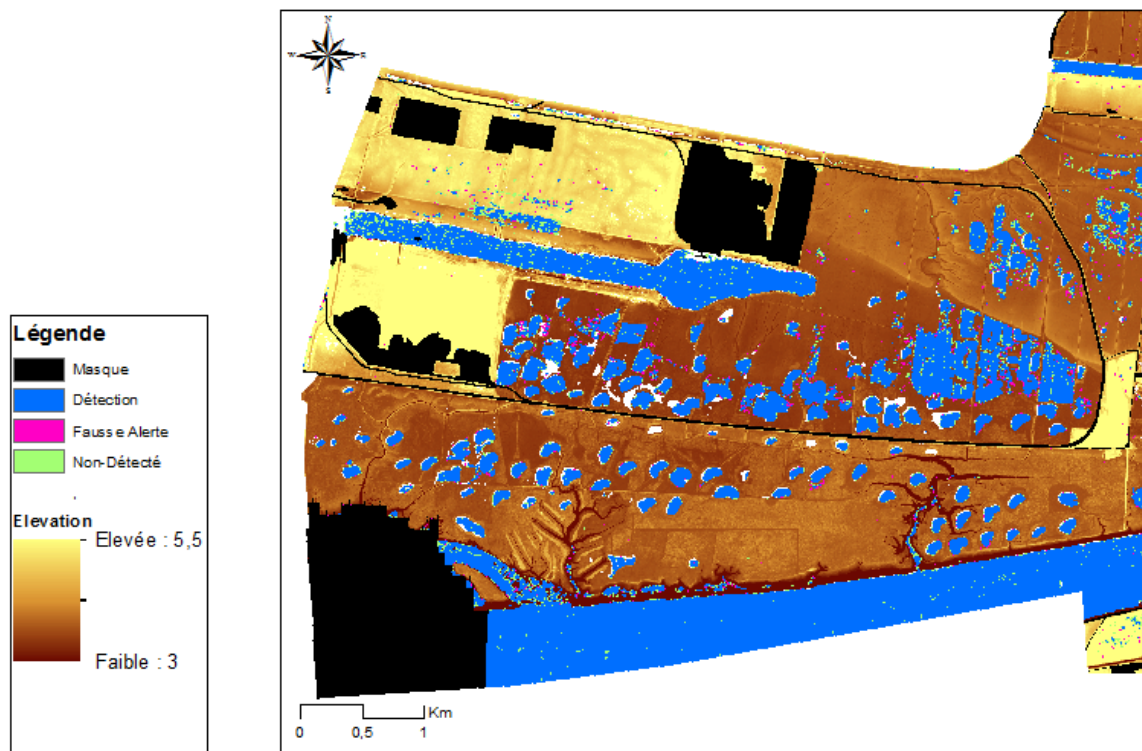
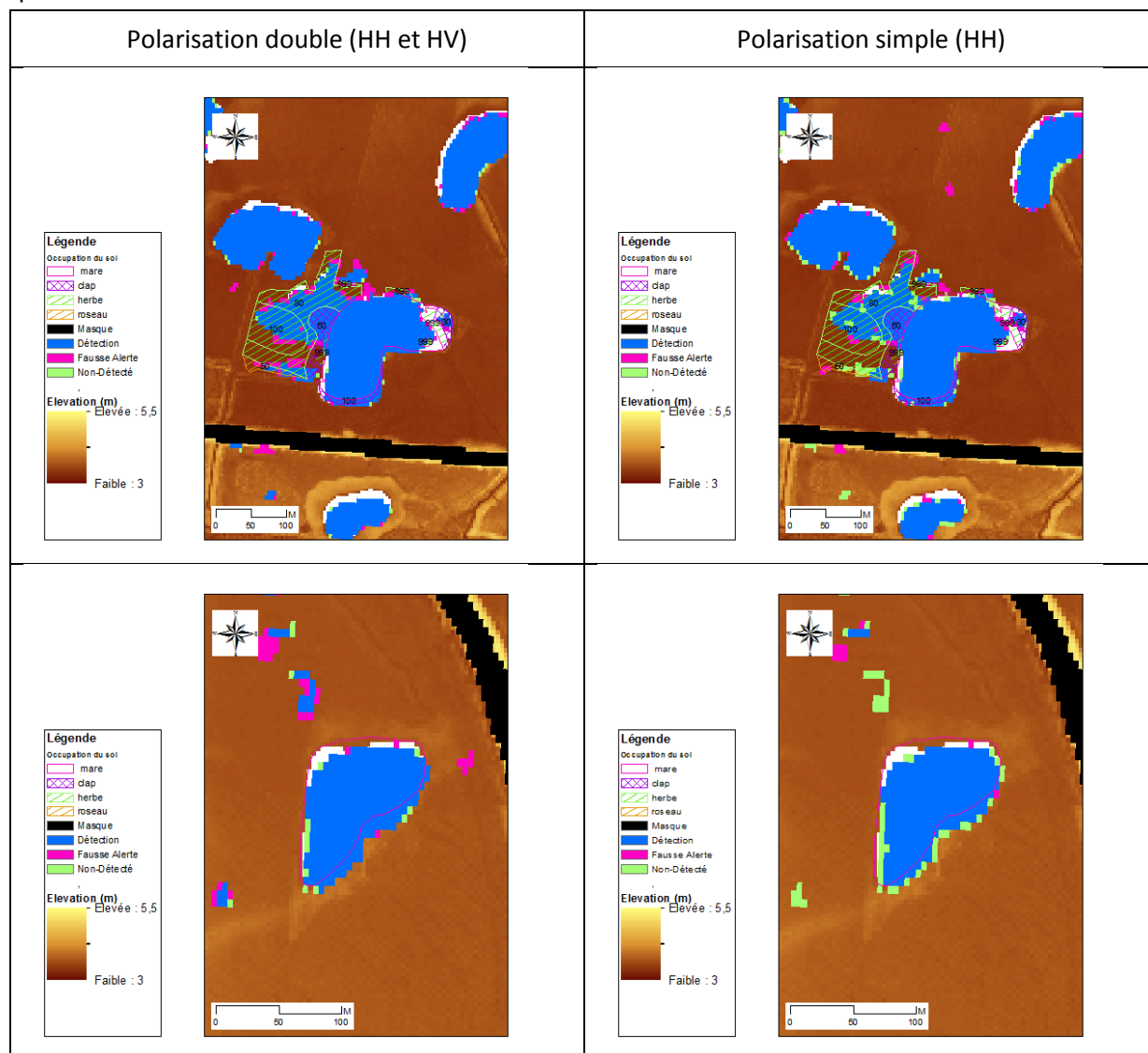


Figure 71 Segmentations avec polarisation simple des 2 zones, image du 03 décembre

9.2 Par site

La détection des mares est très correcte avec l'information polarimétrique dégradée. Pour la polarisation simple, quelques zones en eau ne sont pas détectées alors qu'il y a de la fausse alarme sur quelques endroits autour des mares. Sur certaines mares, certains pixels en eau ne sont même plus détectés.



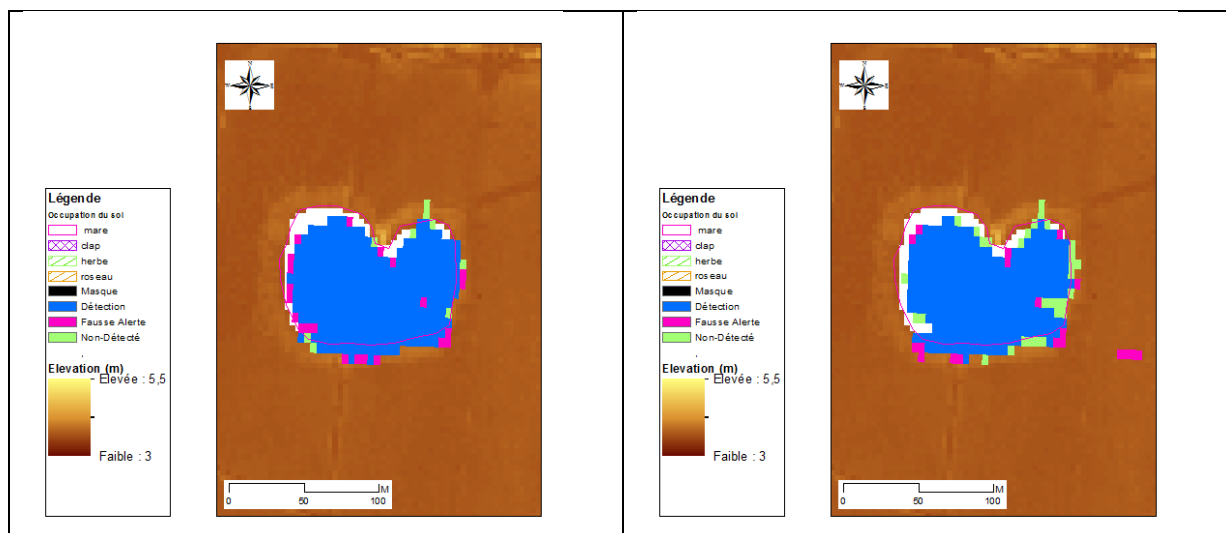
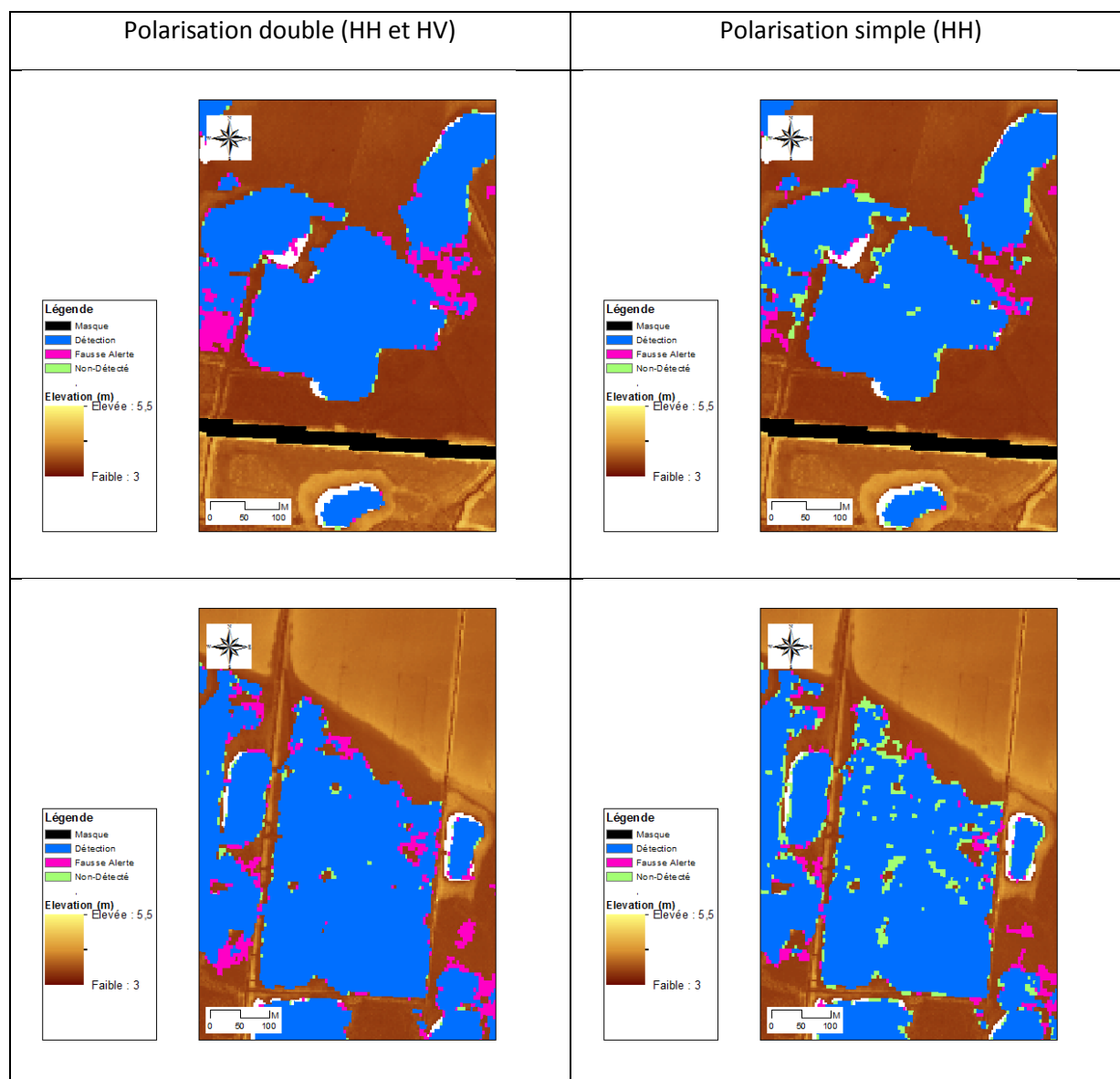


Figure 72 Segmentations des mares 76417, 76453 et 76462, image du 14 mars



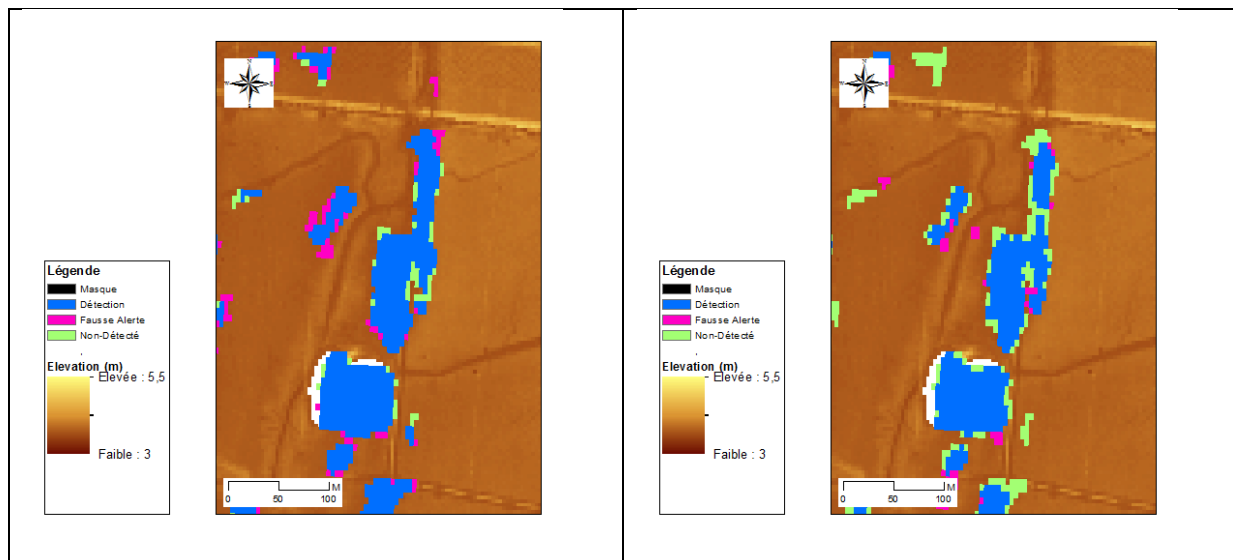


Figure 73 Segmentations de la mare 76417 et des prairies inondées, image du 03 décembre

La dégradation de l'information polarimétrique a mis en avant que l'utilisation de polarisation double est suffisante pour la détection simple des zones en eau tandis que l'utilisation d'un seul canal de polarisation entraîne un nombre d'erreur plus important. Cependant, il n'est pas possible de faire une étude des mécanismes de diffusion et de détecter les classes eau possible et eau probable.

10 Conclusion

Une série de 5 images polarimétriques RADARSAT-2 a été acquise de mars à décembre 2012 sur la réserve naturelle nationale de l'estuaire de la Seine. La méthode de segmentation de l'eau développée par l'IETR lors du projet Pleine-Fougères a été appliquée sur les images RADARSAT-2 acquises.

Dans un premier temps, la méthodologie a dû être adaptée à la nouvelle scène observée en utilisant l'entropie de Shannon non-normalisée. La méthode fonctionne parfaitement pour les différentes dates sur toutes les régions correspondant à de l'eau sans végétation et ayant une taille supérieure à la résolution du radar de 5m environ. Les cours d'eau et toutes les mares de chasse en eau sont détectés ainsi que quelques champs inondés. Sur l'image du 31 octobre, il a été possible de valider la détection d'eau quand la végétation recouvre au maximum 40% de la prairie. La méthode a aussi montré ses limitations avec une sous-estimation des régions en eau sur les prairies inondées et sur les mares recouvertes de végétation. Par contre, certains champs nus labourés, sont détectés comme de l'eau libre par cette méthode de segmentation (fausse alarme).

Afin de palier à ces problèmes, une nouvelle méthode de classification a été proposée. Elle permet de tenir compte de la présence de végétation plus ou moins haute et de champs nus labourés, elle ne peut s'appliquer que sur des données totalement polarimétriques contrairement à la segmentation initiale. Trois nouvelles classes d'eau ont été rajoutées : masque alpha (pour masquer les champs nus labourés), eau probable (très forte probabilité de présence d'eau) et eau possible (forte probabilité de présence d'eau). Les nouveaux résultats acquis avec ce nouvel arbre de décision présentent des zones en eau plus importantes. De nombreuses mares en eau mais recouvertes de plantes ou d'herbe sont détectées ainsi que les zones de baissières. Cette méthode a permis d'augmenter de manière significative la détection en eau des zones marécageuses avec l'imagerie radar.

Par contre, certaines limitations provenant essentiellement des caractéristiques du satellite radar restent. Lorsque la végétation est trop dense, il n'est plus possible de détecter l'eau sous couvert végétal avec une seule image polarimétrique car l'onde électromagnétique interagit très majoritairement avec la végétation. La seule solution serait d'utiliser soit des images interférométriques ou des fréquences plus basses. La seconde principale limitation est liée à la résolution du radar qui est de 5 m. Une solution serait d'utiliser le satellite TerraSAR-X pouvant atteindre des résolutions de 1,5 m à 2,5 m mais seule la première méthode pourrait être utilisée car les images ne sont disponibles qu'en simple ou double polarisation.