

Rossi N., Daniel C., Perrot T.

RST/IFREMER/DYNECO-AG/10-21/REBENT

Suivi de la couverture en macroalgues intertidales de substrats durs dans le cadre du projet REBENT/DCE au titre de l'année 2009

> Région Bretagne

Edition 2009



Coordination

Ifremer

Sommaire

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
2	MATERIEL ET METHODE	2
2.1	TRAITEMENTS SPOT	2
2.1.1	<i>Calcul du VCI sur l'image de Morlaix (Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé + Rivière de Morlaix) du 18 avril 2007</i>	<i>2</i>
2.1.2	<i>Calcul du VCI sur l'image Ouessant - Molène (Léon large + Les Abers côte et large + Iroise Camaret et large + Rade de Brest + Baie de Douarnenez) du 23 juin 2009</i>	<i>5</i>
2.1.3	<i>Différentiels d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2007 et 2009, et les images d'archive.....</i>	<i>8</i>
2.1.4	<i>Réalisation de vérités terrain sur trois scènes Spot récentes.....</i>	<i>8</i>
2.2	ANALYSE SPATIALE DES DIFFERENTIELS D'EVOLUTION DE LA COUVERTURE EN FUCALES SUR L'ENSEMBLE DU LITTORAL BRETON.....	8
2.2.1	<i>Isolement de l'estran par masses d'eau</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>Formatage des images traitées</i>	<i>10</i>
2.2.3	<i>Traitement</i>	<i>10</i>
2.3	DEVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE COMPLEMENTAIRE D'ETUDE DES FUCALES PAR ANALYSE DE CLICHES AERIENS HISTORIQUES.....	13
3	RESULTATS	13
3.1	TRAITEMENT DES IMAGES SPOT	13
3.1.1	<i>Calcul du VCI sur l'image de Morlaix (Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé + Rivière de Morlaix) du 18 avril 2007</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Calcul du VCI sur l'image Ouessant - Molène (Léon large + Les Abers côte et large + Iroise Camaret et large + Rade de Brest + Baie de Douarnenez) du 23 juin 2009</i>	<i>14</i>
3.2	VALIDATION DES VCI A PARTIR DE POINTS DE VERITE TERRAIN SUR DEUX SCENES SPOT RECENTES (MORLAIX, OUessant-MOLENE)	14
3.2.1	<i>Image « Morlaix » du 18 avril 2007</i>	<i>14</i>
3.2.2	<i>Image « Molène-Ouessant du 23 juin 2009.....</i>	<i>16</i>
3.2.3	<i>Différentiel d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2007 et de 2003 sur les masses d'eau DCE « Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé »</i>	<i>18</i>
3.2.4	<i>Différentiel d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2009 et de 2006 sur les masses d'eau DCE « Les Abers côte et large + Iroise large + Rade de Brest »</i>	<i>19</i>
3.3	ANALYSE DETAILLEE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DE LA COUVERTURE DE FUCALES PAR MASSES D'EAU DCE.....	19
3.3.1	<i>Masse d'eau Paimpol - Perros-Guirec (FRGC07)</i>	<i>21</i>
3.3.2	<i>Masse d'eau Perros-Guirec large (FRGC08).....</i>	<i>22</i>
3.3.3	<i>Masse d'eau Perros-Guirec – Morlaix large (FRGC09).....</i>	<i>22</i>
3.3.4	<i>Masse d'eau baie de Morlaix (FRGC11).....</i>	<i>22</i>
3.3.5	<i>Masse d'eau Léon-Trégor large (FRGC12)</i>	<i>23</i>
3.3.6	<i>Masse d'eau Les Abers large (FRGC13)</i>	<i>23</i>
3.3.7	<i>Iroise large (FRGC18)</i>	<i>23</i>
3.3.8	<i>Concarneau large (FRGC28).....</i>	<i>23</i>
3.3.9	<i>Masse d'eau Lorient-Groix (FRGC34).....</i>	<i>23</i>
3.3.10	<i>Masse d'eau Golfe du Morbihan large (FRGC38).....</i>	<i>23</i>
3.3.11	<i>Masse d'eau Baie de Vilaine côte (FRGC44).....</i>	<i>24</i>
3.3.12	<i>Masse d'eau Baie de Vilaine large (FRGC45)</i>	<i>24</i>
3.4	DISCUSSION	27
3.4.1	<i>Régression des fucales dans le monde</i>	<i>27</i>
3.4.2	<i>Causes de la régression : les hypothèses.....</i>	<i>28</i>
3.4.3	<i>Apport des résultats obtenus pour les côtes Bretonnes</i>	<i>30</i>
4	CONCLUSION	35

Annexes

ANNEXE 1	39
ANNEXE 2	44
ANNEXE 3	51
ANNEXE 4	55
ANNEXE 5	59
ANNEXE 6	64

Table des illustrations

Tableaux

TABEAU 1 : HAUTEURS D'EAU EN DIFFERENTS POINTS DE L'IMAGE SPOT DU 18 AVRIL 2007 A 11 H 31 MIN TU (MAREE DE COEFFICIENT 112)	3
TABEAU 2 : COEFFICIENTS DE LA DROITE DES ROCHES : $XS3 = A.XS2 + B$, AVEC (XS2, XS3) LES VALEURS DES COMPTES NUMERIQUES DES PIXELS MINERAUX DANS LE CANAL ROUGE ET PROCHE INFRAROUGE, A LA PENTE, B L'ORDONNEE A L'ORIGINE ET R^2 LE COEFFICIENT DE CORRELATION	4
TABEAU 3 : VALEURS EN COMPTES NUMERIQUES DU PIXEL <i>ALGUE PURE</i> DANS LE CANAL ROUGE ET PROCHE INFRAROUGE	4
TABEAU 4 : HAUTEURS D'EAU EN DIFFERENTS POINTS DE L'IMAGE SPOT DU 23 JUIN 2009 A 11 H 01 MIN TU (MAREE DE COEFFICIENT 92)	6
TABEAU 5: COEFFICIENTS DE LA DROITE DES ROCHES : $XS3 = A.XS2 + B$, AVEC (XS2, XS3) LES VALEURS DES COMPTES NUMERIQUES DES PIXELS MINERAUX DANS LE CANAL ROUGE ET PROCHE INFRAROUGE, A LA PENTE, B L'ORDONNEE A L'ORIGINE ET R^2 LE COEFFICIENT DE CORRELATION	7
TABEAU 6 : VALEURS EN COMPTES NUMERIQUES DU PIXEL <i>ALGUE PURE</i> DANS LE CANAL ROUGE ET PROCHE INFRAROUGE	7

Figures

FIGURE 1 : IMAGE SPOT 5 DU 18 AVRIL 2007 SUR FINISTERE NORD	2
FIGURE 2 : CALCUL DE L'EQUATION DE LA <i>DROITE DES ROCHES</i> . GRAPHIQUE DE REPARTITION DES POINTS DE REFERENCE SELECTIONNES PAR PHOTO-INTERPRETATION SUR L'IMAGE SPOT DU 18 AVRIL 2007. EN ABSCISSE, LE CANAL ROUGE XS2, EN ORDONNEE LE CANAL PROCHE INFRAROUGE XS3. LES COULEURS DES POINTS REPRESENTENT UN TYPE DE SUBSTRAT (<i>EAU</i> EN BLEU, <i>ROCHE</i> EN NOIR, <i>VASE</i> EN GRIS, <i>SABLE</i> EN JAUNE ET <i>ALGUES</i> EN VERT)	3
FIGURE 3 : IMAGE SPOT 5 DU 23 JUIN 2009 SUR OUESSANT-MOLENE	5
FIGURE 4 : CALCUL DE L'EQUATION DE LA <i>DROITE DES ROCHES</i> . GRAPHIQUE DE REPARTITION DES POINTS DE REFERENCE SELECTIONNES PAR PHOTO-INTERPRETATION SUR L'IMAGE SPOT DU 23 JUIN 2009. EN ABSCISSE, LE CANAL ROUGE XS2, EN ORDONNEE LE CANAL PROCHE INFRAROUGE XS3. LES COULEURS DES POINTS REPRESENTENT UN TYPE DE SUBSTRAT (<i>EAU</i> EN BLEU, <i>ROCHE</i> EN NOIR, <i>VASE</i> EN GRIS, <i>SABLE</i> EN JAUNE ET <i>ALGUES</i> EN VERT)	6
FIGURE 5 : CROISSEMENT DU DECOUPAGE DES MASSES D'EAU (A) AVEC LA COUCHE BATHYSHL2 (B) AFIN D'ISOLER L'ESTRAN POTENTIELLEMENT COLONISABLE PAR LES FUCALES PAR MASSES D'EAU (C)	9
FIGURE 6 : ILLUSTRATION DE L'ETAPE DE TRAITEMENT PERMETTANT D'EXTRAIRE LA PARTIE DE L'ESTRAN POTENTIELLEMENT COLONISEE PAR LES FUCALES. UNE MASSE D'EAU FICTIVE (VUE AERIEENNE) A ETE REPRESENTEE (A). CHAQUE TRAIT DE COULEUR REPRESENT LE NIVEAU DE BAS DE L'EAU VARIABLE SELON LES ANNEES DE PRISE DE VUE DE L'IMAGE SPOT. IL APPARAÎT ALORS QUE LA SURFACE D'ESTRAN COLONISABLE N'EST PAS LA MEME SELON LE DIFFERENTIEL CONSIDERE	11
FIGURE 7 : EXEMPLE DE CALCULS EFFECTUEES POUR LA MASSE D'EAU PAIMPOL-PERROS-GUIREC POUR LES COUPLES DE CLICHES 1998/2004, 2004/2007, 1989/2004, 1989/1998, 1998/2007, 1989/2007. DANS LE TABLEAU SONT MENTIONNES LA SURFACE DE LA REGION D'INTERET EN HECTARES (SURF_ROI_HA), LA	

SURFACE D'ALGUES (SURF_ALGUE), LE POURCENTAGE DE RECOUVREMENT DU ROI PAR LES ALGUES (% ROI_REC), LA SURFACE D'ALGUES EN EQUIVALENT 100 % (EQ100) ET LA SURFACE ALGALE EN EQUICENT NORMALISEE (EQ100 NORM % ROI_REC). LE GRAPHIQUE (A) MET EN EVIDENCE LES SURFACES ALGALES AVANT LA NORMALISATION DONT LA DISPERSION POUR UNE MEME DATE EST SEULEMENT DEPENDANTE DU NIVEAU DE L'EAU DE L'IMAGE SPOT. LE GRAPHIQUE (B) MET EN EVIDENCE LES SURFACES ALGALES APRES NORMALISATION QUI PERMET D'OBTENIR UNE HOMOGENEISATION DE LA VALEUR A UNE MEME DATE DONNEE.	12
FIGURE 8 : CORRELATION ENTRE LES TAUX DE COUVERTURE RELEVES SUR LE TERRAIN ET LE VCI CALCULE SUR L'IMAGE SPOT DU 18 AVRIL 2007	15
FIGURE 9 : CORRELATION FINALE ENTRE LES TAUX DE COUVERTURE RELEVES SUR LE TERRAIN ET LE VCI CALCULE SUR L'IMAGE SPOT DU 18 AVRIL 2007 APRES RETOUCHE DES WAYPOINTS TERRAIN. DEPLACEMENT (AU MAXIMUM 1 PIXEL) OU ELIMINATION DES PIXELS DES ZONES TROP HETEROGENES OU AYANT UN TAUX DE COUVERTURE TROP VARIABLE DU A LA PRESENCE D'ALGUES VERTES, D'EPIPHYTES, OU D'ECHOUGHES D'ALGUES ARRACHEES	16
FIGURE 10 : CORRELATION ENTRE LES TAUX DE COUVERTURE TERRAIN ET LE VCI CALCULE SUR L'IMAGE SPOT DE MOLENE-OUESSANT DE 23 JUIN 2009	17
FIGURE 11 : CORRELATION FINALE ENTRE LES TAUX DE COUVERTURE RELEVES SUR LE TERRAIN ET LE VCI CALCULE SUR L'IMAGE SPOT DU 23 JUIN 2009 APRES RETOUCHE DES WAYPOINTS TERRAIN. DEPLACEMENT (AU MAXIMUM 5M) OU ELIMINATION DES PIXELS DES ZONES TROP HETEROGENES OU AYANT UN TAUX DE COUVERTURE TROP VARIABLE DU A LA PRESENCE D'ALGUES VERTES, D'EPIPHYTES, OU D'ECHOUGHES D'ALGUES ARRACHEES.	18
FIGURE 12 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA CEINTURE DE FUCALES PAR MASSES D'EAU POUR LA PARTIE NORD DE LA BRETAGNE. POUR UNE MEILLEURE LECTURE DES RESULTATS, LES MASSES D'EAU ONT ETE REGROUPEES PAR ORDRE DECROISSANT DE SURFACE ALGALE, LES PLUS IMPORTANTES SURFACES ALGALES ETANT REPRESENTES EN A, LES SURFACES MOYENNES EN B ET LES FAIBLES SURFACE EN C	20
FIGURE 13 : EVOLUTION TEMPORELLE DE LA CEINTURE DE FUCALES PAR MASSES D'EAU POUR LA PARTIE SUD DE LA BRETAGNE (POUR FRGC44, FRGC46, FRGT26 ET FRGT27, LES VALEURS REPORTEES AU 04/05/07 SONT CELLES DU 20/04/07)	21
FIGURE 14 : DIFFERENTIEL D'EVOLUTION DE LA COUVERTURE EN FUCALES SUR LE SECTEUR PLEUBIAN-BREHAT ENTRE 1989 ET 1998	22
FIGURE 15 : DIFFERENTIEL D'EVOLUTION DE LA COUVERTURE EN FUCALES SUR LE SECTEUR ALLANT DE SARZEAU A PENESTIN ENTRE 1986 ET 2004	24
FIGURE 17 : REPRESENTATION DE LA SUCCESSION DES COMMUNAUTES COLONISANT TOUR A TOUR LES SUBSTRATS ROCHEUX MODEREMENT EXPOSES (SCHEMA MODIFIE D'APRES HILL ET AL., 1998)	27
FIGURE 18 : EVOLUTION DE L'INDICE HIVERNAL DE L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE ENTRE 1950 ET 2009. LES DONNEES SONT ISSUES DE THE CLIMATE ANALYSIS SECTION, NCAR, BOULDER, USA, HURRELL (1995) ..	33
FIGURE 19 : SCHEMA RECAPITULATIF DES DIFFERENTES PARAMETRES AGISSANT SUR LA SUCCESSION DES COMMUNAUTES DES ESTRANS ROCHEUX EN PASSANT DE L'ECHELLE GLOBALE (CUBE ROSE), A L'ECHELLE LOCALE (CUBE ORANGE) PUIS A L'ECHELLE INDIVIDUELLE (CUBE BLEU)	34

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

La couverture totale en fucales (*Fucus* + *Ascophyllum*) a été retenue dans le cadre de REBENT comme indicateur de l'état de santé des grandes algues à une échelle zonale du linéaire côtier breton. Ces algues typiques des zones rocheuses constituent un compartiment potentiellement réactif aux évolutions de qualité des eaux côtières et peut être de ce fait utilisé comme indicateur d'évolution.

La cartographie de la couverture en fucales par l'exploitation systématique de clichés Spot a permis, depuis le lancement du programme Rebent, de couvrir la quasi-totalité de la zone d'estran du littoral Breton précisément du Croisic à Paimpol-Bréhat. La contrainte marégraphique impose ensuite l'utilisation de capteurs hyperspectraux pour couvrir le reste de la zone localisée à l'est de la baie de St Brieuc (sectoriel de la Rance-Fresnaye). La production de différentiels d'évolution de la couverture en fucales par comparaison avec des images SPOT d'archives a montré des résultats intéressants s'agissant notamment de la régression historique nette de la couverture en fucales sur la zone intertidale s'étendant de Quiberon au Croisic de même que sur celle du Trégor.

Le Ceva a proposé au titre de l'année 2009 de poursuivre cette action de suivi cartographique au moyen d'images SPOT et de réaliser un bilan commenté d'évolution des ceintures par secteur côtier depuis les premières acquisitions de 1986 (seuls des différentiels de parties communes d'images acquises à différentes périodes ont été réalisés par grands secteurs) :

- Exploitation de deux nouveaux clichés satellitaires (Finistère nord et Ouessant-Molène) pour un suivi quantitatif de l'extension et du pourcentage de recouvrement de la ceinture algale intertidale dominée par les fucales, avec production des différentiels d'évolution en fonction des images d'archives.
- Campagnes de vérités terrains allégées permettant de valider les pourcentages de recouvrement des Fucales estimés sur les deux images SPOT.
- Bilan cartographique et quantitatif, par secteurs côtiers de référence (limites de MEC) de la couverture algale et des différentiels d'évolution au moyen des images SPOT traitées.
- Analyse approfondie des différentiels d'évolution de la couverture sur l'ensemble du littoral breton en recherchant les hypothèses générales et/ou locales sur les causes possibles de régression des ceintures. Production d'un rapport de synthèse intégrant l'ensemble des données et résultats explicatifs acquis dans les pays à habitat fucales développé. Production d'une note publiable.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 Traitements Spot

La chaîne de traitement employée dans cette étude est celle décrite en 2006 dans le cadre du **rapport Rebent 2006** (Mouquet et al., 2006). Elle est basée sur la chaîne de traitement classique (décrite dans la fiche technique FT 08-2003-01 disponible sur le site Internet du Rebent <http://www.rebent.org/>), mais modifiée pour être **directement appliquée à l'image Spot brute en comptes numériques (CN), et non à une image passée en réflectance**. Cette procédure de traitement, n'affectant pas les valeurs du VCI ni leur précision, permet de s'affranchir des campagnes de radiométrie et permet ainsi un gain de temps considérable (acquisitions de points de terrain réduite, étapes de traitement allégées). En outre, en maximisant le nombre de points de référence pris sur l'image, cette méthode permet d'améliorer de manière significative les paramètres de calcul du VCI (*droite des roches et pixel algue pure*).

2.1.1 Calcul du VCI sur l'image de Morlaix (Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé + Rivière de Morlaix) du 18 avril 2007

Description de l'image

L'image Spot de la zone, qui s'étend de l'Aber Wrac'h à la baie de Lannion, en passant par Brignogan et la baie de Morlaix, a été acquise en mode programmation le 18 avril 2007 à 11:31:40 TU, à une résolution de 10m. La Figure 1 ci-dessous détaille l'emprise de l'image.



Figure 1 : Image Spot 5 du 18 avril 2007 sur Finistère nord

Le niveau moyen des hauteurs d'eau au moment de l'acquisition de l'image est d'environ **0,64 m** (Coefficient de marée de **112**). Cette valeur est nettement inférieure à la hauteur de la limite basse de la ceinture fucales mesurée au GPS différentiel (1,57 m) au niveau de Roscoff (1,81 m), de Brignogan (1,3 m) et de l'Aber Wrac'h (1,6 m). Il y a donc un risque de prendre en compte d'autres algues que des fucales dans le calcul du VCI (laminaires, algues rouges) si un masquage supplémentaire n'est pas appliqué. C'est le masque fucales d'altimétrie +2m par rapport au zéro Shom réalisé à partir de survol en 2004 qui a été utilisé. Le Tableau 1 ci-dessous fournit les hauteurs d'eau en différentes localisations de l'image.

Tableau 1 : Hauteurs d'eau en différents points de l'image Spot du 18 avril 2007 à 11 h 31 min TU (marée de coefficient 112)

Id	Localisation	Hauteur d'eau (m)	Heure de basse mer (TU)
1	Locquirec	0,72	12:02
2	Anse de Primel	0,85	12:01
3	Château du taureau	0,63	11:56
4	Roscoff	0,65	11:56
5	Brignogan	0,50	11:37
6	Aber Wrac'h	0,47	11:37

Pour ce traitement, 8103 pixels « minéraux » ont été récoltés sur la scène : 2263 points *sable*, 1594 points *roche*, 2586 points *vase* et 1660 points *eau*. Pour calculer le pixel *Algue pure*, les valeurs de 155 pixels ont été utilisées (Figure 2). Dans cette méthode, le calcul du VCI est réalisé directement à partir de l'image brute en CN, sans application des gains de calibration absolus Spot pour le passage en luminance, ni passage en réflectance à partir de données terrain.

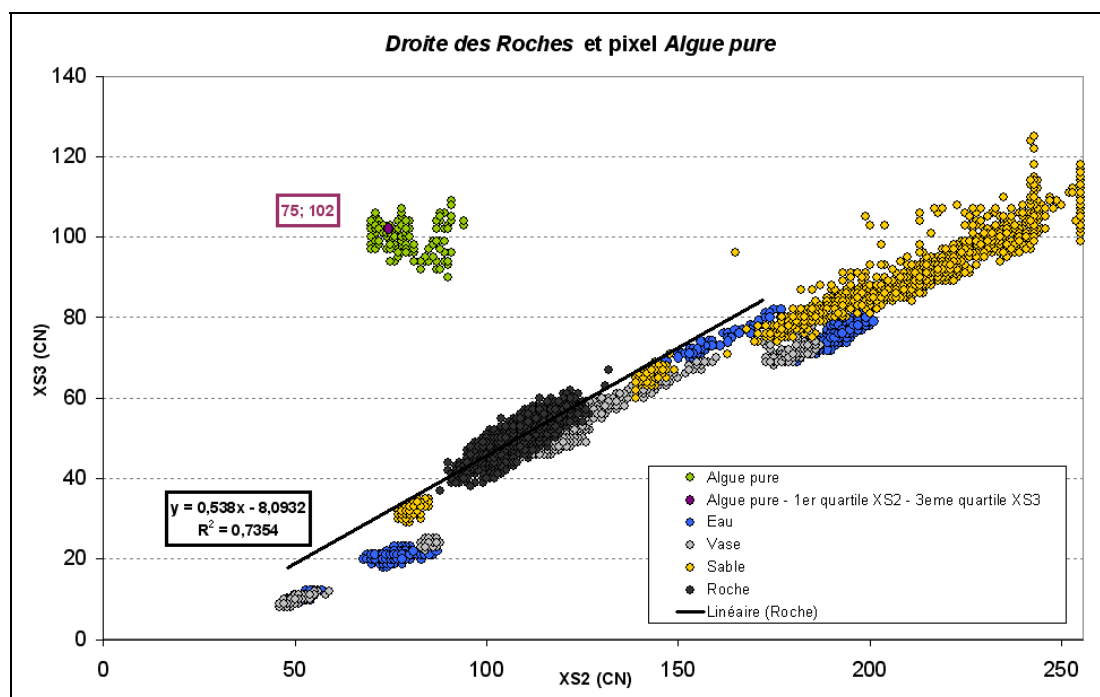


Figure 2 : Calcul de l'équation de la droite des roches. Graphique de répartition des points de référence sélectionnés par photo-interprétation sur l'image Spot du 18 avril 2007. En abscisse, le canal rouge XS2, en ordonnée le canal proche infrarouge XS3. Les couleurs des points représentent un type de substrat (*eau* en bleu, *roche* en noir, *vase* en gris, *sable* en jaune et *algues* en vert)

Détail des paramètres utilisés pour le calcul du VCI :

- *Pixel algue pure*. Pour le calcul du VCI, un pixel représentatif d'une couverture en fucales à 100 % doit être déterminé. Ce pixel sert de référence pour le calcul. Il a été décidé de prendre le pixel algue pure au premier quartile sur le canal XS2 et troisième quartile sur le canal XS3 de l'ensemble des pixels algues purs repérés sur l'image (point violet Figure 2 ci-dessus). Les valeurs retenues pour le pixel algue pure sont : **XS2_{AP} = 75** et **XS3_{AP} = 102** (en CN).
- *Droite des roches*. L'équation de la droite des roches est calculée à partir de la réflectance dans les canaux rouges et proche infrarouge de points minéraux pris en CN sur l'image (Figure 2 ci-dessus). Pour les points sableux les plus réfléchants, une légère saturation des valeurs dans le canal XS2 (rouge) est observée. Ces points ne doivent pas être pris en compte dans les calculs. En raison de la particularité des pixels *roche* de cette image, qui ne se trouvent pas alignés avec la droite minérale formée par les points *sable*, *vase* et *eau*, l'équation de la *droite des roches* a été établie en ne prenant en compte que les pixels rocheux. La *droite des roches* ainsi définie est parallèle à la première, mais au dessus : la quasi-totalité des points *sable*, *vase* et *eau* auront un VCI négatif. On évite ainsi une fausse surévaluation du VCI sur les roches nues et dans les faibles taux de couvertures en fucales, due probablement à la présence de moulières et de balanes (responsables d'une augmentation de la réflectance des roches nues dans le proche infrarouge et donc du décalage vers le haut des points rocheux qui se rapprochent ainsi d'une réponse végétale. Les coefficients de la droite des roches retenus sont : **a = 0,5380** et **b = -8,0932**.
- *Seuil sur le canal XS4*. La réflectance de l'eau dans le moyen infrarouge étant très faible, le seuillage dans ce canal permet de masquer l'image et ainsi de séparer la classe *eau* des autres substrats. La valeur retenue est **XS4_s = 35**. Les pixels en dessous de cette valeur seuil sont arbitrairement classés en *eau* (code 150).
- *Seuil sur XS2*. En raison de la saturation dans le canal XS2 (cf. Figure 2), un seuil a été appliqué sur ce canal de manière à ne pas prendre en compte pour le calcul du VCI des pixels minéraux trop réfléchants (majoritairement des pixels de sable) artificiellement positionnés au dessus de la droite des roches. La valeur retenue est **XS2_s = 180**, au dessus le VCI est arbitrairement ramené à 0 (minéral pur).

Les paramètres pour le calcul du VCI sont synthétisés dans les Tableaux 2 et 3 suivants.

Tableau 2 : Coefficients de la droite des roches : $XS3 = a.XS2 + b$, avec (XS2, XS3) les valeurs des comptes numériques des pixels minéraux dans le canal rouge et proche infrarouge, *a* la pente, *b* l'ordonnée à l'origine et *R*² le coefficient de corrélation

	a	b	R ²
Droite des Roches	0,538	-8,0932	0,7354

Tableau 3 : Valeurs en comptes numériques du pixel *Algue pure* dans le canal rouge et proche infrarouge

	XS2	XS3
Pixel <i>Algue pure</i>	75	102

Les traitements informatiques ayant trait aux images satellites SPOT ont été effectués à partir du logiciel de traitement d'images ENVI 4.5. La mise en forme de l'ensemble des cartes finales produites dans le présent rapport a été réalisée sous le logiciel SIG Arcgis 9.2.

2.1.2 Calcul du VCI sur l'image Ouessant - Molène (Léon large + Les Abers côte et large + Iroise Camaret et large + Rade de Brest + Baie de Douarnenez) du 23 juin 2009

Description de l'image

L'image Spot de la zone, qui s'étend de Telgruc-sur-Mer à Plouescat, englobant les îles d'Ouessant, Molène, Quéménès, Béniguet ainsi que la Rade de Brest, a été acquise en mode programmation le 23 juin 2009 à 11:01:33 TU, à une résolution de 10 m. La Figure 3 ci-dessous détaille l'emprise de l'image.



Figure 3 : Image Spot 5 du 23 juin 2009 sur Ouessant-Molène

Le niveau moyen des hauteurs d'eau au moment de l'acquisition de l'image est d'environ **1,39 m** (Coefficient de marée de **92**). Le Tableau 4 ci-dessous fournit les hauteurs d'eau en différents points de l'image. Cette valeur est légèrement inférieure à la moyenne des valeurs de la limite basse de la ceinture des fucales (1,57 m) mesurée sur six sites au DGPS : Santec (1,81 m), Brignogan (1,3 m), Ile Vierge (1,6 m), Presqu'île Sainte Marguerite (1,88 m), Portsall (1,6 m), et Aber Ildut (1,23 m). De la même façon que pour la scène acquise en 2007 sur la zone de Guisseny à Locquirec, le traitement de l'image du 23 juin 2009 nécessite

l'application d'un masque afin de ne retenir dans le calcul du VCI que les fucales et éliminer au maximum la contribution éventuelle des laminaires et des algues rouges situées en bas d'estran.

Tableau 4 : Hauteurs d'eau en différents points de l'image Spot du 23 juin 2009 à 11 h 01 min TU (marée de coefficient 92)

Id	Localisation	Hauteur d'eau (m)	Heure de basse mer (TU)
1	Brignogan	1,37	11:12
2	Aber Benoit	1,37	10:51
3	Aber Ildut	1,14	10:38
4	Ile d'Ouessant	1,38	10:14
5	Le Conquet	1,39	10:21
6	Brest	1,50	10:17
7	Morgat	1,59	9:57

Pour ce traitement, 16226 pixels « minéraux » ont été récoltés sur la scène : 4571 points *sable*, 2426 points *roche*, 5893 points *vase* et 3336 points *eau*. Pour calculer le pixel *Algue pure*, les valeurs de 137 pixels ont été utilisées (Figure 4).

De même que pour l'image de 2007, le calcul du VCI est réalisé directement à partir de l'image brute en CN, sans application des gains de calibration absolus Spot pour le passage en luminance, ni passage en réflectance à partir de données terrain.

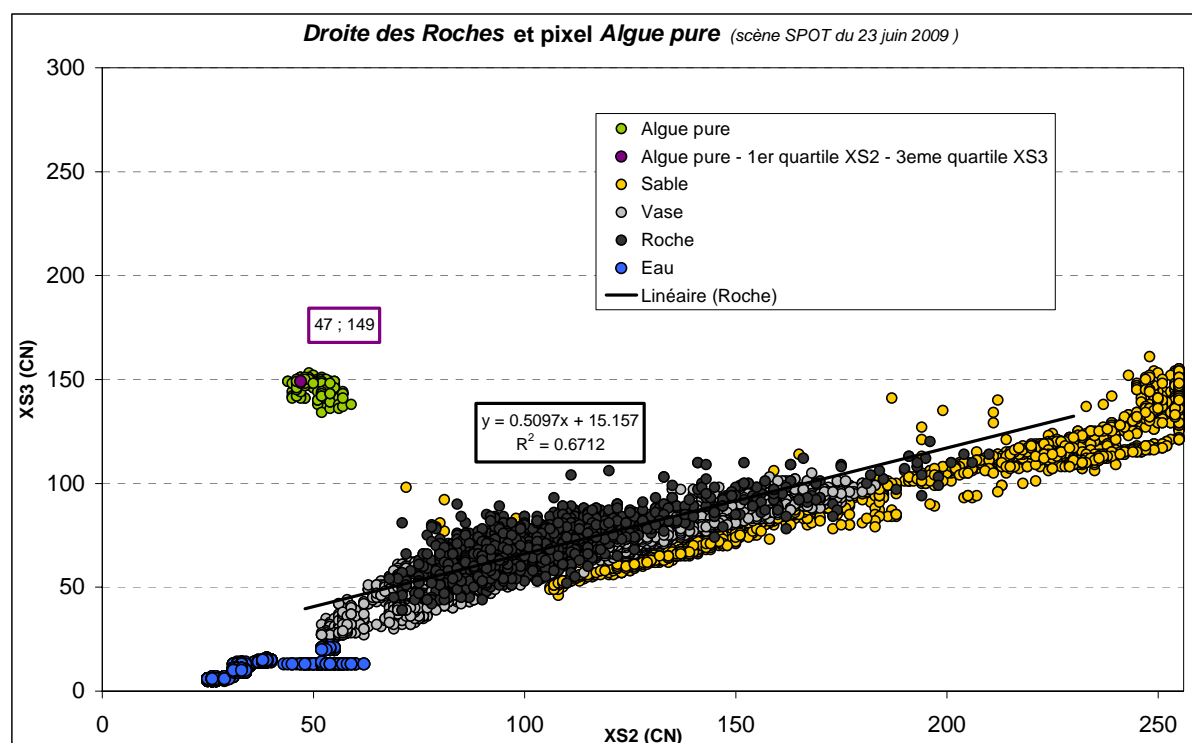


Figure 4 : Calcul de l'équation de la droite des roches. Graphique de répartition des points de référence sélectionnés par photo-interprétation sur l'image Spot du 23 juin 2009. En abscisse, le canal rouge XS2, en ordonnée le canal proche infrarouge XS3. Les couleurs des points représentent un type de substrat (*eau* en bleu, *roche* en noir, *vase* en gris, *sable* en jaune et *algues* en vert).

Détail des paramètres utilisés pour le calcul du VCI :

- *Pixel algue pure.* Pour le calcul du VCI, les valeurs retenues pour le pixel représentatif d'une couverture en fucales à 100 % (point violet Figure 4 ci dessus) sont : **XS2_{AP} = 47** et **XS3_{AP} = 149** (en CN).
- *Droite des roches.* L'équation de la droite des roches est calculée à partir de la réflectance dans les canaux rouge XS2 et proche infrarouge XS3 de points minéraux pris en CN sur l'image (Figure 4 : Calcul de l'équation de la *droite des roches*. Graphique de répartition des points de référence sélectionnés par photo-interprétation sur l'image Spot du 23 juin 2009. En abscisse, le canal rouge XS2, en ordonnée le canal proche infrarouge XS3. Les couleurs des points représentent un type de substrat (eau en bleu, *roche* en noir, *vase* en gris, *sable* en jaune et *algues* en vert).ci-dessus).Les coefficients de la droite des roches retenus sont : **a = 0,5097** et **b = 15,157**.
- *Seuil sur les canaux XS3 et XS4.* La réflectance de l'eau dans le moyen et le proche infrarouge étant très faible, le seuillage dans ces canaux permet de masquer l'image et ainsi de séparer la classe *eau* des autres substrats. Les valeurs retenues sont **XS3_s = 40** et **XS4_s = 20**. Les pixels en dessous de cette valeur seuil sont arbitrairement classés en *eau* (code 150).
De plus le niveau de la hauteur d'eau au moment de l'acquisition étant inférieur à la limite basse des fucales, il a été nécessaire d'appliquer un masquage supplémentaire. Ainsi le masque mer a été étendu avec une superposition des masques mer des images du 12/08/2006 et du 29/04/2006 sur la zone Molène-Ouessant, et du masque mer +2m délimité à partir d'un vol ULM en 2003 sur le Finistère nord.
- *Seuil sur XS2.* En raison de la saturation dans le canal XS2 (cf. Figure 4), un seuil a été appliqué sur ce canal de manière à ne pas prendre en compte pour le calcul du VCI des pixels minéraux trop réfléchissants (majoritairement des pixels de sable) artificiellement positionnés au dessus de la droite des roches. La valeur retenue est **XS2_s = 170**, au dessus le VCI est arbitrairement ramené à 0 (minéral pur).

Les paramètres pour le calcul du VCI sont synthétisés dans les tableaux suivants.

Tableau 5: Coefficients de la droite des roches : $\overline{XS3} = a.XS2 + b$, avec (XS2, XS3) les valeurs des comptes numériques des pixels minéraux dans le canal rouge et proche infrarouge, *a* la pente, *b* l'ordonnée à l'origine et *R*² le coefficient de corrélation

	a	b	R ²
Droite des Roches	0,5097	15,157	0,6712

Tableau 6 : Valeurs en comptes numériques du pixel *Algue pure* dans le canal rouge et proche infrarouge

	XS2	XS3
Pixel <i>Algue pure</i>	47	149

Les traitements informatiques ayant trait aux images satellites SPOT ont été effectués à partir du logiciel de traitement d'images ENVI 4.5. La mise en forme de l'ensemble des cartes finales produites dans le présent rapport a été réalisée sous le logiciel SIG Arcgis 9.2.

2.1.3 Différentiels d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2007 et 2009, et les images d'archive

Des différentiels d'évolution de la couverture en fucales ont été générés par croisement des images de 2007 et de 2009 traitées dans le cadre de ce rapport avec les images d'archives suivantes :

- image traitée du 18 avril 2003 pour la zone de Morlaix (résolution 10 m).
- image traitée du 12 août 2006 pour la zone de Molène (résolution 10 m).

Les cartes finales des taux d'évolution de la couverture en fucales, générées à partir de la différence entre les valeurs de VCI de chaque image, sont élaborées uniquement sur les parties communes aux deux images. Un *masque mer commun* est créé par superposition des masques mer de chaque image, ce qui permet de conserver le niveau d'eau le plus haut commun aux deux images. Ainsi une différence de hauteur d'eau n'a pas d'influence sur les résultats.

2.1.4 Réalisation de vérités terrain sur trois scènes Spot récentes

Les mesures de terrain (identification des espèces, taux de couverture) sont utilisées pour faciliter le repérage de cibles pures sur l'image satellite lors de l'établissement des équations de calcul du VCI, ainsi que pour la validation des taux de couverture.

Ces mesures ont été réalisées selon le protocole de terrain mis en place en 2007. Les taux de couverture en fucales sont évalués visuellement à l'échelle du pixel Spot par un opérateur de terrain confirmé. Cette méthode, très rapide à mettre en œuvre, permet d'acquérir de nombreuses données de terrain et d'avoir ainsi une meilleure statistique pour les validations.

Des campagnes de validation terrain ont été réalisées entre les 18 et 22 septembre 2009 dans le nord Bretagne. Elles ont permis de recueillir 128 waypoints (104 points de couverture en fucales, et 33 points délimitant la ceinture basse des fucales). Se reporter aux cartes en annexe 3 pour les localisations.

2.2 Analyse spatiale des différentiels d'évolution de la couverture en fucales sur l'ensemble du littoral Breton

Pour effectuer l'analyse spatiale du phénomène de régression des fucales sur l'ensemble du littoral breton, les différentiels effectués jusqu'alors en fonction de l'emprise des images SPOT ont été retravaillés pour être exprimés par masses d'eau DCE.

2.2.1 Isolement de l'estran par masses d'eau

Les masses d'eau ont été découpées suivant le polygone « estran » de la couche bathymétrique (couche « bathyshl2 » fournie par Ifremer) de sorte que seule la partie comprise entre le trait de côte et l'isobathe zéro a été conservée (Figure 5). Ainsi les zones infralittorales, exemptes de fucales, ne sont pas prises en compte dans les statistiques de surface.

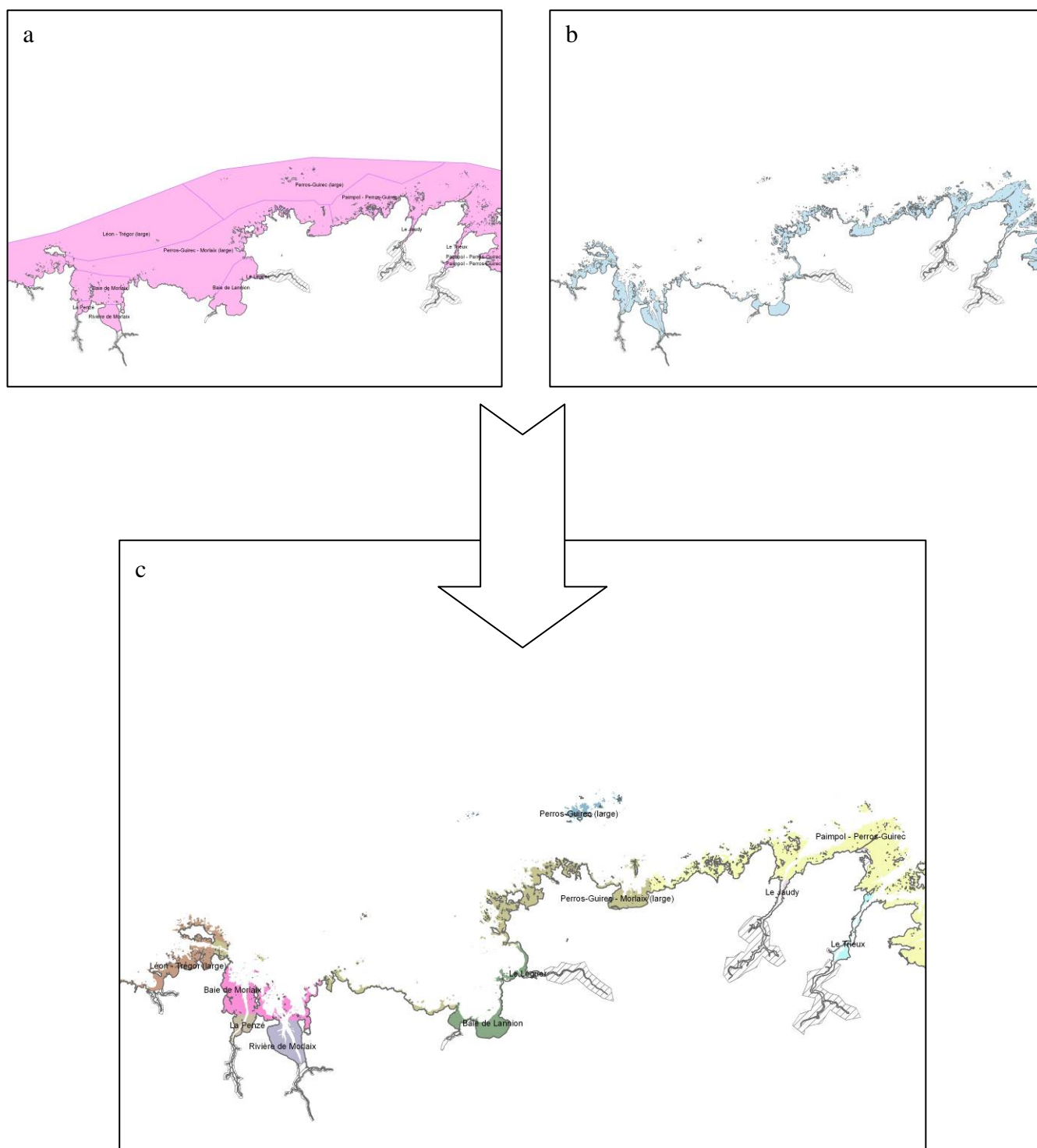


Figure 5 : Croisement du découpage des masses d'eau (a) avec la couche bathysyl2 (b) afin d'isoler l'estran potentiellement colonisable par les fucales par masses d'eau (c)

2.2.2 Formatage des images traitées

Pour la comparaison interannuelle de la couverture en fucales pour chaque masse d'eau, il a été envisagé dans un premier temps de n'utiliser qu'un seul masque mer commun établi à partir de l'image SPOT dont le niveau d'eau était le plus haut. L'inconvénient de cette méthode est la perte importante d'information concernant l'évolution de la ceinture en fucales en bas d'estran. Il a donc été décidé de comparer les images **par paires**.

Le formatage des données a été effectué comme suit : les classes « mer », « terre », « schorre », « nuage » et « no data » des images ont été regroupées en une seule classe de valeur 999 (les zones de schorres et les nuages ont été digitalisés à la main sous ArcGis). A l'issue de ce traitement, il ne reste plus que les valeurs de VCI comprises entre 0 et 100 comme information exploitable dans les images traitées. Lorsque les deux images possèdent des résolutions différentes (cas d'une image d'archive en 20 m et d'une image récente SPOT 5 en 10 m), un ré-échantillonnage de l'image de 10 m en 20 m a été opéré (il est en effet préférable de dégrader l'image de meilleure résolution). L'étape suivante consiste à recalcr les deux images de façon à ce que les deux grilles coïncident parfaitement (utilisation de la fonction «Layerstacking» sous ENVI).

Ces étapes ont permis à chaque fois la génération de deux nouvelles images ayant un masque mer commun (par extension « masque 999 »). Ce « masque 999 » commun est l'union des masques respectifs de chacune des deux images. Ainsi chaque pixel de valeur 999 sur une image aura également une valeur 999 sur l'autre. Inversement, un pixel ayant une valeur de VCI sur une image disposera forcément d'une valeur de VCI sur la seconde image utilisée pour l'élaboration du différentiel.

2.2.3 Traitement

Les images SPOT recoupant la même masse d'eau ont été traitées par paires. Le différentiel d'évolution n'a été effectué que si la surface de recoupement géographique était significative à l'échelle des masses d'eau (au moins une masse d'eau commune). Vu le nombre important de différentiel à traiter, des scripts ont été développés sous IDL 4.7 permettant de calculer automatiquement pour chacune des deux images utilisées pour la génération du différentiel et par masse d'eau:

- la surface totale en équivalent 100 % de couverture en fucales
- le pourcentage de recouvrement en fucales (rapport entre la surface totale en fucales hors équivalent 100 % et la surface de la masse d'eau)
- la surface totale en fucales hors équivalent 100 %
- la surface de la masse d'eau traitée

Après calcul de l'ensemble de ces paramètres, les différentiels ont été générés par paire avec un masque mer commun aux deux images dont la limite supérieure est imposée par l'image SPOT dont le niveau de l'eau est le plus haut (Figure 6).

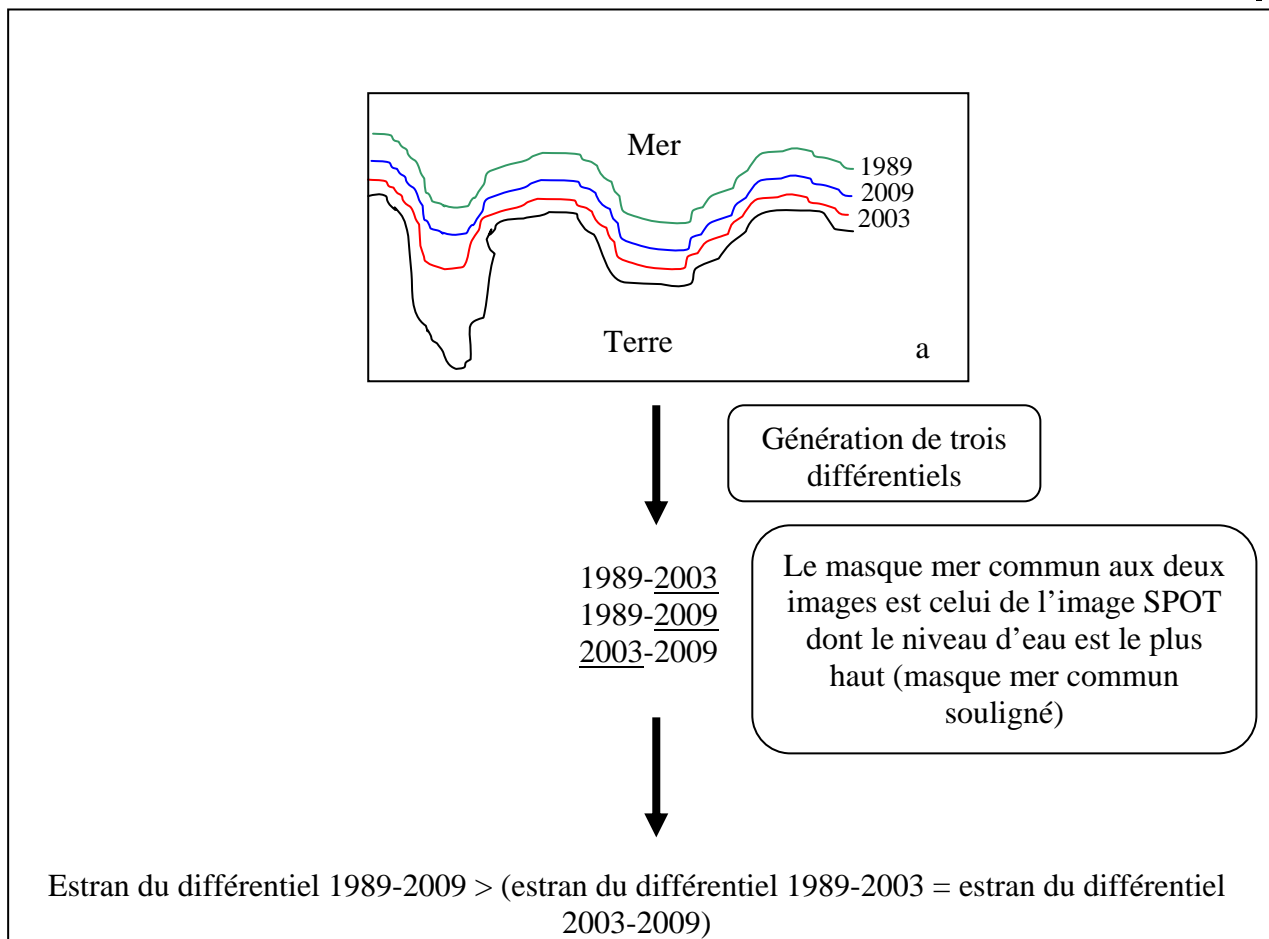


Figure 6 : Illustration de l'étape de traitement permettant d'extraire la partie de l'estran potentiellement colonisée par les fucales. Une masse d'eau fictive (vue aérienne) a été représentée (a). Chaque trait de couleur représente le niveau de bas de l'eau variable selon les années de prise de vue de l'image SPOT. Il apparaît alors que la surface d'estran colonisable n'est pas la même selon le différentiel considéré.

Si la procédure de traitement s'arrêtait à ce niveau là, il y aurait une augmentation artificielle de la couverture algale sur le différentiel 1989-2009 due au simple fait que la surface d'estran est plus grande. Ainsi, après avoir calculé le taux de recouvrement des fucales pour chaque différentiel, ceux-ci sont corrigés en étant ramenés à la surface d'estran la plus grande parmi les différentiels générés. En pratique, en attribuant des résultats fictifs pour l'exemple ci-dessus, les résultats pourraient être les suivants :

Différentiels	Masque mer	Surface ROI (ha)	Surf Algue (ha)	% ROI Rec	Eq 100 (ha)	Eq 100 normalisé (ha)
1989-2003	2003	525	302	57,5	+ 172	+ 216
1989-2009	2009	525	380	72,4	+ 290	+ 290
2003-2009	2003	525	302	57,5	+ 208	+ 262

Avec :

- Surface ROI (ha): surface d'estran délimitée entre le 0 SHOM et le trait de côte
- Surf Algue (ha): surface d'estran délimité par le masque « terre » et le masque « mer »
- % ROI Rec : pourcentage de l'estran potentiellement colonisable par les fucales. Il est calculé selon la formule suivante :

$$\left(\frac{\text{Surf Algue}}{\text{Surface ROI}} \right) \times 100$$

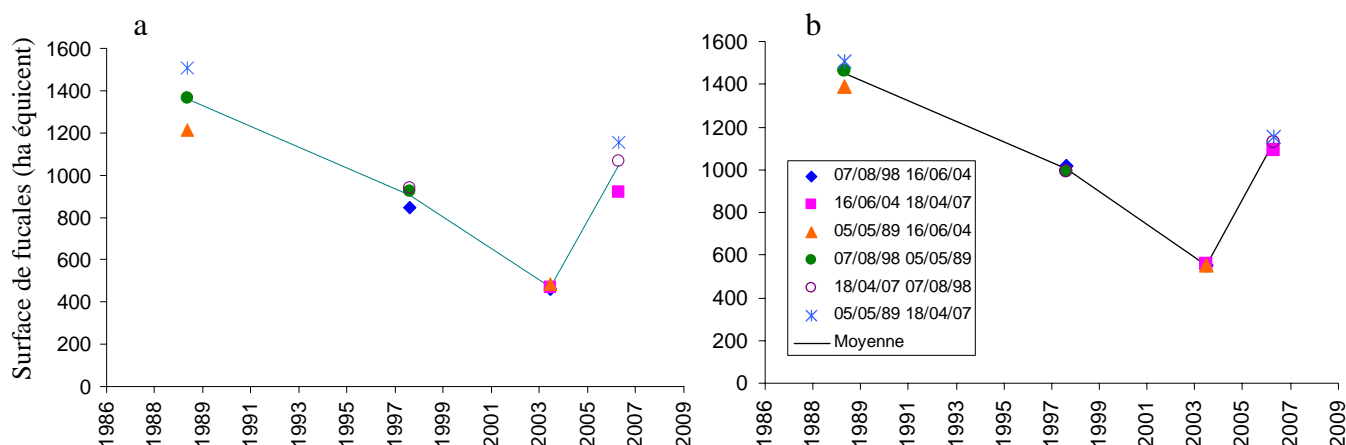
- Eq 100 (ha) : évolution de la surface de fucales en hectare équivalent 100 %. Chaque pixel est multiplié par son taux de recouvrement. L'ensemble des pixels est ensuite additionné
- Eq 100 normalisé (ha): pour un différentiel donné, le résultat de l'évolution surfacique (Eq 100) dépend de la surface d'estran. Afin d'uniformiser les résultats, chaque Eq 100 a été normalisé par rapport au pourcentage de l'estran potentiellement colonisable par les fucales (% ROI Rec) le plus grand. Dans l'exemple ci-dessus, les résultats Eq 100 des différentiels 1989-2003 et 2003-2009 sont rapportés au « % ROI Rec » du différentiel 1989-2009 par la formule suivante :

$$(\text{Eq 100}_{2003-2009} / \% \text{ROI Rec}_{1989-2009}) \times \% \text{ROI Rec}_{1989-2009}$$

Cet ajustement implique de faire l'hypothèse que la couverture algale sur la partie d'estran artificiellement ajoutée a évolué de la même façon que la couverture algale réellement présente.

Avec un cas réel, les résultats obtenus sont les suivants :

Date	Masque mer commun	ME	surf_ROI_ha	surf_algue	% ROI_rec	Eq100	Eq100 norm % ROI_rec
07/08/98	16/06/04	Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5174.88	57.59	844.08	1018.64
16/06/04		Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5174.88	57.59	458.49	553.31
16/06/04	16/06/04	Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5242.36	58.34	467.33	556.73
18/04/07		Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5242.36	58.34	918.00	1093.61
05/05/89	16/06/04	Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5467.36	60.84	1214.57	1387.45
16/06/04		Paimpol-Perros-Guirec	8986.12	5467.36	60.84	482.20	550.84
07/08/98	07/08/98	Paimpol-Perros-Guirec	8987.24	5827.16	64.84	926.65	993.25
05/05/89		Paimpol-Perros-Guirec	8987.24	5827.16	64.84	1364.73	1462.81
18/04/07	07/08/98	Paimpol-Perros-Guirec	8989.84	5918.60	65.84	1068.78	1128.19
07/08/98		Paimpol-Perros-Guirec	8989.84	5918.60	65.84	941.06	993.37
05/05/89	18/04/07	Paimpol-Perros-Guirec	8985.40	6244.72	69.50	1505.77	1505.77
18/04/07		Paimpol-Perros-Guirec	8985.40	6244.72	69.50	1155.64	1155.64



Il est à noter que les surfaces ROI peuvent être légèrement différentes entre les différentiels du fait de l'évolution du trait de côte. Les différentiels les plus récemment générés ont été élaborés avec le trait de côte mis à jour par le SHOM et au besoin par le Ceva sur la base des orthophotos du littoral.

Suite à la normalisation, la dispersion moyenne des points pour une même image SPOT, c'est-à-dire la différence de surface algale calculée pour une même date sur une même masse d'eau est inférieure à 7 %. Néanmoins, pour quelques rares cas, cette différence peut-être en moyenne de 25 %. Ces écarts importants sont notés sur les estrans sur lesquels la surface de la ceinture de fucales est très faible (généralement inférieure à 10 ha).

Il est difficile de quantifier mathématiquement la précision des valeurs obtenues en fin de traitement, certains paramètres dépendant directement de l'opérateur effectuant le traitement. Néanmoins, une précision de ± 10 % semble envisageable lorsque les couvertures en fucales sont importantes. A l'inverse, sur des petites zones faiblement couvertes, une précision de ± 20 % semble plus réaliste.

2.3 Développement d'une approche complémentaire d'étude des fucales par analyse de clichés aériens historiques

Pour compléter l'analyse effectuée à partir des images SPOT, une analyse basée sur des photographies aériennes historique a été initiée. Une centaine de clichés pris entre 1932 et 2009 ont été examinés durant 1 journée à l'IGN de Saint-Mandé. Les clichés les plus représentatifs ont été sélectionnés. Ils ont par la suite été scannés à haute résolution. Dans ce rapport est présenté un exemple d'exploitation d'une série historique de clichés sur la zone de Kérec (Côtes d'Armor).

3 RESULTATS

3.1 Traitement des images Spot

3.1.1 **Calcul du VCI sur l'image de Morlaix (Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé + Rivière de Morlaix) du 18 avril 2007**

Calcul du VCI

Les cartes finales exprimant le taux de couverture en fucales pour l'image Spot du 18 avril 2007 « Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé + Rivière de Morlaix » sont reportées en Annexe 1. Sur les cartes, le VCI est représenté sous forme de 9 classes de couleurs qui mettent en évidence les plus faibles et fortes densités :

- | | |
|----------------|--|
| ○ 0 - 1 % | Estran nu (roches de haut d'estran, sable) |
| ○ 1 - 12,5 % | Très faible couverture algale (peu significative) |
| ○ 12,5 - 25 % | Faible couverture algale |
| ○ 25 - 37,5 % | Faible couverture algale |
| ○ 37,5 - 50 % | Couverture algale moyenne |
| ○ 50 - 62,5 % | Couverture algale moyenne |
| ○ 62,5 - 75 % | Forte couverture algale |
| ○ 75 - 87,5 % | Forte couverture algale |
| ○ 87,5 - 100 % | Forte couverture algale (la quasi-totalité du substrat est couvert). |

3.1.2 Calcul du VCI sur l'image Ouessant - Molène (Léon large + Les Abers côte et large + Iroise Camaret et large + Rade de Brest + Baie de Douarnenez) du 23 juin 2009

Calcul du VCI

Les cartes finales exprimant le taux de couverture en fucales pour l'image Spot du 23 juin 2009 « Léon large + Les Abers côte et large + Iroise Camaret et large + Rade de Brest + Baie de Douarnenez » sont reportées en Annexe 2.

Sur les cartes, le VCI est représenté sous forme de 9 classes de couleurs qui mettent en évidence les plus faibles et fortes densités :

- | | |
|----------------|--|
| ○ 0 - 1 % | Estran nu (roches de haut d'estran, sable) |
| ○ 1 - 12,5 % | Très faible couverture algale (peu significative) |
| ○ 12,5 - 25 % | Faible couverture algale |
| ○ 25 - 37,5 % | Faible couverture algale |
| ○ 37,5 - 50 % | Couverture algale moyenne |
| ○ 50 - 62,5 % | Couverture algale moyenne |
| ○ 62,5 - 75 % | Forte couverture algale |
| ○ 75 - 87,5 % | Forte couverture algale |
| ○ 87,5 - 100 % | Forte couverture algale (la quasi-totalité du substrat est couvert). |

3.2 Validation des VCI à partir de points de vérité terrain sur deux scènes SPOT récentes (Morlaix, Ouessant-Molène)

Les cartes de localisation des points de mesure des taux de couverture terrain acquis entre les 18 et 22 septembre 2009, utilisés pour les traitements et les validations, sont présentées en Annexe 3. Un total de 128 points terrain ont été acquis sur les deux images SPOT de Bretagne nord.

3.2.1 Image « Morlaix » du 18 avril 2007

Pour cette image, 94 relevés terrain (répartis en 3 secteurs) de mesures de taux de couverture en fucales ont été exploités. Les points et la droite de corrélation sont visualisables sur la Figure 8 ci-dessous.

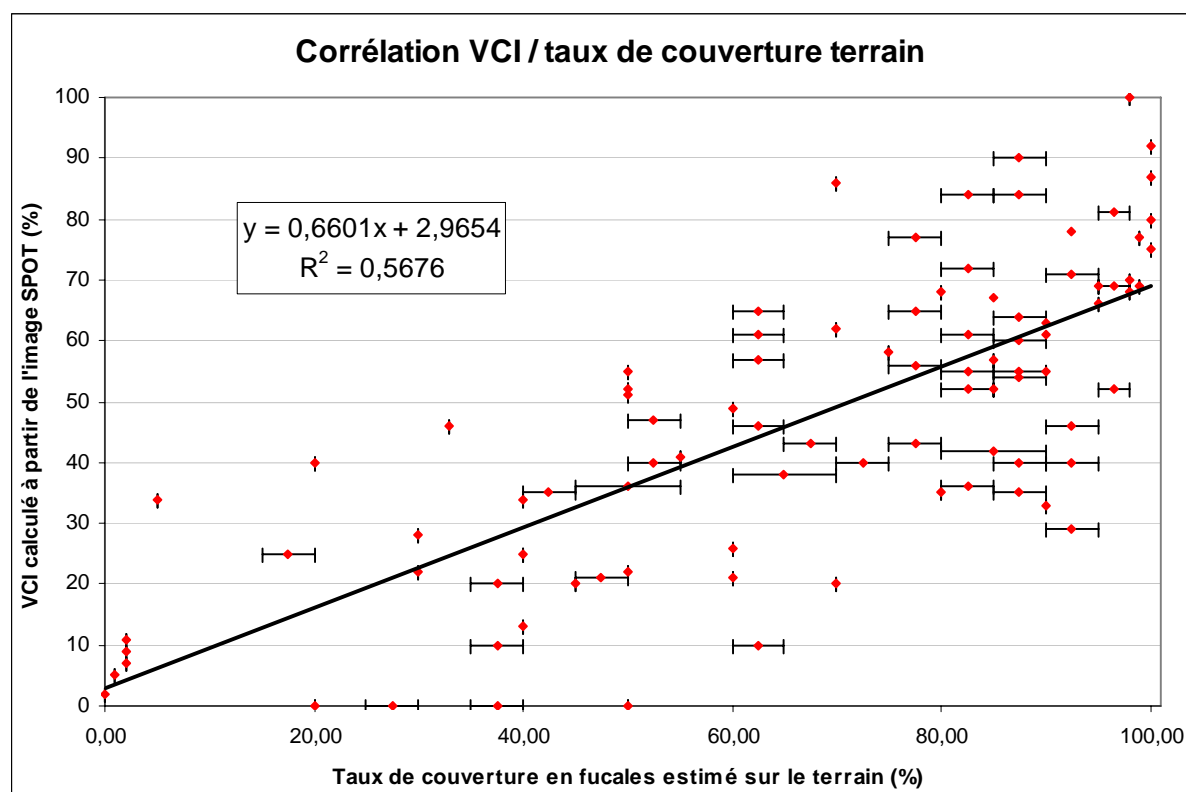


Figure 8 : Corrélation entre les taux de couverture relevés sur le terrain et le VCI calculé sur l'image Spot du 18 avril 2007

Le coefficient de détermination (R^2) de la droite de régression est moyen (0,57), synonyme d'une relativement forte dispersion des points autour de la droite de régression. Cette dispersion illustre les difficultés rencontrées pour la validation des résultats notamment à cause des différentes échelles et résolutions d'observation (pixel SPOT de 10 m), des erreurs dues au géoréférencement de l'image SPOT (erreur estimée de l'ordre du pixel), à la précision du GPS (± 3 m) sur un terrain où les données mesurées sont spatialement et temporellement (degrés d'hydratation des algues) très variables.

Une amélioration de la corrélation entre VCI et points terrain peut être obtenue par un travail de photo-interprétation avant croisement des données. Les points de terrain sont :

- **déplacés** s'il est évident que le point est mal positionné (sans doute un décalage dans le géoréférencement de l'image). Dans la pratique, les points sont déplacés dans un rayon de 1 pixel maximum.
- **supprimés** si la cible et les photos terrain ne permettent pas d'identifier la zone correspondante sur l'image. On rencontre ce type de point souvent dans des zones très hétérogènes sur le terrain, qui ne peuvent être rendus sur l'image en raison de leur plus faible résolution. C'est également le cas pour certaines zones colonisées par les algues vertes, ou quand les *Ascophyllum* sont épiphytées, ou encore pour les zones d'échouages des fucales arrachées.
- **laissés tel quels** si leur positionnement semble correspondre avec l'image.

Le graphique de la Figure 9 ci-dessous montre la corrélation obtenue ($R^2 = 0,76$) après repositionnement de 85 points par photo-interprétation.

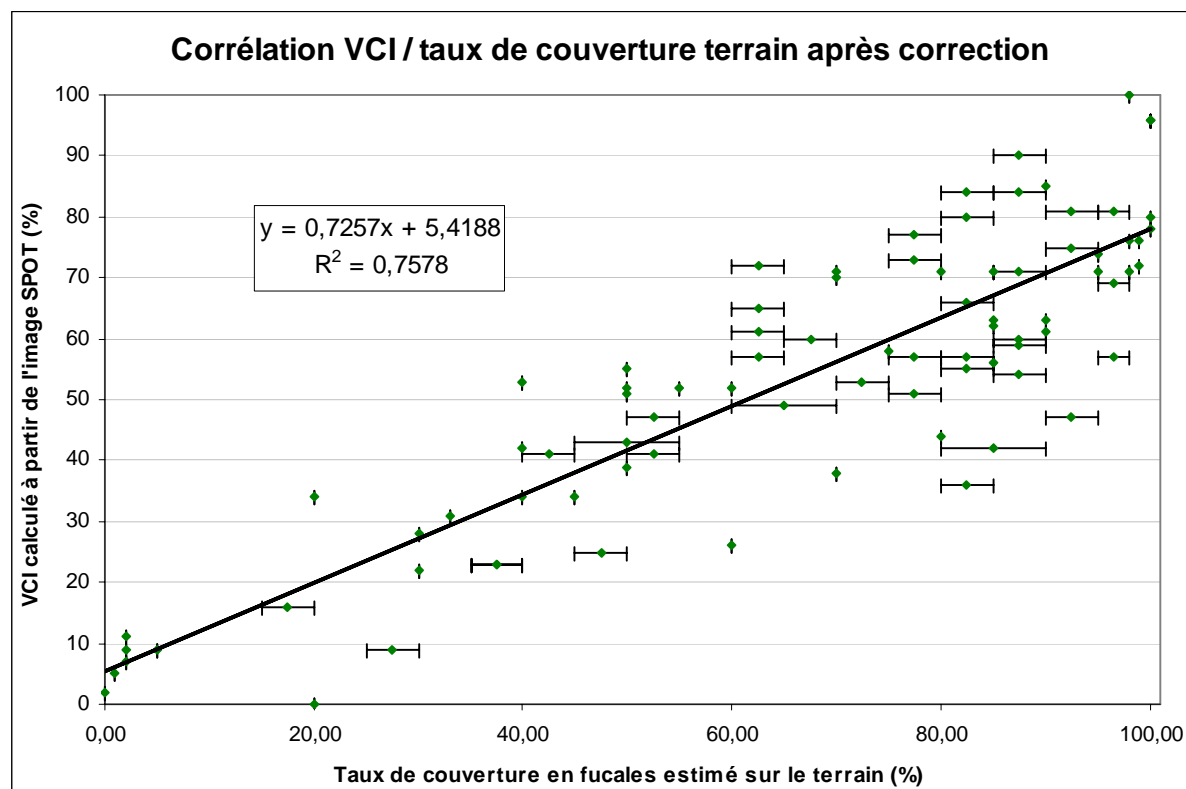


Figure 9 : Corrélation finale entre les taux de couverture relevés sur le terrain et le VCI calculé sur l'image Spot du 18 avril 2007 après retouche des waypoints terrain. Déplacement (au maximum 1 pixel) ou élimination des pixels des zones trop hétérogènes ou ayant un taux de couverture trop variable du à la présence d'algues vertes, d'épiphytes, ou d'échouages d'algues arrachées

Cette méthode permet une meilleure corrélation entre les mesures terrain et le VCI calculé sur l'image, cependant :

- les faibles taux de couverture terrain sont surestimés (ordonnée à l'origine de 5,4), sans doute à cause de roches nues, dont la réflectance est légèrement surélevée dans le PIR par la présence de balanes, moules.
- les plus forts taux de couverture terrain sont sous-estimés (pente de 0,73), sans doute par la présence de nombreuses flaques d'eau sur l'estran, pouvant abaisser artificiellement le VCI.

3.2.2 Image « Molène-Ouessant du 23 juin 2009

Pour cette image, 89 relevés terrain (répartis sur 2 secteurs) de mesures de taux de couverture en fucales ont été exploités. Les points et la droite de corrélation sont visualisables sur la Figure 10 ci-dessous.

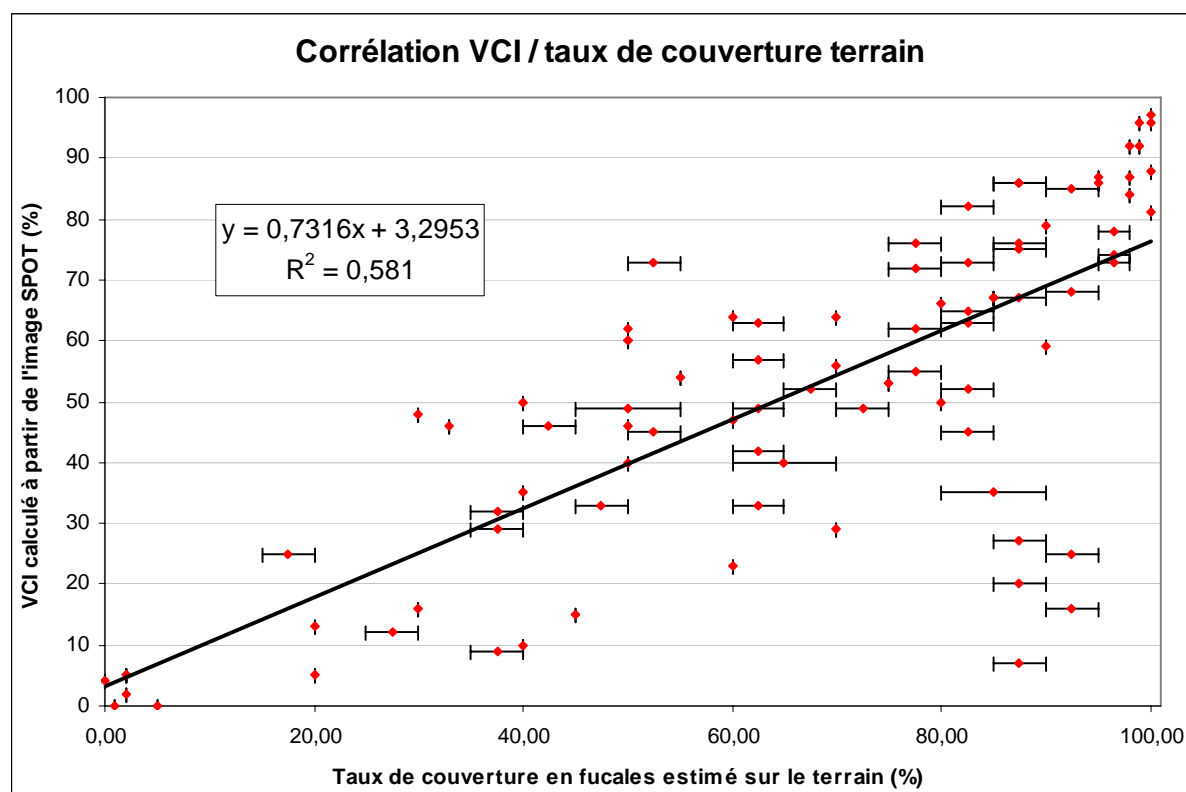


Figure 10 : Corrélation entre les taux de couverture terrain et le VCI calculé sur l'image Spot de Molène-Ouessant de 23 juin 2009

De la même façon que pour l'image du 18 avril 2007 sur Morlaix, le coefficient de détermination (R^2) de la droite de régression est moyen (0,58), synonyme d'une assez forte dispersion des points autour de la droite de régression. Cette dispersion illustre à nouveau les difficultés rencontrées pour la validation des résultats notamment à cause des différentes échelles et résolutions d'observation (pixel Spot de 10 m), des erreurs dues au calage (image Spot, précision du GPS) sur un terrain où les données mesurées sont spatialement et temporellement (degrés d'hydratation des algues) très variables.

On constate à nouveau qu'une très nette amélioration de la corrélation entre VCI et points terrain a pu être obtenue par un travail de photo-interprétation avant croisement des données (déplacement des waypoints litigieux de 3 à 5 m maximum, c'est-à-dire la précision de positionnement du GPS en mode navigation).

La Figure 11 ci-dessous montre la très bonne corrélation obtenue ($R^2 = 0,92$) après repositionnement de 83 points par photo-interprétation.

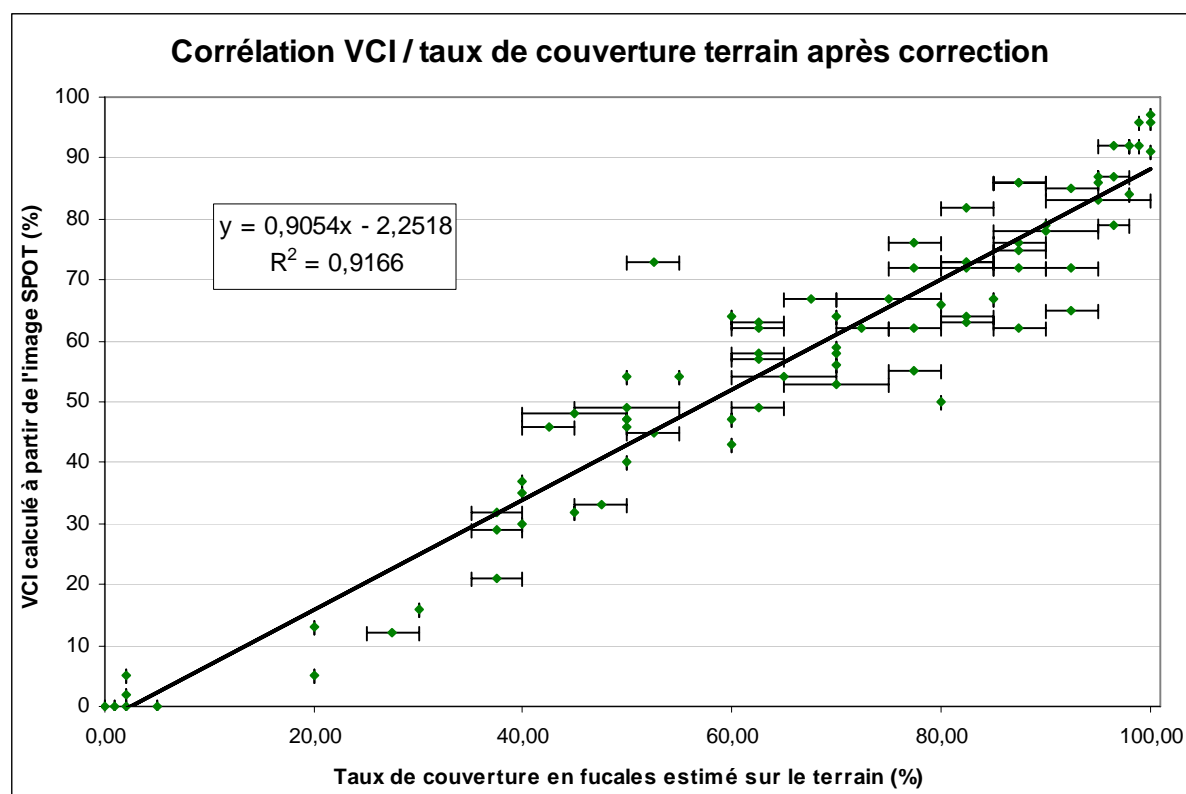


Figure 11 : Corrélation finale entre les taux de couverture relevés sur le terrain et le VCI calculé sur l'image Spot du 23 juin 2009 après retouche des waypoints terrain. Déplacement (au maximum 5m) ou élimination des pixels des zones trop hétérogènes ou ayant un taux de couverture trop variable du à la présence d'algues vertes, d'épiphytes, ou d'échouages d'algues arrachées.

Cette méthode permet une meilleure corrélation entre les mesures terrain et le VCI calculé sur l'image, cependant :

- les faibles taux de couverture terrain sont très légèrement sous-estimés (ordonnée à l'origine de -2,25).
- les plus forts taux de couverture terrain sont légèrement sous-estimés (pente de 0,90).

3.2.3 Différentiel d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2007 et de 2003 sur les masses d'eau DCE « Léon-Trégor large + Perros-Guirec-Morlaix large + Baie de Morlaix + La Penzé »

On constate une régression globale de la couverture en fucales avec une diminution de -26 ha en équivalent 100% mesurée sur la partie commune aux images de 2003 et 2007. Globalement, on peut noter une augmentation relative dans la moitié Est de la scène (de Carantec à Plouescat) et une réduction dans sa moitié Ouest (de l'anse de Goulven au nord de Plouguerneau). Sur la zone allant de Carantec à Cleder, on observe un bilan légèrement positif de 5.3 ha de croissance, puis la tendance s'inverse avec 16 ha de régression entre Cleder et Brignogan-plage et -19 ha entre Kerlouan et Plouguerneau.

Les cartes finales de l'évolution de la couverture en fucales sont présentées en Annexe 4.

3.2.4 Différentiel d'évolution de la couverture en fucales entre les images SPOT de 2009 et de 2006 sur les masses d'eau DCE « Les Abers côte et large + Iroise large + Rade de Brest »

On constate une progression globale de la couverture en fucales avec une augmentation de 50 ha en équivalent 100 % mesurée sur la partie commune aux images de 2006 et 2009. Plus précisément, la croissance est localisée sur le continent et sur la zone des Abers (du nord de l'Aber Wrac'h jusqu'au sud de l'Aber Ildut) avec près de 80 ha d'augmentation. Inversement sur l'archipel d'Ouessant Molène, on constate une régression de près de 30 ha.

Les cartes finales de l'évolution de la couverture en fucales sont présentées en Annexe 5.

3.3 Analyse détaillée de l'évolution temporelle de la couverture de fucales par masses d'eau DCE

La Figure 12 et la Figure 13 présentent les résultats d'évolution temporelle de la couverture en fucales en Bretagne nord et en Bretagne sud, respectivement. Le nombre d'histogrammes d'évolution pour chaque masse d'eau dépend du nombre de clichés SPOT exploitables sur ces masses d'eau. La liste nominative des masses d'eau avec leur code correspondant est présentée en Annexe 7. Sur les 35 masses d'eau contenant des fucales et pour lesquelles des clichés SPOT ont pu être exploités sur plusieurs années, 21 présentent une régression de fucales entre leur date la plus récente et leur date la plus ancienne disponibles. Parmi ces 21 masses d'eau, celles du nord Bretagne montrent une régression moyenne de 21 % depuis la fin des années 80 pour la zone allant de Saint-Brieuc à l'Aber Benoît inclus et de 16 % depuis les années 2000 pour la zone allant de l'Aber Benoît (exclus) à la baie de Douarnenez. Au sud Bretagne, une régression moyenne de 28 % a été mise en évidence depuis la fin des années 80 jusqu'à 2007.

Les masses d'eau sur lesquelles ont été observées une stabilisation ou une augmentation de la ceinture de fucales sont pour le nord Bretagne : Le Léguer (FRGT05), la rivière de Morlaix (FRGT06), la rivière de Daoulas (FRGT11), Iroise-Camaret (FRGC17) et la Baie de Douarnenez (FRGC 20). Pour le sud Bretagne, les masses d'eau présentant une stabilisation ou une augmentation de la ceinture de fucales sont : la baie d'Etel (FRGC35), Belle-Ile (FRGC42), la baie de Quiberon (FRGC36), la rivière de Crac'h (FRGT22), le Golfe du Morbihan large (FRGC38), la rivière de Pénérif (FRGT26) et la Loire large (FRGC46). La liste des masses d'eau complète est disponible en Annexe 6.

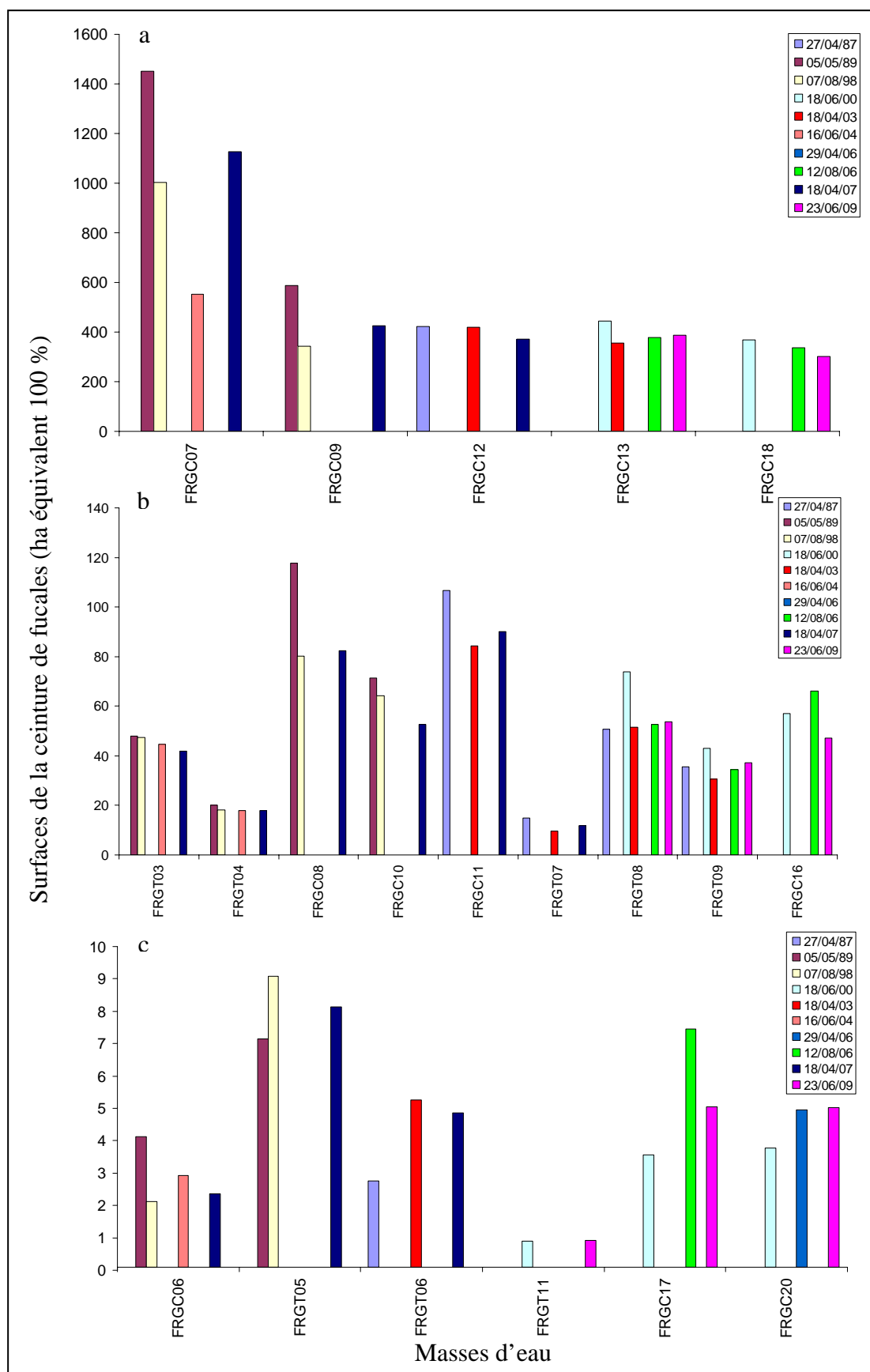


Figure 12 : Evolution temporelle de la ceinture de fucales par masses d'eau pour la partie nord de la Bretagne. Pour une meilleure lecture des résultats, les masses d'eau ont été regroupées par ordre décroissant de surface algale, les plus importantes surfaces algales étant représentées en a, les surfaces moyennes en b et les faibles surface en c

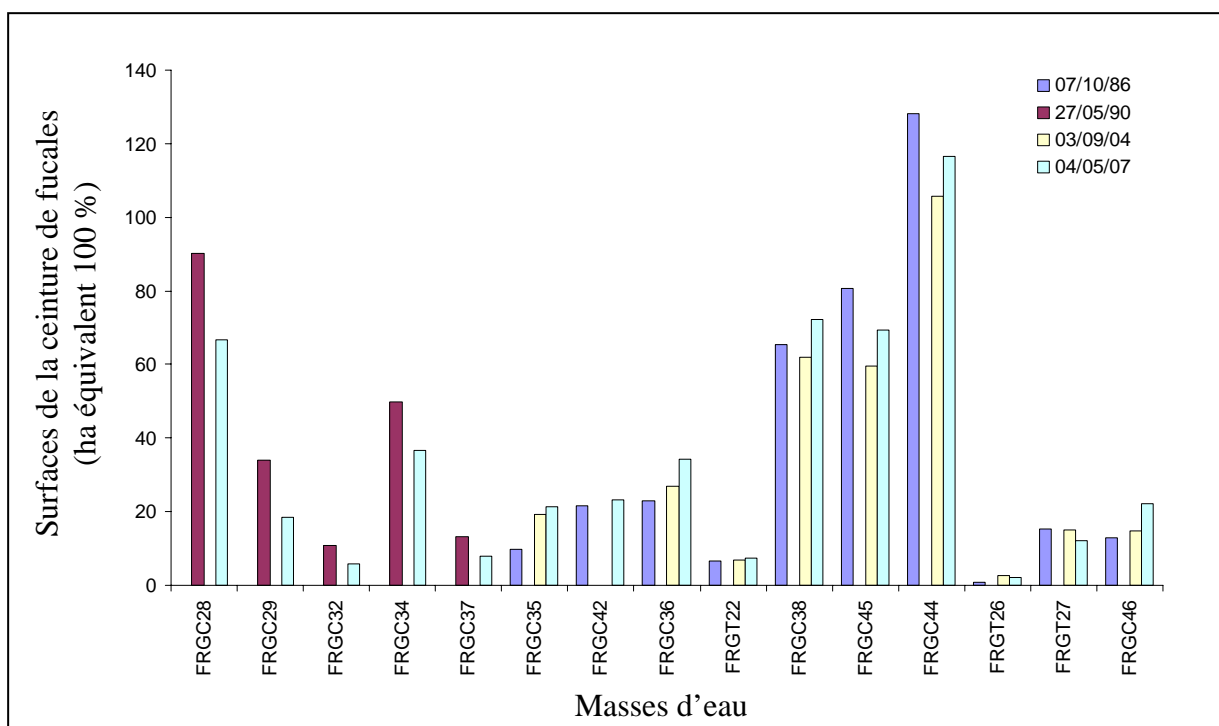


Figure 13 : Evolution temporelle de la ceinture de fucales par masses d'eau pour la partie sud de la Bretagne (pour FRGC44, FRGC46, FRGT26 et FRGT27, les valeurs reportées au 04/05/07 sont celles du 20/04/07)

De part l'importance variable du substrat rocheux colonisable par les fucales suivant les masses d'eau et l'influence de la colonisation des algues vertes dans certaines masses d'eau qui induisent un artefact dans le traitement des images SPOT et amènent à une surestimation de la couverture en fucales, il a été choisi, pour la suite de l'analyse des résultats, de ne conserver que les masses d'eau contenant d'importants platiers rocheux et combinant les plus importantes surfaces de fucales.

Ainsi, pour le nord Bretagne, le choix s'est porté sur la FRGC07, la FRGC08, la FRGC09, la FRGC11, la FRGC12, la FRGC13 et la FRGC18. Pour le sud Bretagne ont été retenues les FRGC28, 34, 38, 44 et 45. Ces résultats sont présentés géographiquement Figure 16.

3.3.1 Masse d'eau Paimpol - Perros-Guirec (FRGC07)

Cette masse d'eau contient la surface de fucales la plus importante en Bretagne. La ceinture de fucales qui s'étendait en 1989 sur près de 1500 ha (équivalent) a régressé de 500 ha entre 1989 et 1998. Durant cette période, l'analyse cartographique du différentiel sur le secteur Pleubian-Bréhat (Figure 14) à lieu de part et d'autre du sillon du Talbert, démontrant que l'exposition ne semble pas intervenir dans la régression des fucales. Excepté pour l'île de Bréhat, la régression est généralisée sur l'ensemble du secteur côtier. En 2004, les fucales ne recouvraient plus que 550 ha. Néanmoins entre 2004 et 2007, après 15 ans d'une régression drastique, les fucales se développent à nouveau pour retrouver une ceinture d'une surface équivalente à celle de 1998, soit 1100 ha. Le bilan entre 1989 et 2007 est néanmoins négatif avec une perte de 22 % de la couverture de fucales.

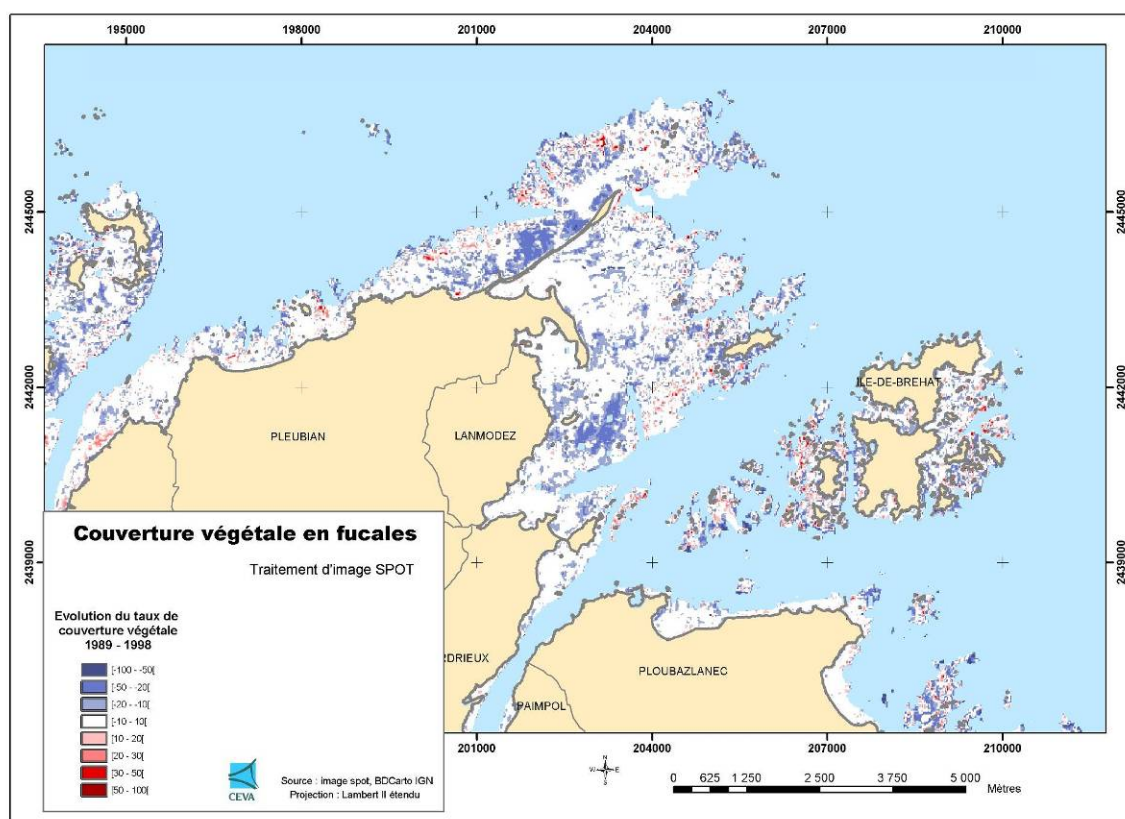


Figure 14 : Différentiel d'évolution de la couverture en fucales sur le secteur Pleubian-Bréhat entre 1989 et 1998

3.3.2 Masse d'eau Perros-Guirec large (FRGC08)

Bien que beaucoup moins importante que la ceinture de fucales de la masse d'eau précédente, l'évolution temporelle des fucales dans cette masse d'eau peu influencée par les apports continentaux et les différentes pressions anthropiques montre néanmoins les mêmes tendances que celles évoquées précédemment. La surface occupée par les fucales régresse de 32 % entre 1989 et 1998. Les résultats de 2007 montrent comme précédemment que la ceinture de fucales est de surface identique à celle de 1998 soit 80 ha, indiquant un arrêt du phénomène de régression.

3.3.3 Masse d'eau Perros-Guirec – Morlaix large (FRGC09)

A partir des résultats disponibles, il apparaît que le maximum de couverture a été atteint en 1989 avec près de 600 ha de fucales. Environ un tiers de la couverture a disparu entre 1989 et 1998 avant d'augmenter à nouveau entre 1998 et 2007 avec une surface finale de près de 430 ha. Entre 1989 et 2007, les fucales ont régressé de 27 %.

3.3.4 Masse d'eau baie de Morlaix (FRGC11)

Même si le maximum de la couverture de fucales ne s'élève qu'à 100 ha, cette masse d'eau est directement influencée par les apports continentaux et l'activité anthropique. Il était de ce fait intéressant de constater que l'évolution temporelle de la surface en fucales est la même que celle constatée sur l'ensemble des masses d'eau précédemment détaillée. Une régression des fucales de 20 % a eu lieu entre 1987 et 2003 suivie d'une légère augmentation entre 2003 et 2007 pour une surface finale de 90 ha. Entre 1987 et 2007, les fucales ont régressé de 16 %.

3.3.5 Masse d'eau Léon-Trégor large (FRGC12)

Parmi l'ensemble des masses d'eau retenue pour le nord Bretagne, celle-ci est la seule présentant un profil d'évolution temporelle différent de celui des autres masses d'eau. En effet, une régression continue est observée à partir des données disponibles. Cette régression est néanmoins progressive avec une perte de seulement 12 % de la surface en fucales entre 1987 et 2007.

3.3.6 Masse d'eau Les Abers large (FRGC13)

Malgré le manque de données historiques sur cette masse d'eau, une régression des fucales a également eu lieu dans cette masse d'eau avec une perte de 20 % des fucales entre 2000 et 2003. Par la suite, une augmentation de la couverture de fucales a eu lieu jusqu'en 2009, date à laquelle la surface des fucales s'élevait à 390 ha, surface restant néanmoins inférieure de 12 % à celle mesurée en 2000.

3.3.7 Iroise large (FRGC18)

Comme pour la FRGC08, l'intérêt de cette masse d'eau est l'éloignement des fucales vis-à-vis des différentes influences anthropiques. Une régression des fucales de 18 % a eu lieu entre 2000 et 2009, équivalente à une perte de 65 ha de fucales. Une accélération de cette régression a eu lieu entre 2006 et 2009, avec une perte de 10 % en 3 ans contre une perte de 8 % en 6 ans, entre 2000 et 2006. Même si ces résultats semblent contradictoires avec ceux exposés dans la masse d'eau précédente, il est à noter que l'augmentation mesurée entre 2006 et 2009 pour la FRGC13 ne s'élevait qu'à 3 %, ce qui ne constitue pas une augmentation significative dans le cadre de traitement d'image SPOT.

3.3.8 Concarneau large (FRGC28)

Les platiers rocheux du sud Bretagne sont très différents du nord de part leur étendue. Ainsi, les couvertures en fucales ne dépassent pas les 150 ha. Malgré cela, les mêmes tendances d'évolution des fucales se retrouvent. Pour la masse d'eau de Concarneau large, une régression de 26 % de la ceinture de fucales a eu lieu entre 1990 et 2007.

3.3.9 Masse d'eau Lorient-Groix (FRGC34)

Comme précédemment, une régression de 26 % a été mise en évidence entre 1990 et 2007, la ceinture de fucales passant d'une surface de 50 ha à 37 ha.

3.3.10 Masse d'eau Golfe du Morbihan large (FRGC38)

Cette masse d'eau présente l'intérêt d'avoir des périodes communes d'évolution avec les masses d'eau du nord Bretagne. Ainsi, il est intéressant de constater qu'une régression de la ceinture de fucales a eu lieu entre 1986 et 2004 mais que comme au nord, une augmentation a eu lieu entre 2004 et 2007, induisant une surface finale en fucales supérieure de 10 % à celle de 1986.

3.3.11 Masse d'eau Baie de Vilaine côte (FRGC44)

Avec une perte de 17 % des fucales entre 1986 et 2004, et un regain de 9 % entre 2004 et 2007, l'évolution temporelle de la surface des fucales s'assimile à celle déjà observée dans la majorité des masses d'eau précédentes avec une diminution totale entre 1986 et 2007 de 8 %. Néanmoins à échelle plus restreinte que celle de la masse d'eau telle que le secteur allant de Sarzeau à Pénestin, la perte des fucales s'élève à 40 % entre 1986 et 2004 (Figure 15). Comme pour le nord de la Bretagne, la régression s'observe sur l'ensemble du linéaire côtier, les plus fortes zones de régression étant localisées au niveau des plus grands platiers rocheux qui regroupent la plus forte densité de fucales.

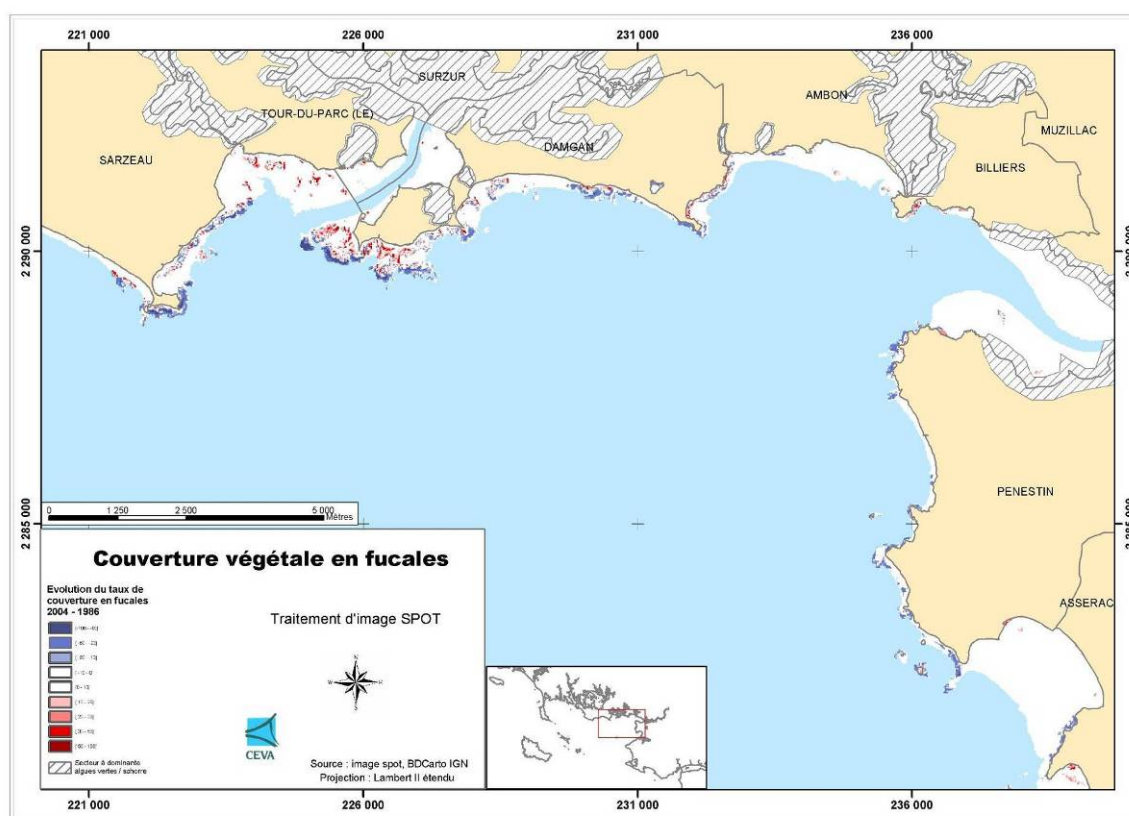


Figure 15 : Différentiel d'évolution de la couverture en fucales sur le secteur allant de Sarzeau à Pénestin entre 1986 et 2004

3.3.12 Masse d'eau Baie de Vilaine large (FRGC45)

Pour cette dernière masse d'eau, l'évolution reste la même qu'observée précédemment avec une perte de 20 ha de fucales entre 1986 et 2004 et un gain de 10 ha entre 2004 et 2007. Le bilan entre 1986 et 2007 reste néanmoins une perte de 14 % des fucales dans cette masse d'eau.

L'analyse de ces différents résultats permet de conclure que :

- une régression importante des fucales est notée entre la fin des années 80 et le début des années 2000 au nord comme au sud de la Bretagne.
- un regain de la couverture en fucales est observé durant la période comprise entre 2004 et 2007.
- l'évolution temporelle de la ceinture de fucales étant similaire au nord et au sud Bretagne, dans des zones différemment influencées par les activités anthropiques, il en ressort qu'un phénomène global semble engendrer cette évolution.

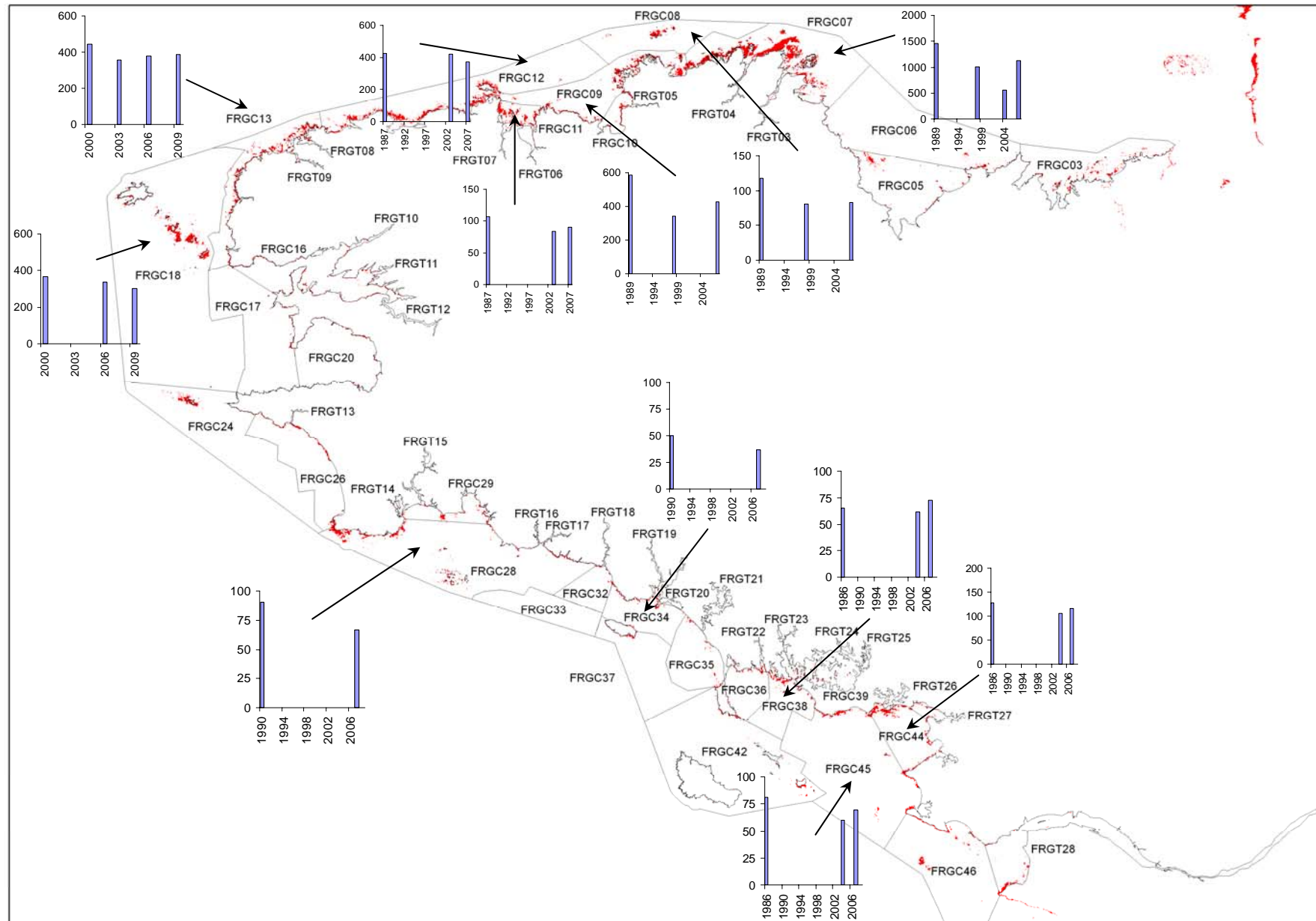


Figure 16 : Cartographie de l'évolution surfacique de la ceinture de fucales sur les côtes bretonnes (ha équivalent 100%). Les platiers rocheux sont représentés en rouge

3.4 Discussion

3.4.1 Régression des fucales dans le monde

Les fucales sont principalement présentes dans l'hémisphère nord, leur répartition allant de l'arctique jusqu'aux côtes portugaises pour les côtes européennes et s'étendant jusqu'aux côtes du New Jersey concernant les côtes atlantiques américaines (Guiry et Guiry, 2010). Jusqu'à présent, le déclin des fucales a été décrit sur le littoral de la mer Baltique (Kairesalo et Leskinen, 1986 ; Vogt et Schramm, 1991 ; Torn et al., 2006 (cf. ce dernier article pour des références supplémentaires), au nord de l'Irlande (Davies et al., 2007), sur la côte ouest française (Le Roux, 2008 ; Madic et Madic, 2005 ; Perrot et al., 2008). Une mortalité inhabituelle a également été observée sur la côte canadienne atlantique (MacKenzie, 2002). L'ensemble des travaux montre que les espèces les plus concernées par cette régression sont principalement *Fucus vesiculosus* et *Ascophyllum nodosum*. Des suivis temporels de long terme ont démontré une fluctuation cyclique naturelle de la couverture en fucales allant d'une couverture totale de l'habitat à une disparition presque complète en l'espace d'une dizaine d'années (Hill et al., 1998). Le cycle de succession des différentes communautés sur les estrans rocheux modérément exposés est présenté Figure 17. Les zones rocheuses nues sont tout d'abord colonisées par les balanes sur lesquelles une petite proportion de fucales parvient à se développer. A l'état adulte, les frondes des fucales, par leur mouvement de balayage du substrat, favorisent l'élimination des balanes et induit également l'élimination des jeunes plantules de fucales nouvellement implantées. Ainsi, l'espace vide est colonisé par les patelles. La population de patelles devient dense et exerce une pression de broutage accrue sur les jeunes pousses de fucales. Lorsque les fucales adultes disparaissent, le renouvellement de génération n'est pas assuré. Seules restent les balanes et les patelles. Suite à la dispersion ou à la mort des patelles, les balanes recolonisent l'espace rocheux libre.

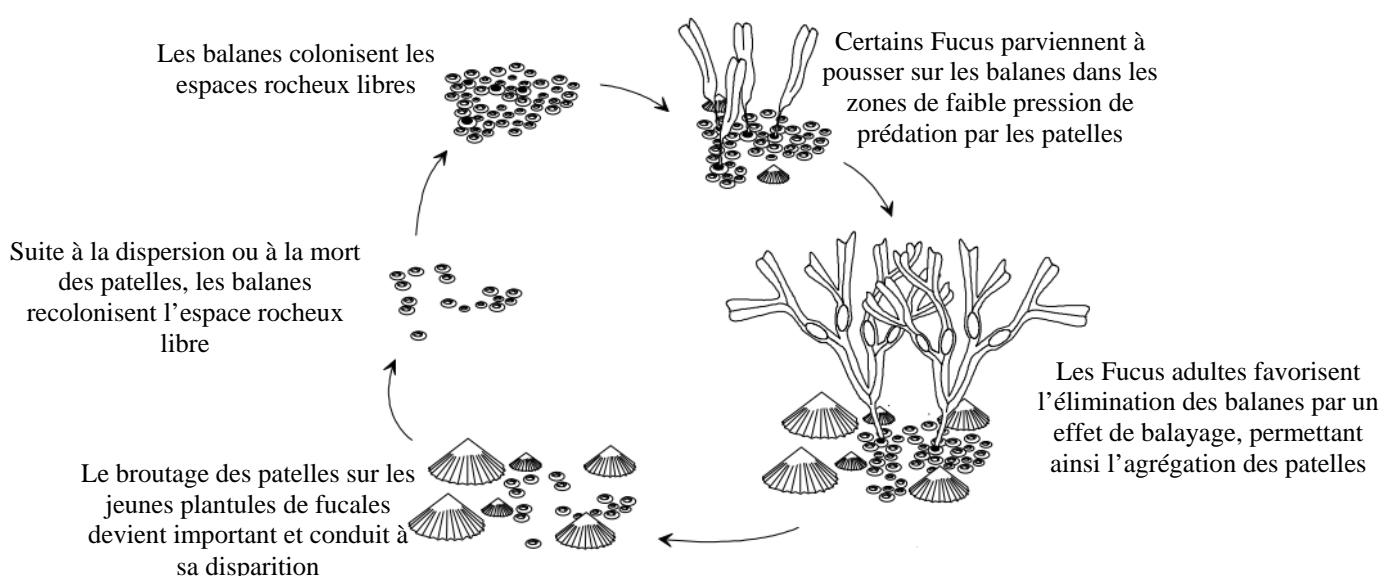


Figure 17 : Représentation de la succession des communautés colonisant tour à tour les substrats rocheux modérément exposés (schéma modifié d'après Hill et al., 1998)

Ce cycle permet d'expliquer la répartition hétérogène des fucales sur les estrans rocheux, observable à petite échelle. Néanmoins, un tel cycle n'explique pas la régression des fucales observée depuis une vingtaine d'années sur l'ensemble du littoral Breton.

3.4.2 Causes de la régression : les hypothèses

3.4.2.1 Cas de la mer Baltique

Le cas de la régression des fucales en mer Baltique a été très étudié. Les travaux de Vogt et Schramm (1991) ont montré une régression drastique de plus de 90 % des fucales en termes de biomasses en comparant les mesures de biomasse effectuées en 87/88 avec celles effectuées sur les mêmes sites en 50/51 par Hoffmann (1952). Les travaux de Kairesalo et Leskinen (1986), Kangas et al. (1982) et Rönnberg (1984) permettent de préciser d'avantage la période de régression qui semble débiter à la fin des années 70 / début des années 80. De nombreuses hypothèses de causalité ont été évoquées, allant de spécificités locales à des phénomènes plus généraux. Ainsi ont été évoqués la contamination infectieuse, la pollution par les hydrocarbures, la présence de glace sur le substrat rocheux durant les hivers rudes, le dépôt de matière sur les substrats durs du à l'érosion des falaises, la diminution de l'habitat colonisable par les fucales du fait du prélèvement des roches pour la construction, l'eutrophisation, la compétition entre plusieurs espèces d'algues et le broutage intensif par les gastéropodes. Toutes ces hypothèses ont été discutées par Vogt et Schramm (1991). Comme beaucoup de travaux concernant la mer Baltique, l'hypothèse de l'eutrophisation est ressortie comme étant la cause principale probable de la régression des fucales. En effet, l'augmentation de nutriments dans la colonne d'eau a conduit d'une part à un développement important des algues épiphytes responsables d'ombrage et d'autre part, à un accroissement de la densité phytoplanctonique diminuant la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. Néanmoins, la régression de fucales a également été observée dans les zones de la mer Baltique soumises à de faibles pollutions et apports anthropiques (Kautsky et al., 1986 ; Rönnberg and Mathiesen, 1998 ; Bäck et Ruuskanen, 2000), semblant indiquer que l'eutrophisation n'est pas seule responsable de la diminution de la ceinture de fucales d'autant plus qu'une augmentation des fucales a été récemment observée en mer Baltique, notamment sur les côtes du sud est de la Suède (Nilsson et al., 2004). De plus, Gail (1918) a mis en évidence que *Fucus evanescens* était capable de survivre sans aucune conséquence avec une quantité de lumière quatre fois moins importante qu'habituellement ce qui semble confirmer que la modification de la profondeur de pénétration de la lumière liée à l'eutrophisation ne peut pas être la seule cause de régression drastique des fucales. Les travaux récents de Nilsson et al. (2004) mettent en causes les conséquences du broutage d'*Idotea baltica*, isopode qui exerce une pression de broutage importante sur *Fucus* spp. De plus, ils mettent également en évidence des périodes d'évolution différentes de la ceinture de fucales à savoir une période d'augmentation durant les années 1985 à 1989 suivie d'une période de régression entre 1990 et 1996. Ces différences d'évolution ont été corroborées à l'évolution de l'indice hivernal de l'Oscillation Nord Atlantique qui mesure la différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression de l'Islande. Lorsque cet indice est faible (hiver froid et sec), il favorise le développement algal et lorsqu'il est élevé (hiver chaud et humide), il favorise le développement d'*I. baltica*.

3.4.2.2 Cas de l'Atlantique nord-est

Tout comme en mer Baltique, la régression des fucales en Atlantique nord-est semble avoir débuté au début des années 80 (Le Roux, 2005). De nombreuses causes ont été suggérées pour expliquer la régression des fucales sur les côtes de l'Atlantique nord-est. Elles ont été récapitulées par Le Roux (2005) évoquant entre autres :

- (1) un possible changement de l'hydrodynamisme conduisant à un arrachage plus efficace suivi d'un établissement plus difficile des fucales sur les estrans rocheux. Ce paramètre a été examiné par Davies et al. (2007) qui n'a mis en évidence aucun changement hydrodynamique notable sur les côtes Irlandaise. Une étude de l'évolution temporelle de la houle a également été faite pour les côtes bretonnes et corrobore les résultats de Davies (S. Ballu, comm. pers.),
- (2) un réchauffement de la masse d'eau a également été évoqué, réchauffement qui favoriserait le recrutement des patelles. En effet, les travaux de Bowman et Lewis (1986) montre que la période de ponte des patelles se situe autour de mois d'octobre au sud de l'Angleterre. Il est de ce fait envisageable que des hivers plus chauds favorisent une survie plus importante des larves de patelles. En revanche des hivers plus chauds semblent défavoriser les fucales. En effet, les travaux de Coleman et al. (2006) montrent que le climat a une importance sur le développement des fucales en faisant une étude comparative de l'effet du retrait des patelles au Portugal et à l'Ile de Man. En effet, les résultats montrent que le retrait des patelles sur l'Ile de Man laisse place à une canopée en pleine expansion alors qu'il n'y a aucun effet notoire du retrait des patelles sur les côtes Portugaises. Les températures plus chaudes sont donc nuisibles au développement des fucales.
- (3) une meilleure survie des larves de patelles due à l'augmentation des sels nutritifs dans la colonne d'eau,
- (4) une compétition pour l'espace entre les huîtres et les fucales qui colonisent le même type de substrat. Néanmoins, ce phénomène de compétition n'est que local et ne s'applique pas à l'ensemble des côtes bretonnes
- (5) d'autres éléments qui interviennent de façon plus discrètes mais qui peuvent avoir d'importantes répercussions comme une diminution de la prédation des patelles par l'homme ou une diminution du biofilm microphytobenthique dont se nourrissent les patelles et qui entraînerait une augmentation de la pression de broutage sur les macroalgues.

Quelle que soit l'étude considérée pour l'Atlantique nord-est, le broutage intensif semble la cause prédominante du retrait des fucales dans cette zone géographique (Davies et al., 2007 ; Le Roux, 2008 ; Madic et Madic, 2005).

3.4.2.3 Cas de l'Atlantique nord-Ouest

Sur la côte canadienne, un phénomène différent a lieu. En effet, il a été observé un jaunissement suivi de la mort prématurée de la ceinture d'*Ascophyllum nodosum* (MacKenzie, 2002) due à un manque de nutriment. Ce phénomène, encore peu décrit dans la littérature, est nommé pseudo-eutrophisation. Les conséquences visibles de ce phénomène sont les mêmes que celles de l'eutrophisation, à savoir un développement important d'algues vertes opportunistes. Les causes ne sont néanmoins pas les mêmes. Dans le cas de l'eutrophisation,

ce développement algal est la conséquence d'un enrichissement des eaux en nutriments. Dans le cas de la pseudo-eutrophisation, le développement algal est dû à la disparition des gastéropodes brouteurs, consommateurs de ces algues. Les algues non consommées poursuivent leur développement, épuisant les ressources nutritives habituellement allouées aux fucales. Il en résulte un appauvrissement important des eaux, appauvrissement qui devient défavorable aux algues pérennes qui se trouvent en détresse nutritive et meurent.

3.4.3 Apport des résultats obtenus pour les côtes Bretonnes

Les résultats présentés dans ce rapport montrent une évolution comparable sur l'ensemble des côtes bretonnes avec une régression des fucales entre 1987 et 2004 suivie d'une augmentation entre 2004 et 2007. Le broutage des patelles semblant être une cause prédominante du recul des fucales en Bretagne, ce premier facteur a été analysé. Le contrôle de la ceinture de fucales par les patelles est un phénomène connu depuis la fin des années 40. Fisher-Piette (1948) a montré que les patelles avaient la capacité de brouter les macroalgues composant la ceinture de Fucales. Malgré le fait que les fucales constituent une barrière naturelle à l'établissement des larves de patelles (Jones, 1948), il est probable que les vésicules d'*Ascophyllum nodosum* et de *Fucus vesiculosus* leur permettent de flotter à marée haute induisant le dégagement des surfaces rocheuses sous-jacentes et la colonisation potentielle de cet espace par les larves de patelles (Jenkins et Hawkins, 2003). Cela expliquerait d'ailleurs le fait que ce sont ces deux espèces algales qui sont le plus touché par le broutage des patelles. L'action des patelles sur la disparition de la ceinture de fucales a été mise en évidence par les travaux de Jones (1948) et de Lodge (1948), sur l'Ile de Man, Royaume-Uni. Hartnoll et Hawkins (1985) ont montré qu'une densité de patelles de 7 ind.m⁻² empêchait la colonisation de 25 % du substrat rocheux contre 75 % avec une densité de 20 ind.m⁻². Les récentes estimations faites en Bretagne sud par Le Roux (2008) ont montré des densités comprises entre 100 et 600 individus/m². Le Ceva a également procédé à des estimations de densités en Bretagne nord (Santec) en 2009 et les mesures montrent une densité moyenne de plus de 100 individus/m² (CEVA, comm. pers.). Cela confirme une pression de broutage suffisante pour supprimer la ceinture de fucales. De plus, les patelles forment des fronts d'attaque particulièrement efficaces pour éradiquer les fucales même si une telle organisation permet en premier lieu aux patelles de se préserver des prédateurs, d'être protégées face aux contraintes physiques telles que les vagues et d'augmenter leur succès reproductif notamment en automne hiver (Coleman et al., 1999).



Photo 1 : Illustration des fronts de patelles s'attaquant à la ceinture d'*Ascophyllum nodosum* sur l'île d'Er, Côtes d'Armor, Bretagne (photos CEVA)

Néanmoins, le broutage des patelles à lui seul ne permet pas d'expliquer l'évolution temporelle de régression puis de recolonisation du substrat rocheux par les fucales qui s'observe à travers les analyses des images SPOT et qui est confirmé par l'analyse de zones plus ciblées à partir de photographies aériennes historiques. A partir des photographies aériennes historiques (Photo 2), l'analyse de zones plus restreintes montre que la ceinture de fucales se développe entre 1952 et 1966 et régresse entre 1988 et 2000 avant d'augmenter entre 2000 et 2008. Ces périodes recoupent celles mises en évidence par le traitement des images SPOT.

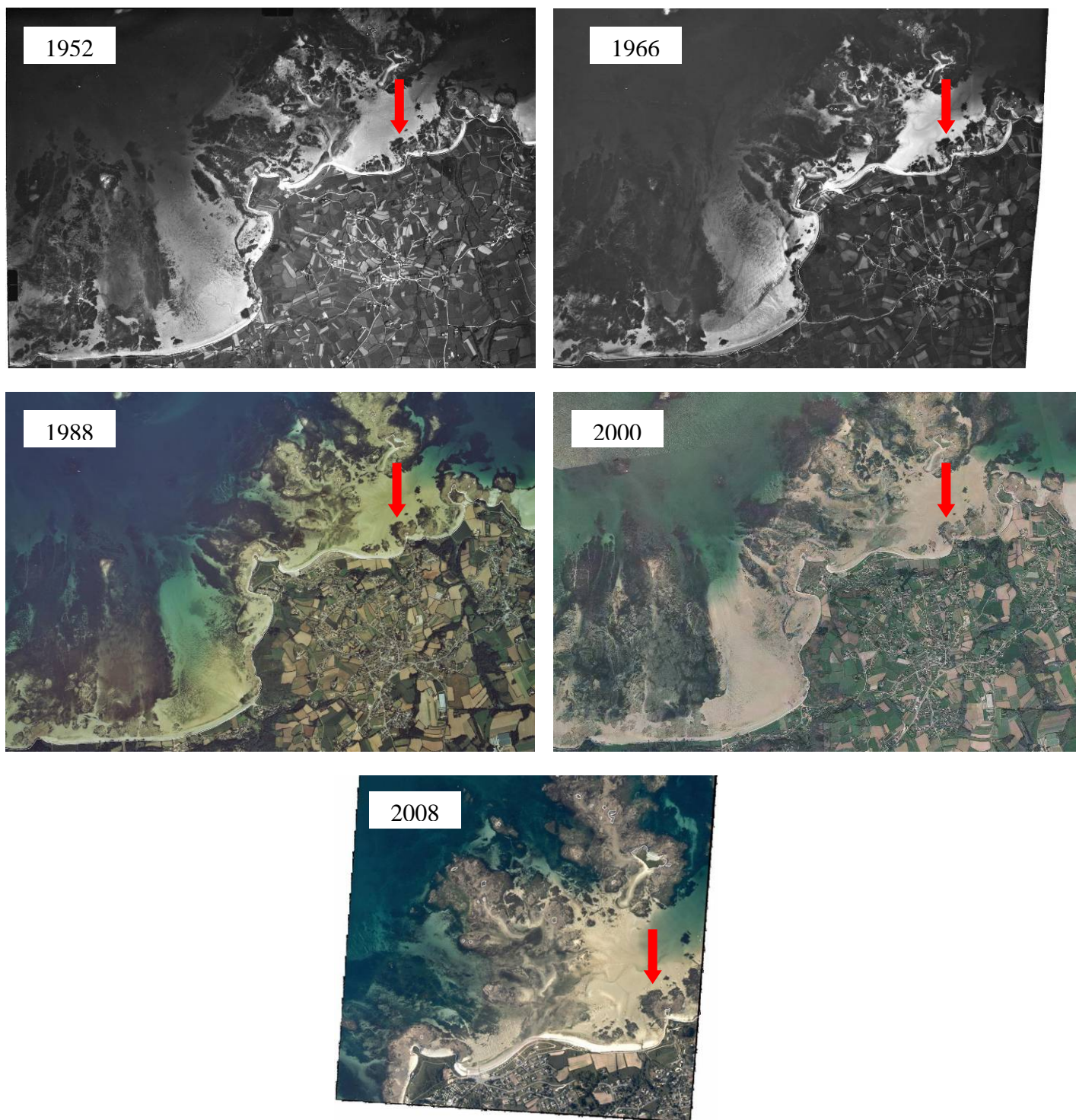


Photo 2 : Exemple d'évolution temporelle à partir d'images aériennes de la ceinture de fucales entre 1952 et 2008 au niveau de Keriec, Côtes d'Armor, Bretagne. Les photographies ont été fournies par l'IGN (Institut National Géographique). Au niveau du platier rocheux signalé par la flèche, une augmentation de la couverture en fucales est observée entre 1952 et 1966. Une régression a lieu entre 1988 et 2000 alors que la couverture algale se développe à nouveau entre 2000 et 2008

Pour expliquer de telles fluctuations à une échelle globale (rappelons que les différentes évolutions temporelles des fucales sont corroborées pour l'ensemble de la façade nord est Atlantique), il faut se tourner vers une hypothèse incluant un phénomène climatique global.

Comme il a été vu précédemment, les patelles et les fucales dépendent de la température de l'eau, les premières étant favorisées par des températures plus chaudes et les secondes par des températures plus froides, notamment en hiver. Les plantules nouvellement germées de *Fucus* spp. ont un potentiel supérieur de croissance à 7°C qu'à 17°C, une température de 7°C étant représentative de la période du début de l'année, au moment où elles sont produites (Steen, 2004). L'indice hivernal de l'oscillation nord atlantique (NAO) est un bon indicateur pour définir le régime hivernal, à savoir que lorsque cet indice est positif, l'hiver est chaud et humide. A l'inverse, un hiver froid et sec se caractérise par un indice négatif. L'analyse de l'évolution de cet indice depuis 1950 jusqu'à 2009 (Figure 18) montre qu'une période de NAO positif s'est initiée dans les années 70 pour s'intensifier à partir des années 80, années pendant lesquels les premières régressions de fucales ont été répertoriées. Récemment, une période de NAO négatif a eu lieu entre 2004 et 2006, période qui coïncide avec la période d'augmentation de la ceinture de fucales observée en Bretagne. A cela s'ajoutent des données historiques indiquant que les patelles sont sensibles à la variation de l'oscillation nord Atlantique en mettant en évidence une diminution des patelles dans les années 60-70 et leur augmentation au cours des années 80 (Hill et al., 1998). Il apparaît donc que les périodes favorables au développement des fucales et celles favorables au développement des patelles s'opposent et sont influencées par l'Oscillation Nord Atlantique, principalement durant la période hivernale. Concernant les côtes bretonnes, une autre problématique est à considérer à savoir la compétition printanière qu'il peut y avoir entre le développement des plantules de fucales et le développement des algues vertes opportunistes. Les hivers plus chauds (en période de NOA positif) pourraient être favorables à la fois au développement et au recrutement des larves de patelles mais aussi au développement précoce des algues vertes opportunistes qui constituent un compétiteur redoutable pour les fucales en termes d'espace colonisable et de ressources nutritives (dans une moindre mesure pour le nord est de l'Atlantique). Une telle compétition a été mise en évidence dans les travaux de Steen (2004) entre deux espèces de *Fucus* (*Fucus serratus* et *Fucus evanescens*) et *Enteromorpha compressa*.

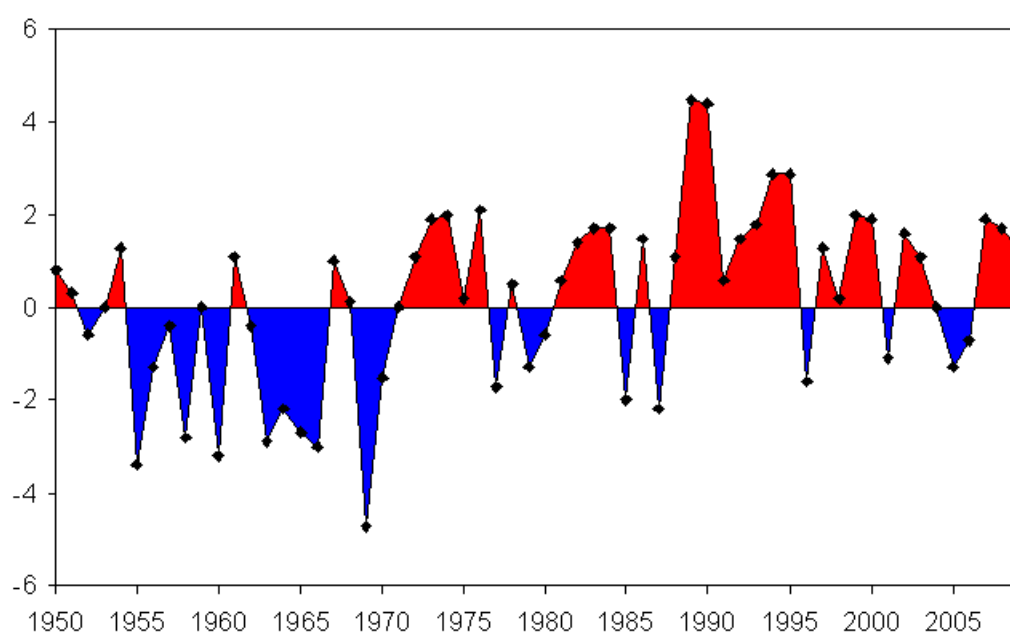


Figure 18 : Evolution de l'indice hivernal de l'Oscillation Nord Atlantique entre 1950 et 2009. Les données sont issues de the Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Hurrell (1995)

L'importance des grands phénomènes climatiques a déjà été mise en évidence dans d'autres régions du monde et notamment en Australie où la forêt de *Macrocystis pyrifera* a décliné depuis les années 80 du fait du phénomène climatique ENSO, les périodes de déclin correspondant aux périodes El Niño (Edyvane, 2003).

Même si l'Oscillation Nord Atlantique semble influencer l'évolution globale des fucales, il faut rester vigilant quant à l'échelle d'observation à laquelle on se référence. Ainsi, localement, des évolutions inverses peuvent être observées, de nombreux facteurs entrant en jeu dans la répartition des fucales à plus petite échelle (i.e. envahisseurs, contaminations chimiques, physico-chimie particulière de l'eau à l'échelle locale, hydrodynamisme spécifique amenant à un ensablement périodique du substrat rocheux...). Ainsi, les phénomènes climatiques globaux vont intervenir préférentiellement sur l'une ou l'autre des phases du cycle de succession des communautés benthiques sur les estrans rocheux, l'oscillation nord atlantique en phase négative induisant le recrutement des fucales, les patelles étant favorisées en phase positive de l'oscillation nord atlantique. En parallèle, chacune des populations est elle-même soumise à des contraintes biologiques, écologiques, écophysiologiques et physico-chimiques (Figure 19).

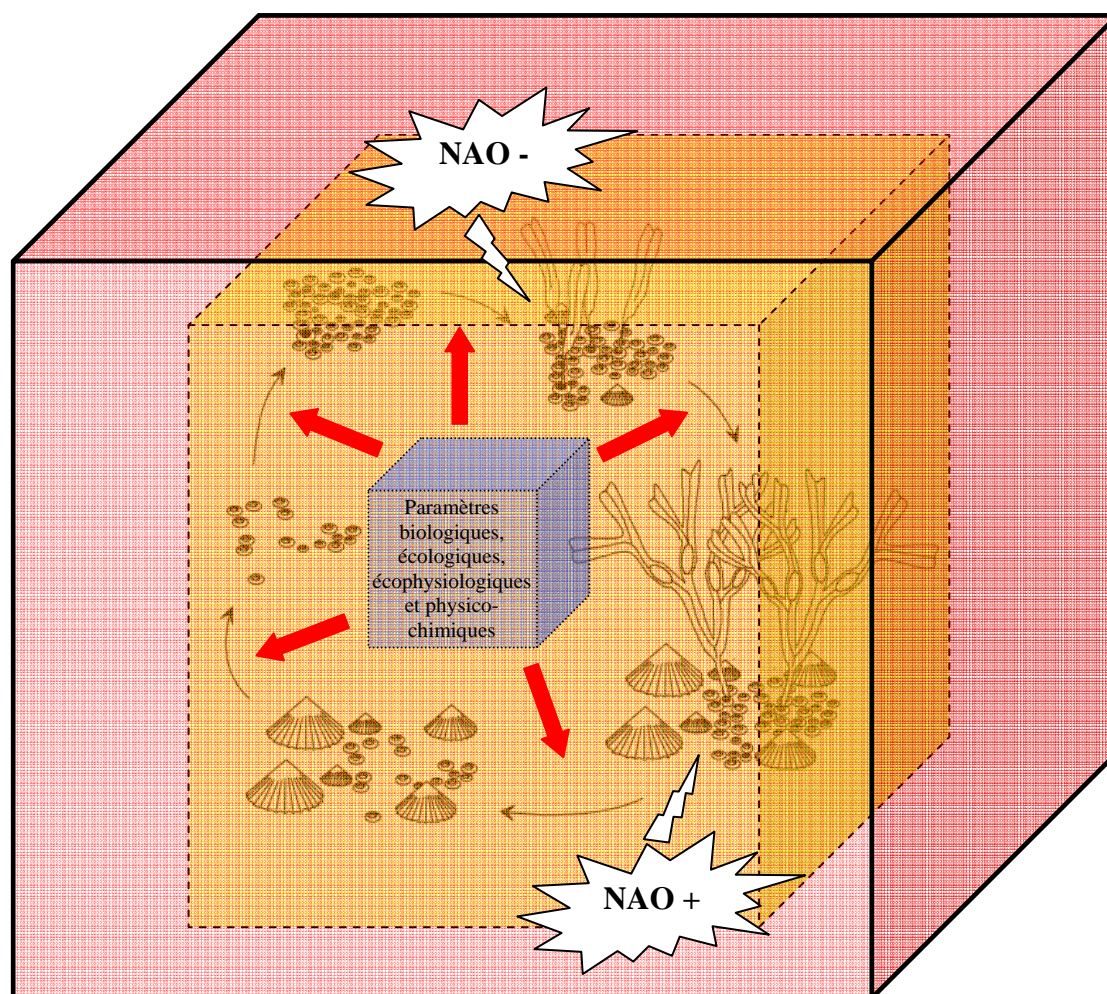


Figure 19 : Schéma récapitulatif des différentes paramètres agissant sur la succession des communautés des estrans rocheux en passant de l'échelle globale (cube rose), à l'échelle locale (cube orange) puis à l'échelle individuelle (cube bleu)

4 CONCLUSION

A l'échelle de la Bretagne, il apparaît que les fucales ont globalement régressé durant ces trente dernières années. La cause globale sur l'ensemble de la façade nord est Atlantique semble être des hivers généralement plus chauds qui favorisent le développement des patelles et des algues vertes opportunistes et qui constituent pour les premières, un prédateur redoutable et pour les secondes, un compétiteur pour l'espace de colonisation et la disponibilité des nutriments vis-à-vis des fucales (dans une moindre mesure concernant le nord est de l'Atlantique). Les conditions hivernales sont dépendantes de l'Oscillation Nord Atlantique ce qui rend le phénomène de régression réversible comme durant la période de 2004 à 2007. Néanmoins, les aires de recouvrement des fucales restent bien en deçà de celles calculées à partir des premières images SPOT disponibles. De plus, à des échelles locales, la combinaison de plusieurs facteurs défavorables à la recolonisation des fucales amène à des régressions beaucoup plus drastiques que celles évaluées à l'échelle des masses d'eau. A cela s'ajoute le changement global qui pourrait augmenter l'effet « hiver chaud » Induit par l'Oscillation Nord Atlantique. Il est donc important de poursuivre l'étude de l'évolution des fucales à l'échelle de la Bretagne. Un complément d'étude à l'échelle locale pourrait permettre une évaluation plus précise de la contribution du facteur global NAO par rapport à la contribution de perturbations locales.

Bibliographie

Bäck S. et Ruuskanen A. 2000. Distribution and maximum growth depth of *Fucus vesiculosus* along the Gulf of Finland. *Marine Biology* **136**: 303-307.

Bowman R.S. et Lewis J.R. 1986. Geographical variation in the breeding cycles and recruitment of *Patella* spp. *Hydrobiologia* **142**: 41-56.

Coleman R. A., Goss-Custard J.D., Le Vavas seur dit Durell S. et Hawkins S.J. 1999. Limpet *Patella* spp. Consumption by oystercatchers *Haematopus ostralegus* : a preference for solitary prey items. *Marine Ecology Progress Series* **183**: 253-261.

Coleman R. A., Underwood A.J., Benedetti-Cecchi L., Åberg P., Arenas F., Arrontes J., Castro J., Hartnoll R.G., Jenkins S.R., Paula J., Della Santina P. et Hawkins S.J. 2006. A continental scale evaluation of the role of limpet grazing on rocky shores. *Oecologia* **147**: 556-564.

Davies A.J., Johnson M.P. et Maggs C.A. 2007. Limpet grazing and loss of *Ascophyllum nodosum* canopies on decadal time scales. *Marine ecology Progress Series* **339**: 131-141.

Edyvane K. 2003. Conservation, monitoring and recovery of Threatened Giant Kelp (*Macrocystis pyrifera*) beds in Tasmania. *Final Report, Natural Heritage Trust project final report to Environment Australia*, Published by Department of Primary Industries, Water and Environment, Hobart.

Fisher-Piette, E. 1948. Sur les éléments de prospérité des patelles et sur leur spécificité. *Journal de Conchyliologie* **88** : 45-96.

Gail F.W. 1918. Some experiments with *Fucus* to determine the factors controlling its vertical distribution. *Publications Puget Sound Biological Station* 2: 139-151.

Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2010. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>.

Hartnoll, R. G. et Hawkins S. J. 1985. Patchiness and fluctuations on moderately exposed rocky shores. *Ophelia* **24**:53–64

Hill S., Burrows M.T. and Hawkins S.J. 1998. Intertidal Reef Biotopes (volume VI). An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs. Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project). 84 p.

Hoffmann C. 1952. Über das Vorkommen und die Menge industriell verwertbarer algen an der ostküste Schleswig-Holsteins. *Kieler Meeresforschung* **9**: 5-14.

Hurrell J.W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science* **269**: 676-679.

Jenkins S.R. and Hawkins S.J. 2003. Barnacle larval supply to sheltered rocky shores: a limiting factor? *Hydrobiologia* **503**: 143-151.

Jones N.S. 1948. Observations and experiments on the biology of *Patella vulgata* at port St. Mary, Isle of Man. *Proceedings and Transactions of the Liverpool Biological Society* **56**: 60-78.

Kairesalo T. et Leskinen E. 1986. Measurements of metabolic activities within a Baltic *Fucus vesiculosus* community: the contribution of fouling microalgae and grazers In: Evans, L.V. & Hoagland, K.D. (eds.), *Algal Biofouling*: 301–312. Elsevier, Amsterdam.

Kangas P., Autio H., Hällfors G., Luther H., Niemi A. et Salemaa H. 1982. A general model of the decline of *Fucus vesiculosus* at Tvärminne, south coast of Finland in 1977-81. *Acta Botanica Fennica* **118**: 1-27.

Kautsky N., Kautsky H., Kautsky U., Waern M. 1986. Decreased depth penetration of *Fucus vesiculosus* (L.) since 1940s indicates eutrophication of the Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series* **28**: 1-8.

Le Roux A. 2005. Les patelles et la regression des algues brunes dans le Morbihan. *Penn Ar Bed* **192**: 1-22.

Le Roux A. 2008. The fucacean canopy of the rocky shores in the Golfe du Morbihan (south Brittany, France) is actively browsed by limpets (*Patella vulgata* L.) except in its eastern and its estuarine parts. *Bulletin de la société des sciences naturelles de l'Ouest de la France* **30**: 162-180.

Lodge S.M. 1948. Algal growth in the absence of patella on an experimental strip of foreshore, Port St. Mary, Isle of Man. *Proceedings and Transactions of the Liverpool Biological Society* **56**: 78-85.

MacKenzie D. 2002. Dying seaweed in Atlantic Canada reflects nutrient depletion of seawater. <http://www.fisherycrisis.com/seaweed4.html>

Madic F. et Madic F. 2005. La régression des algues brunes en Finistère Sud. Exemple de la crique de Portec et de ses environs. *Penn Ar Bed* **192** : 23-35.

Mouquet P., Perrot T., Daniel C. et Le Goff T. 2006. Cartographie de la couverture de fucales en zone intertidale. Région Bretagne. Zone pointe Saint Mathieu-Plouguerneau, Image SPOT du 12 août 2006. Edition finale 2006. REBENT. 31 p

Nilsson J., Engkvist R. et Persson L.-E. 2004. Long-term decline and recent recovery of *Fucus* populations along rocky shores of southeast Sweden, Baltic Sea. *Aquatic Ecology* **38**: 587-598.

Perrot T., Mouquet P. et Daniel C. 2008. Suivi de la couverture en macroalgues intertidales de substrats durs dans le cadre du contrôle de surveillance DCE au titre de l'année 2008. REBENT-Edition finale 2008. 146 p.

Rönnerberg O. 1984. Recent changes in the distribution of *Fucus vesiculosus* L. around the Åland Islands (N Baltic). *Ophelia Suppl.* **3**: 189-193.

Rönnerberg O. et Mathiesen L. 1998. Long-term changes in the marine macroalgae of Lågskär, Åland Sea (N Baltic). *Nordic Journal of Botany* **18**: 379-384.

Steen H. 2004. Interspecific competition between *Enteromorpha* (Ulvales: Chlorophyceae) and *Fucus* (Fuciales: Phaeophyceae) germlings: effects of nutrient concentration, temperature, and settlement density. *Marine Ecology Progress Series* **278**: 89-101.

Torn K., Krause-Jensen D., Martin G. 2006. Present and past depth distribution of bladderwrack (*Fucus vesiculosus*) in the Baltic Sea. *Aquatic Botany* **84**: 53-62.

Vogt H et Schramm W. 1991. Conspicuous decline of *Fucus* in kiel Bay (Western Baltic): what are the causes? *Marine Ecology Progress Series* **69**: 189-194.

ANNEXES

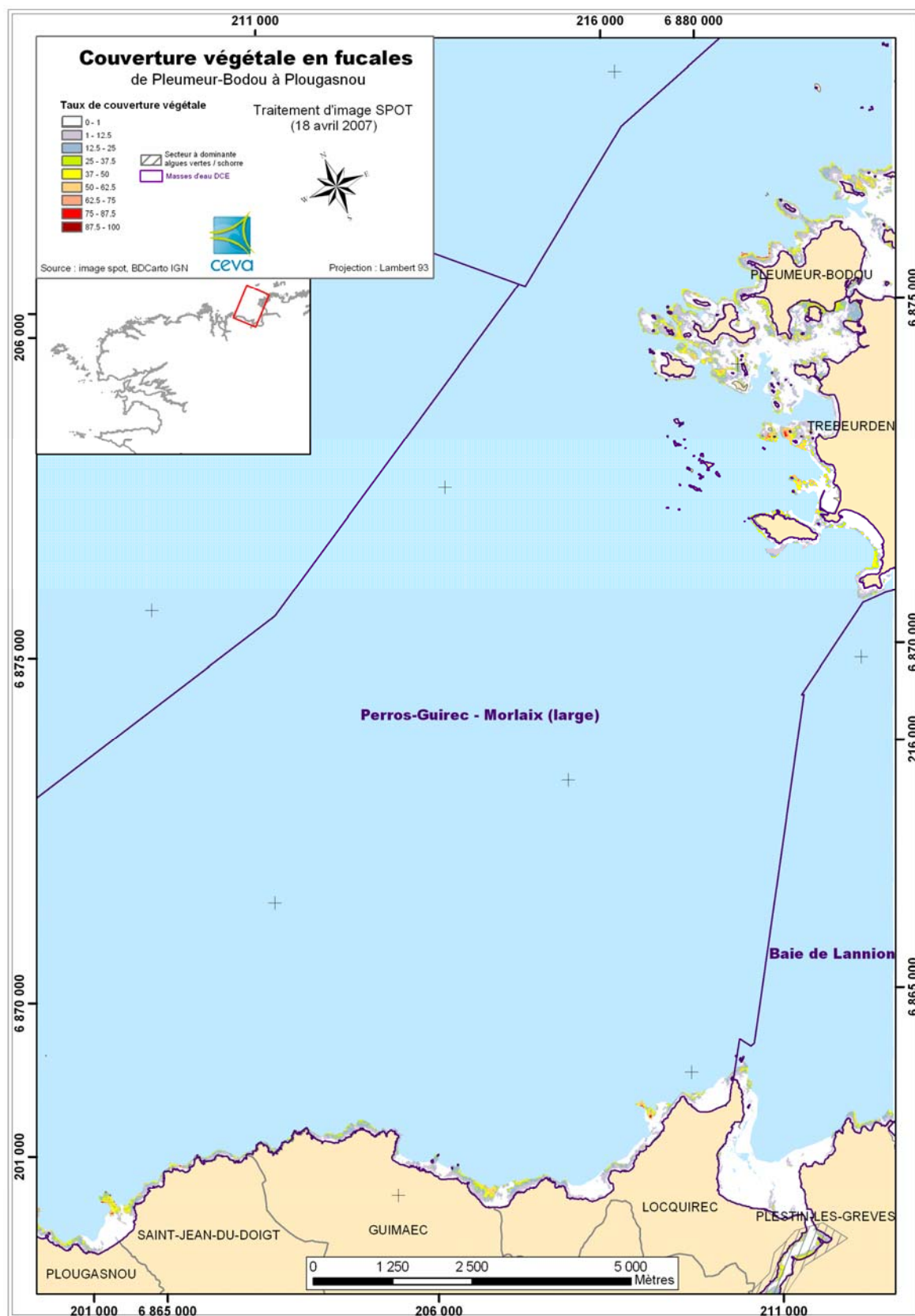
ANNEXE 1

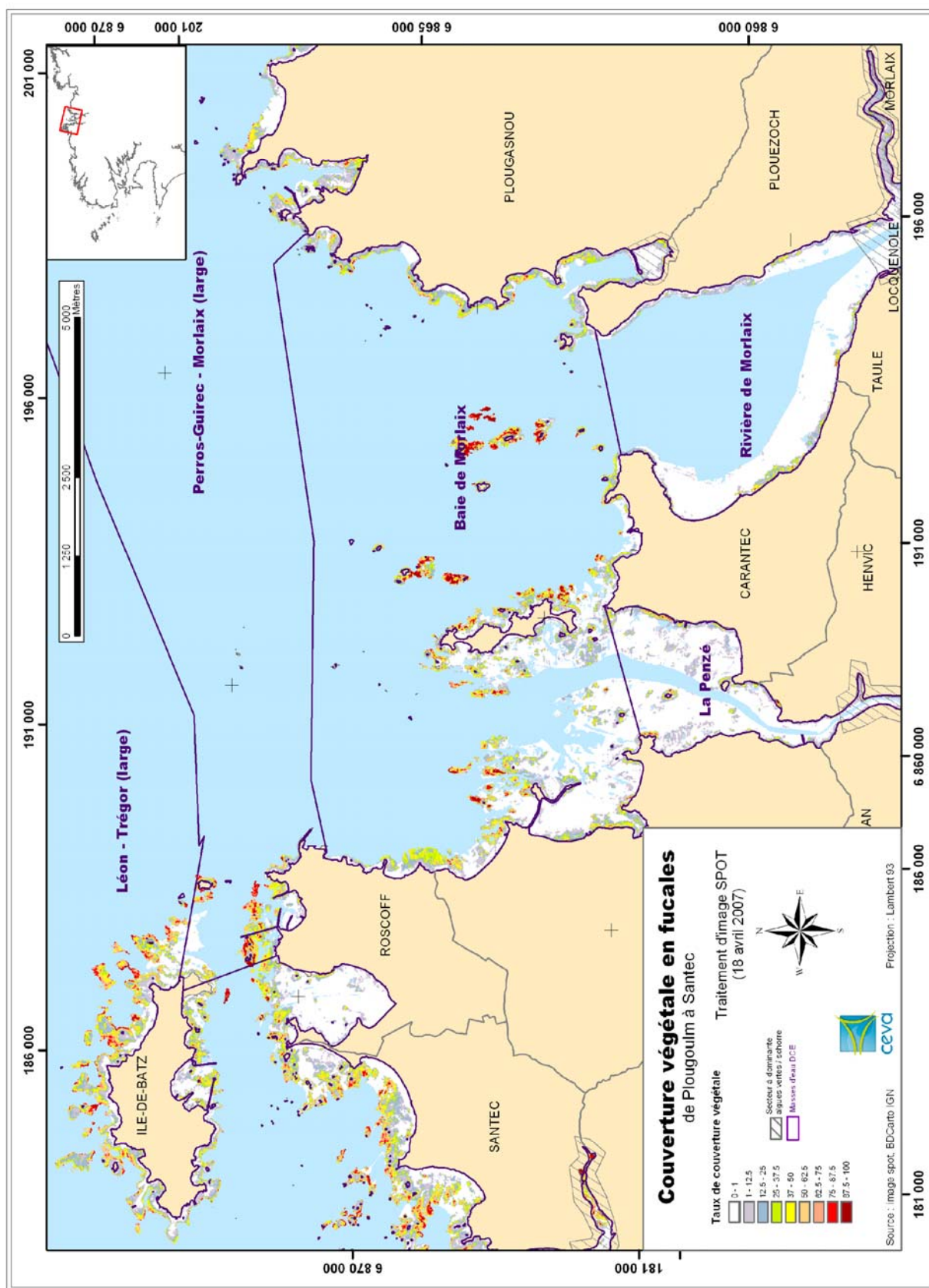
CARTES DE COUVERTURE EN FUCALES

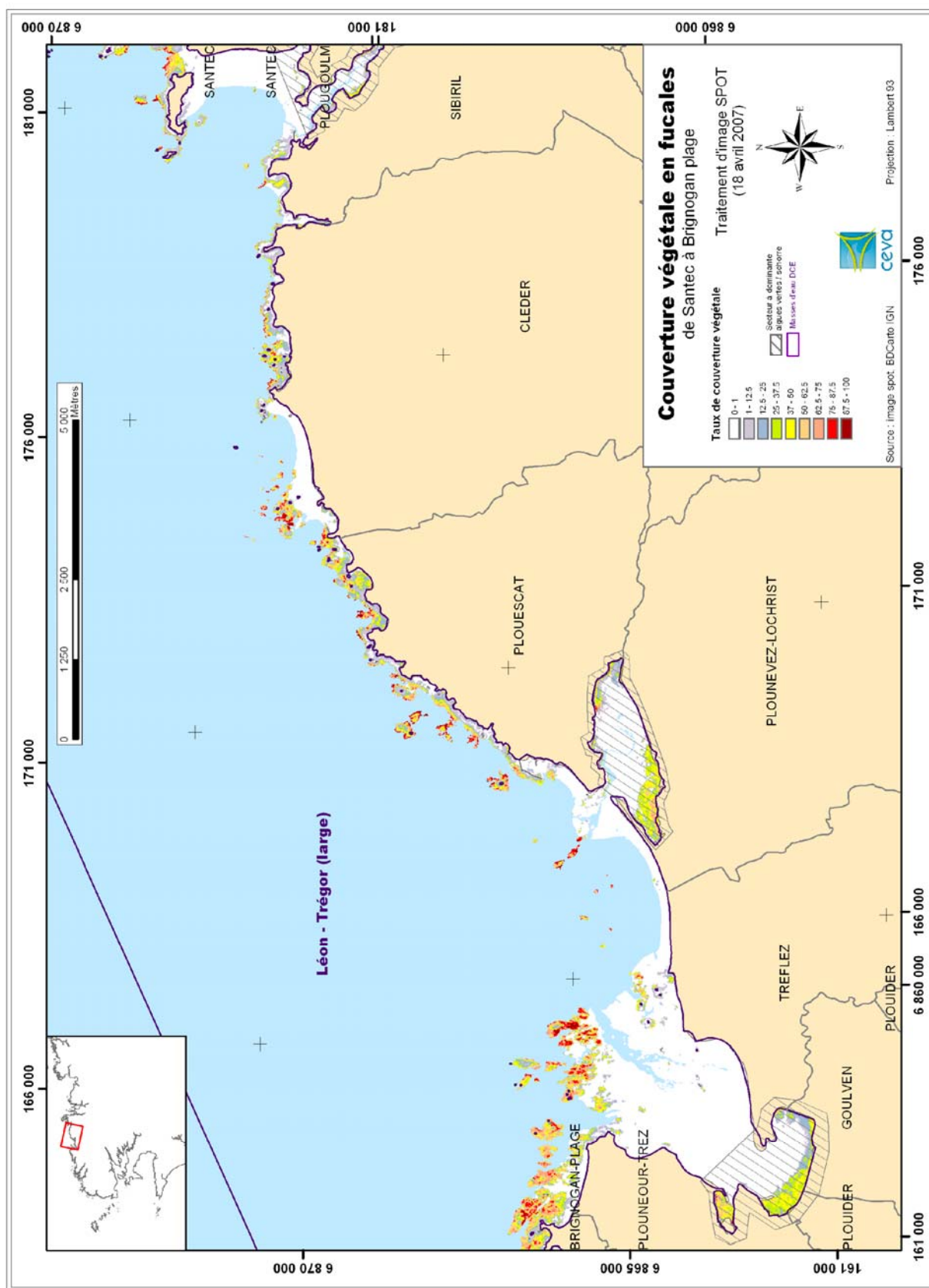
ZONE

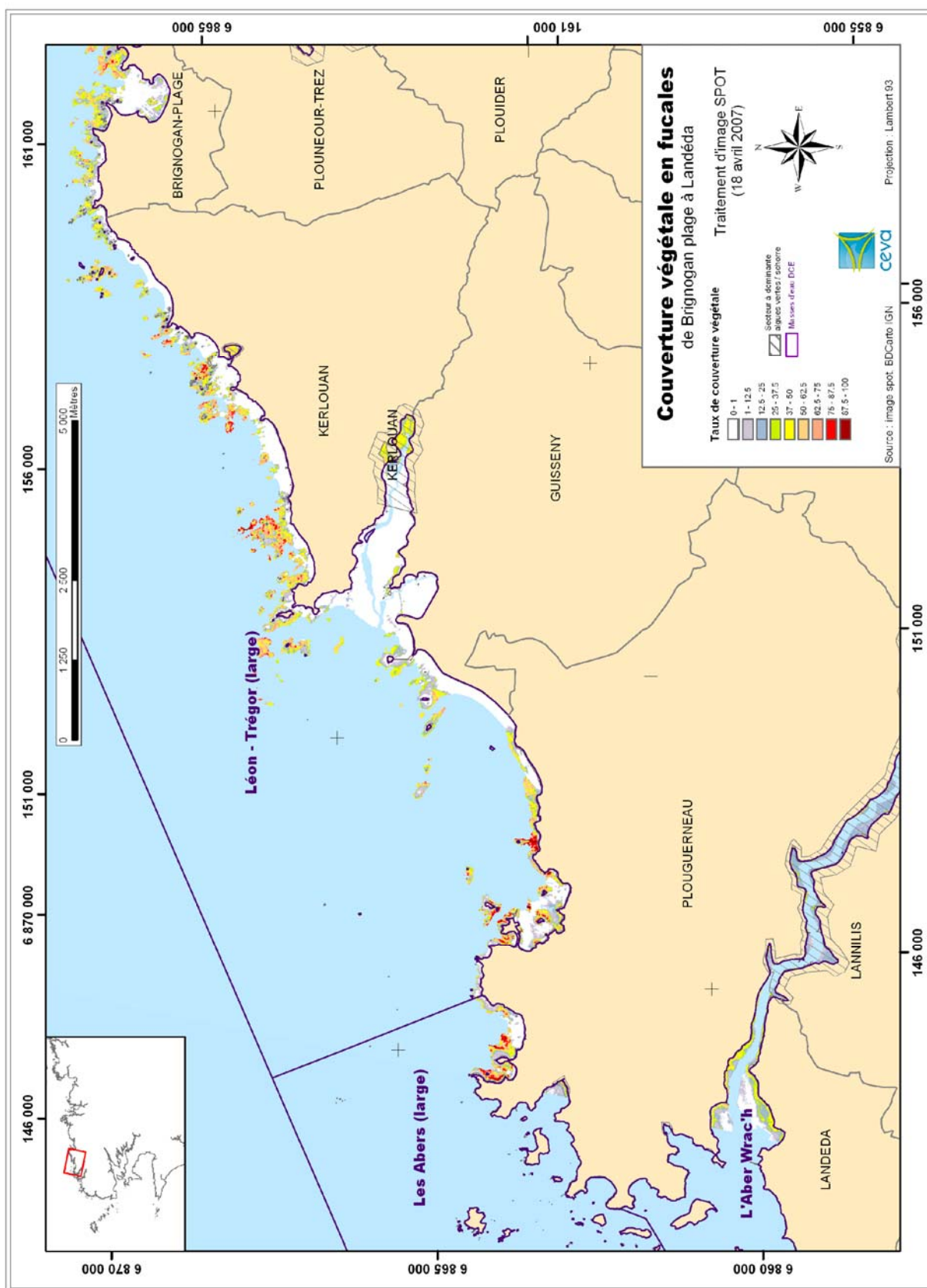
**LEON-TREGOR LARGE + PERROS GUIREC-MORLAIX LARGE + LA
PENZE + RIVIERE DE MORLAIX**

IMAGE SPOT DU 18 AVRIL 2007









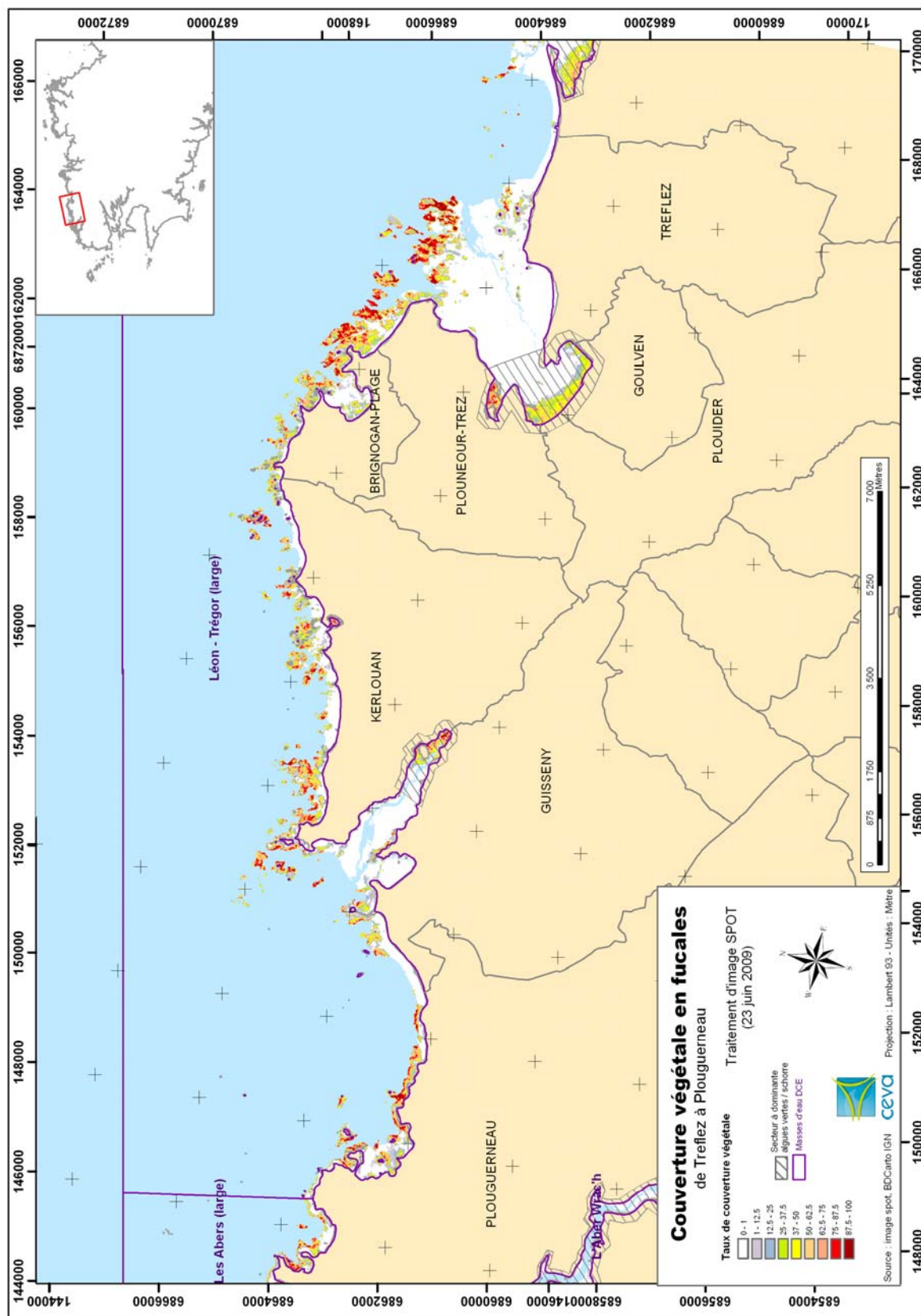
ANNEXE 2

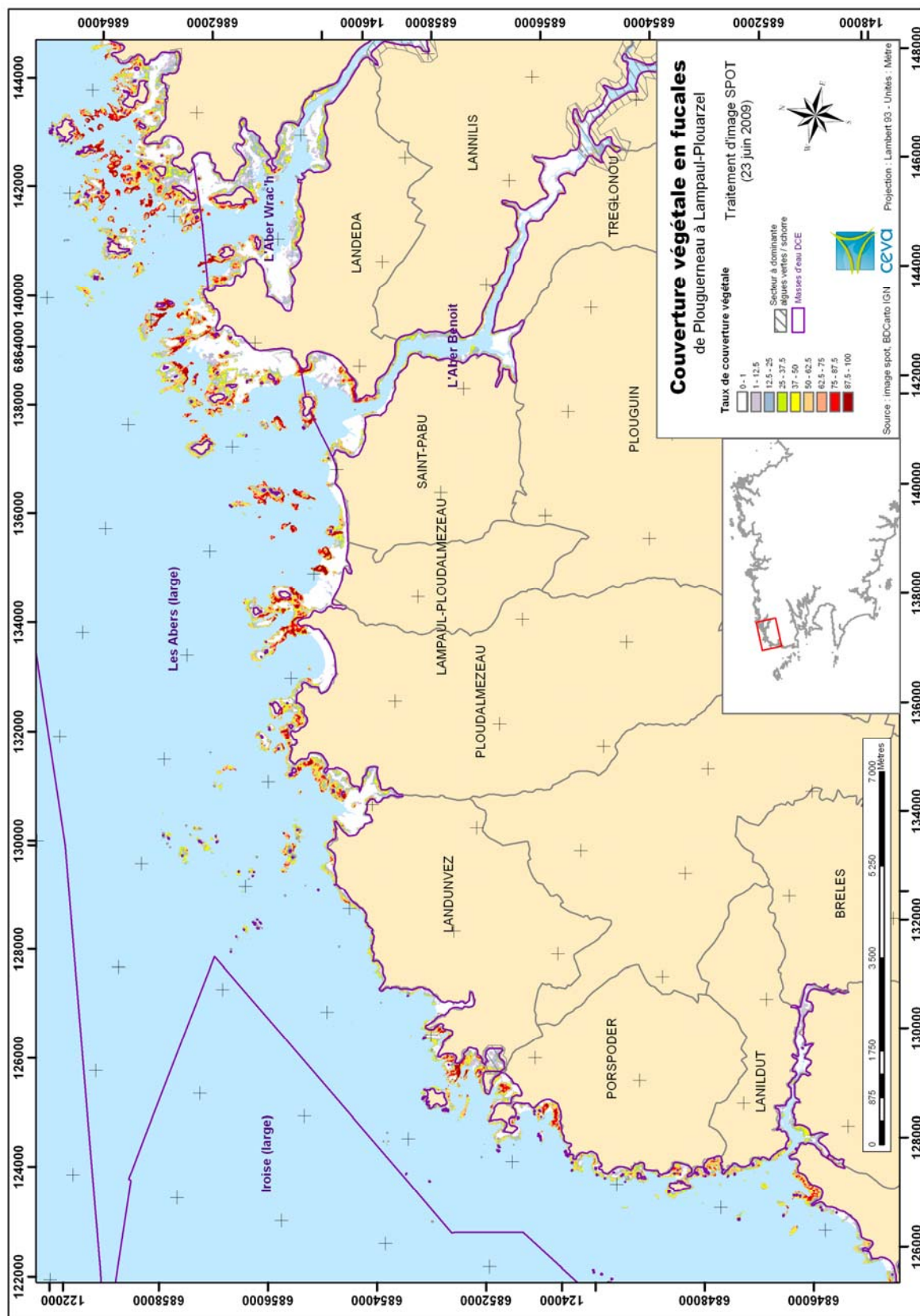
CARTES DE COUVERTURE EN FUCALES

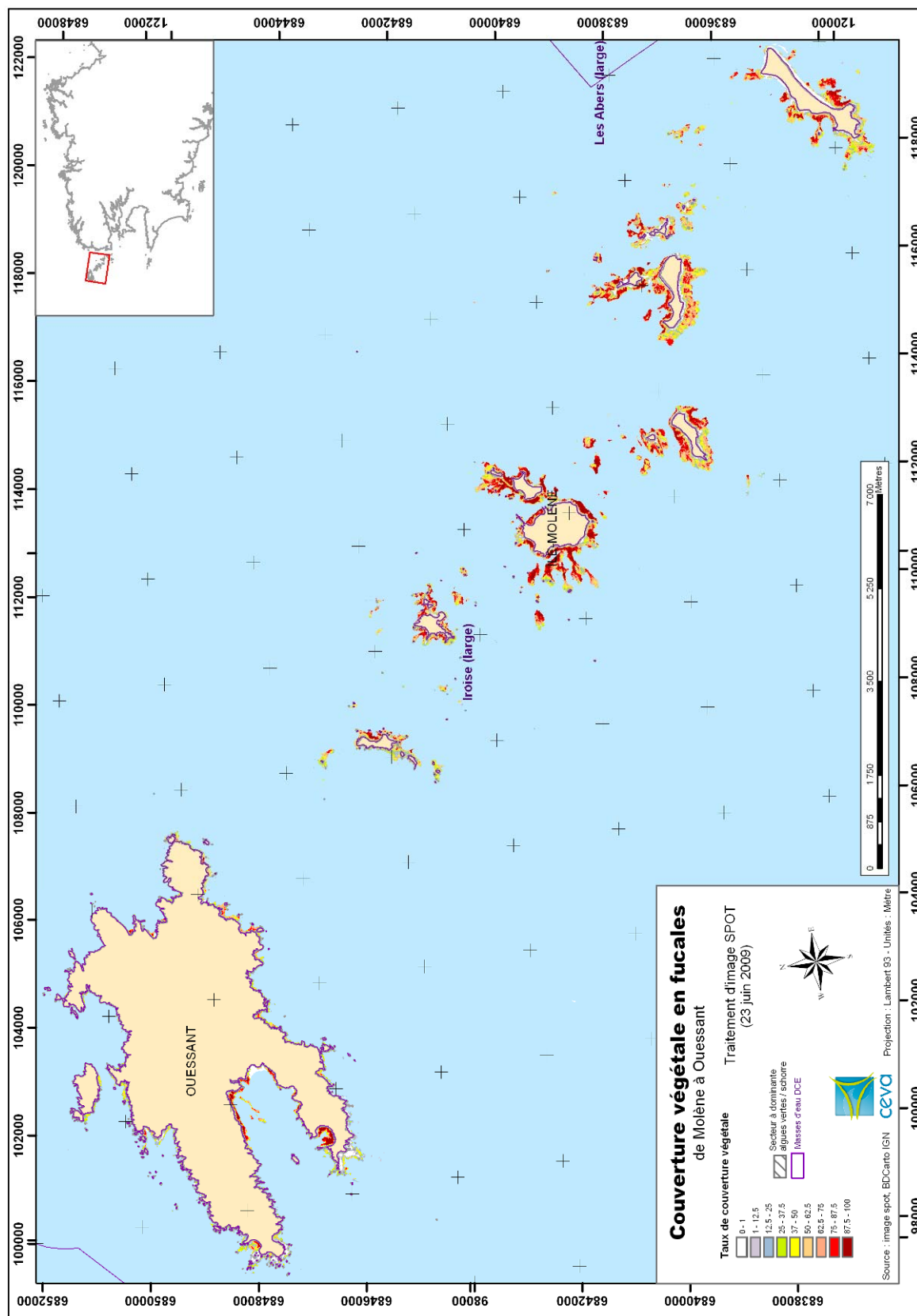
ZONE

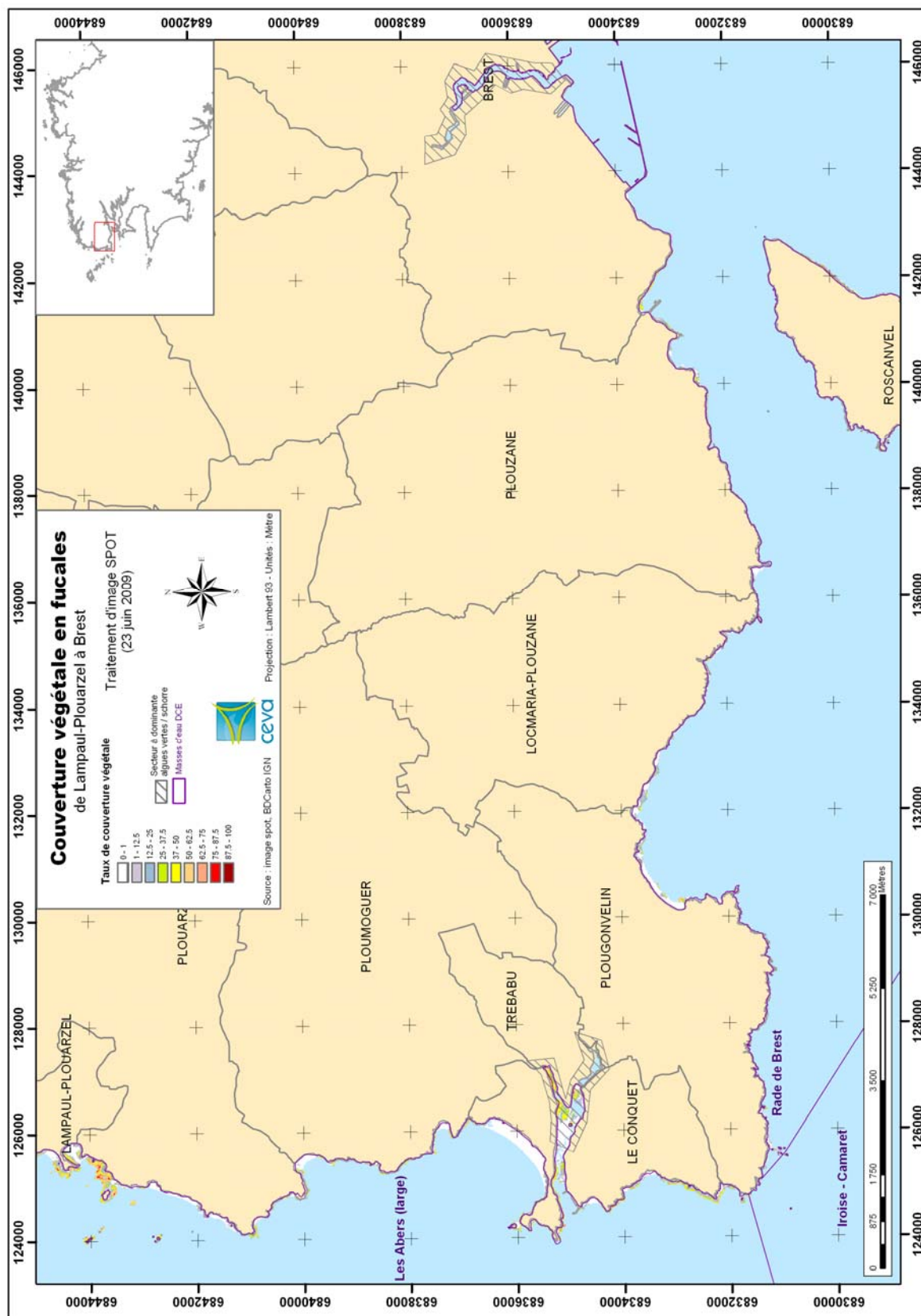
**LEON LARGE + LES ABERS COTE ET LARGE + IROISE CAMARET ET
LARGE + RADE DE BREST + BAIE DE DOUARNENEZ**

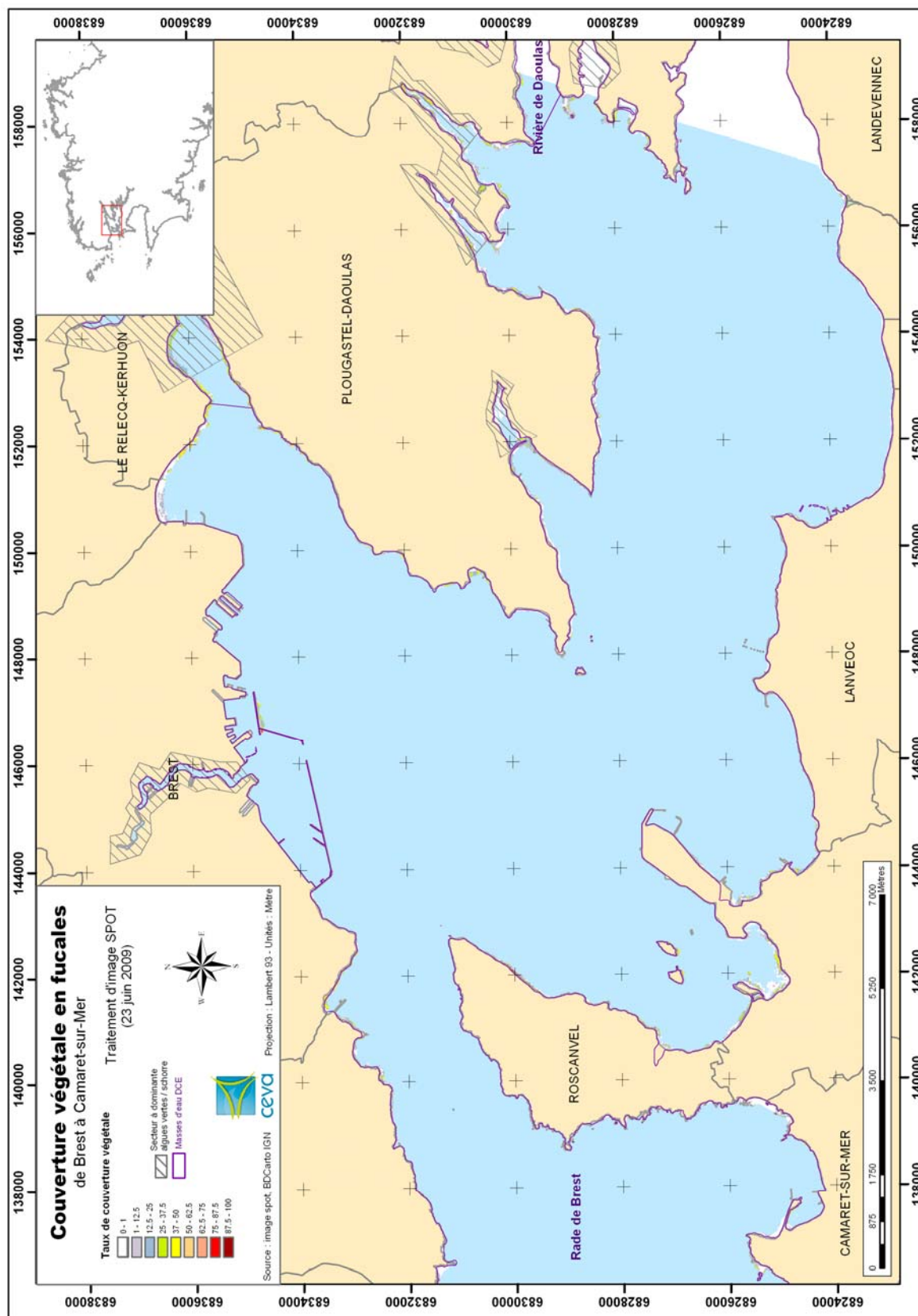
IMAGE SPOT DU 26 JUIN 2009

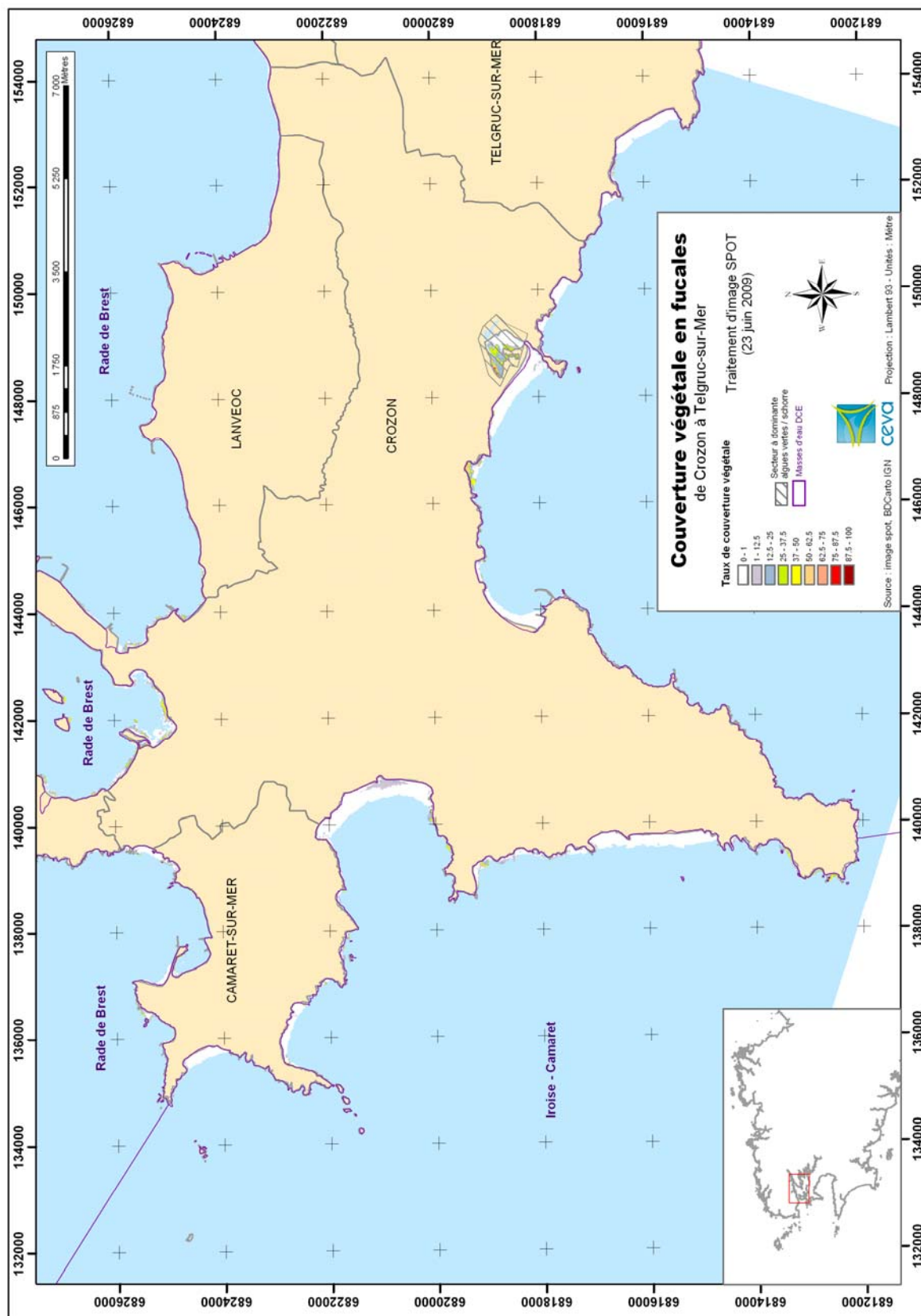








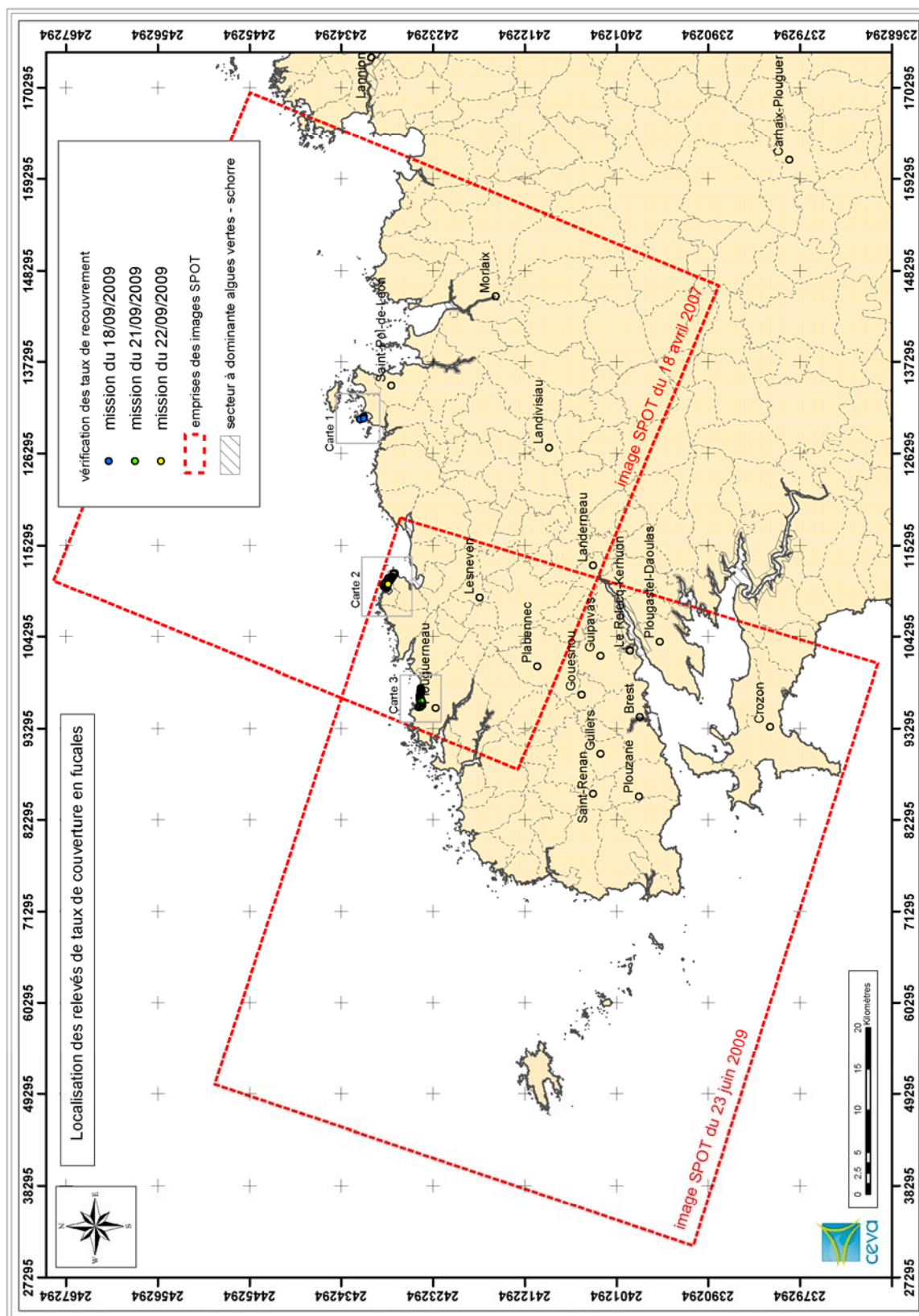


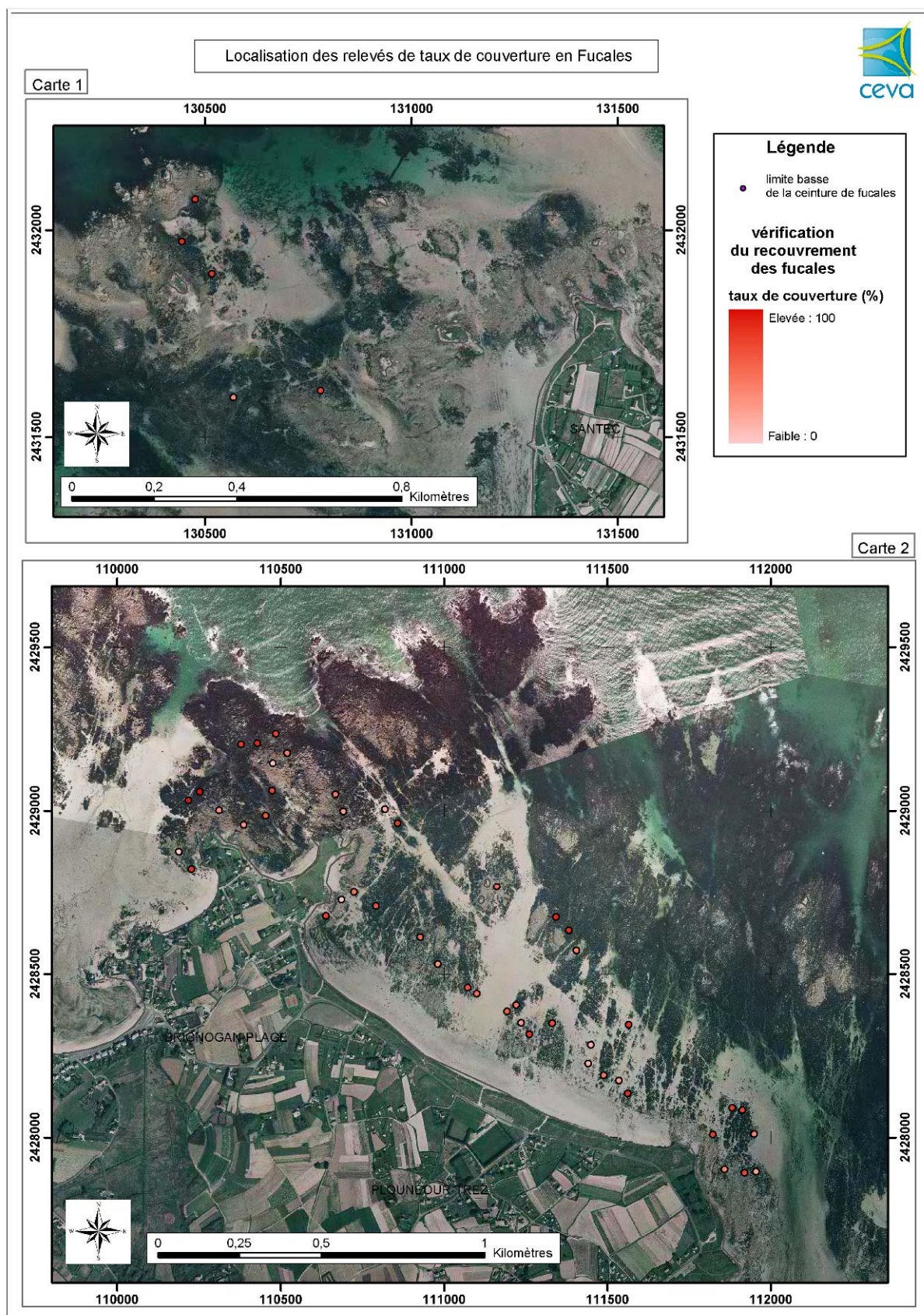


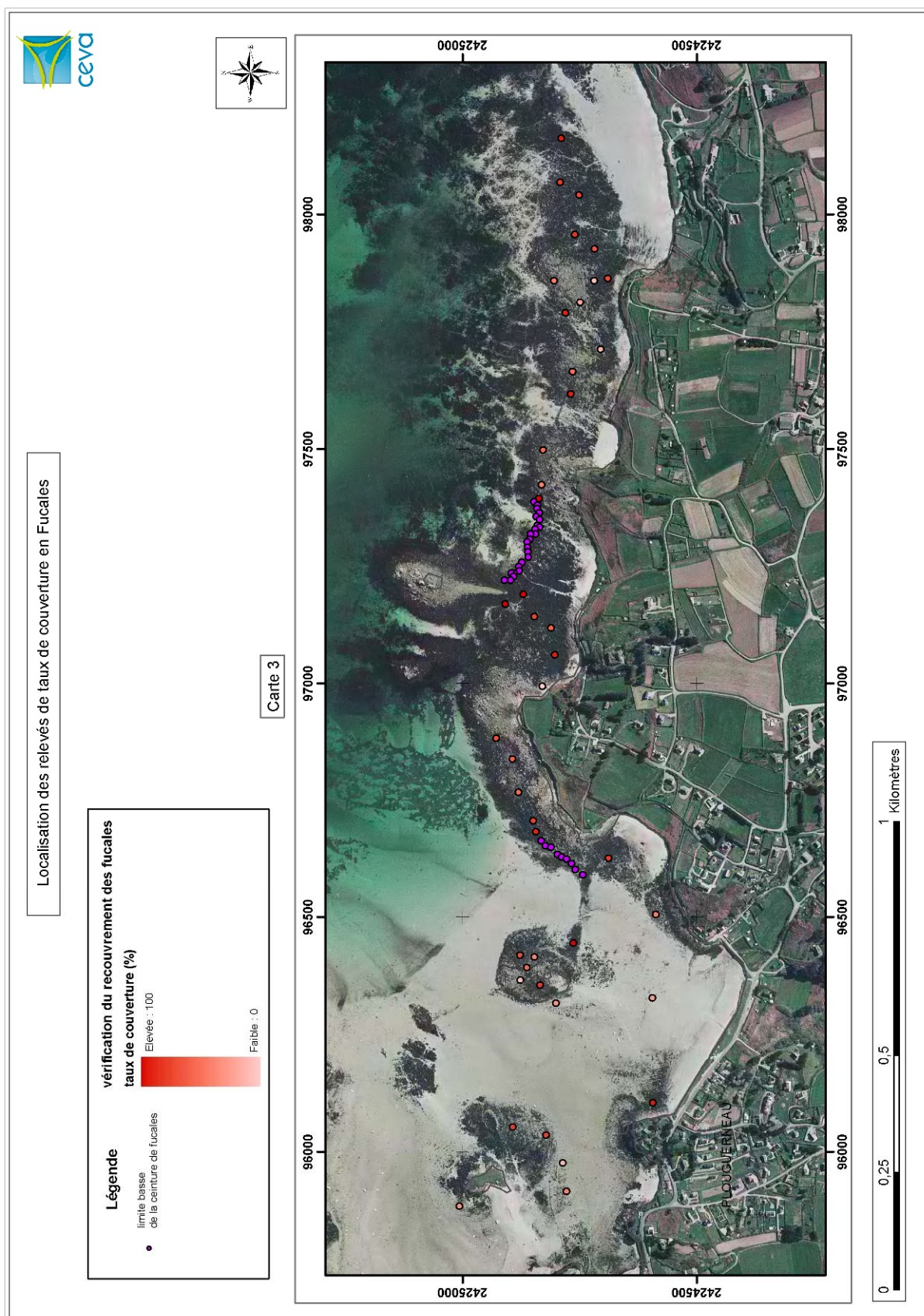
ANNEXE 3

CARTES DE SYNTHESE DES ACQUISITIONS TERRAIN SUR LE FINISTERE NORD

2009



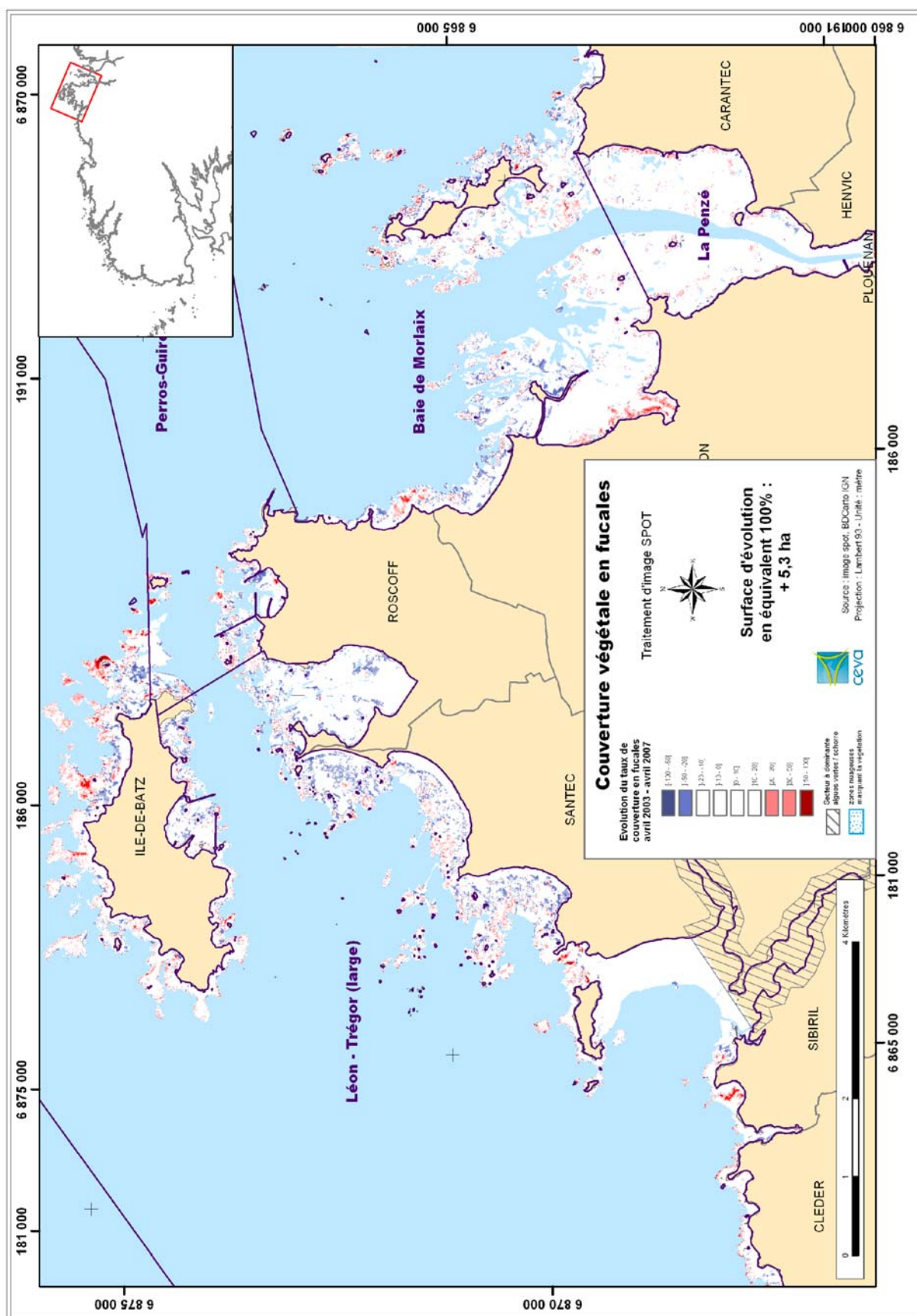


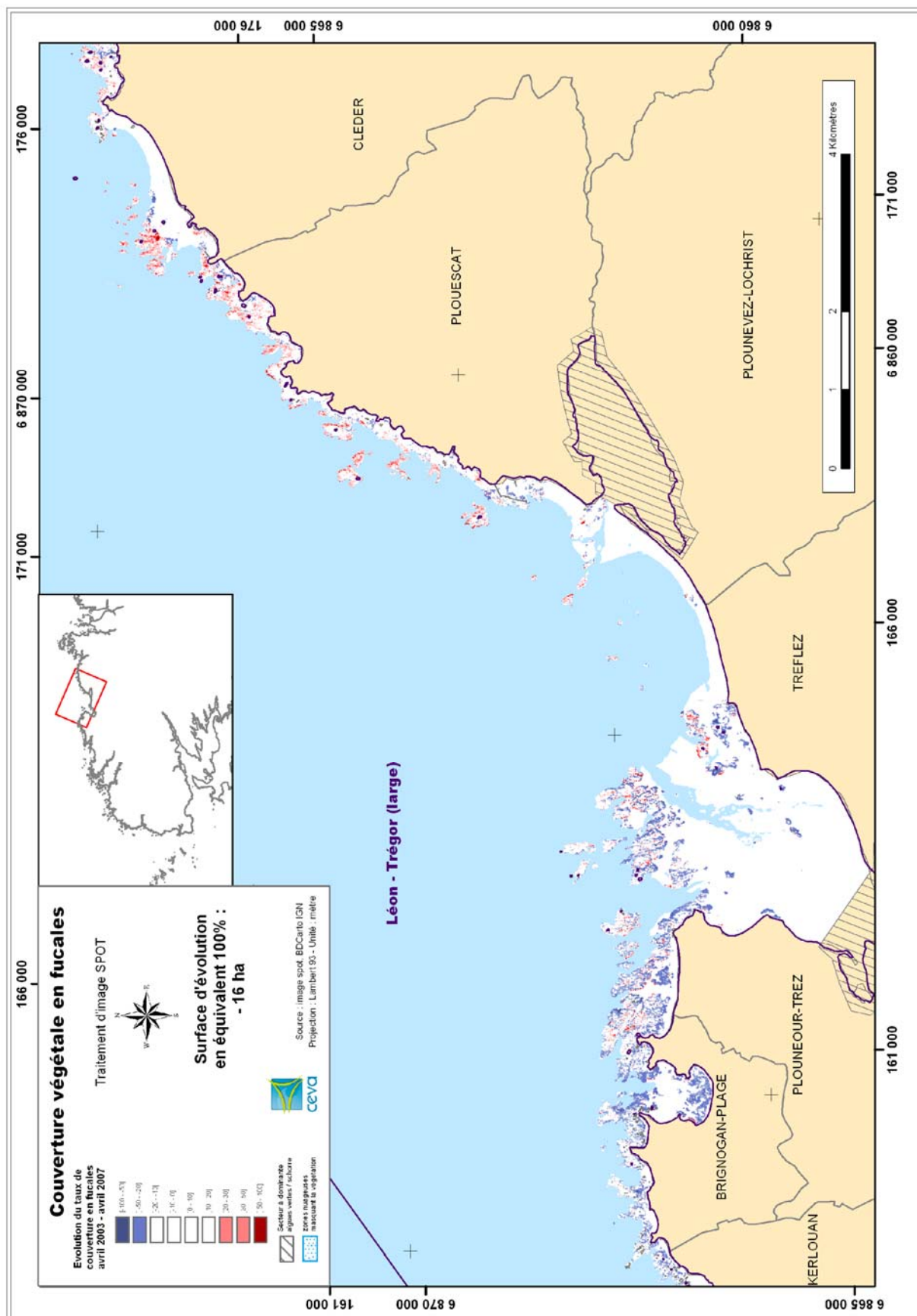


ANNEXE 4

CARTES DE DIFFERENTIEL D'EVOLUTION ENTRE LES IMAGES SPOT DU 18 AVRIL 2007 ET DU 18 AVRIL 2003

**MASSES D'EAU DCE CONCERNEES :
LEON-TREGOR LARGE + PERROS-GUIREC-MORLAIX LARGE
BAIE DE MORLAIX + LA
PENZE**





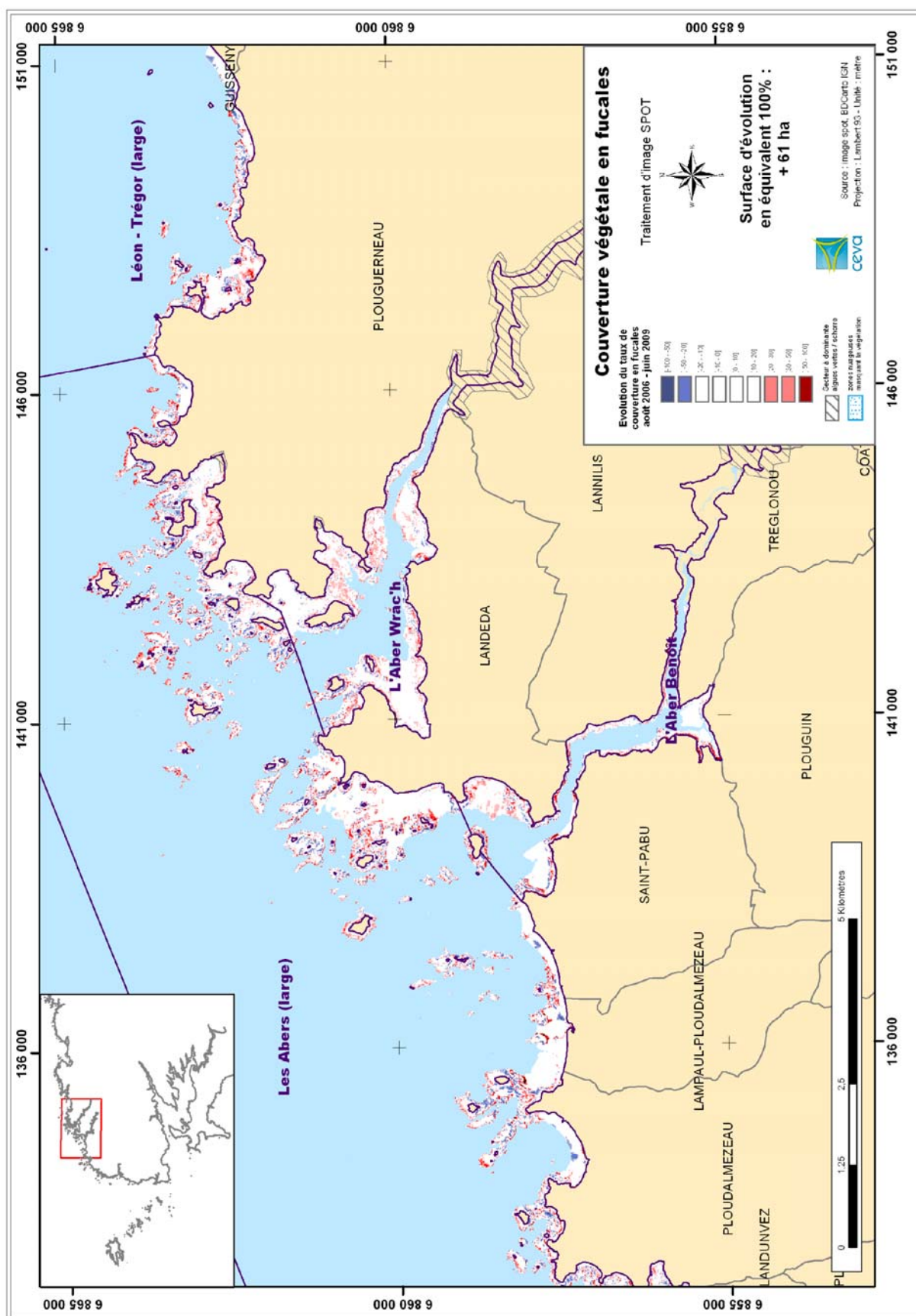


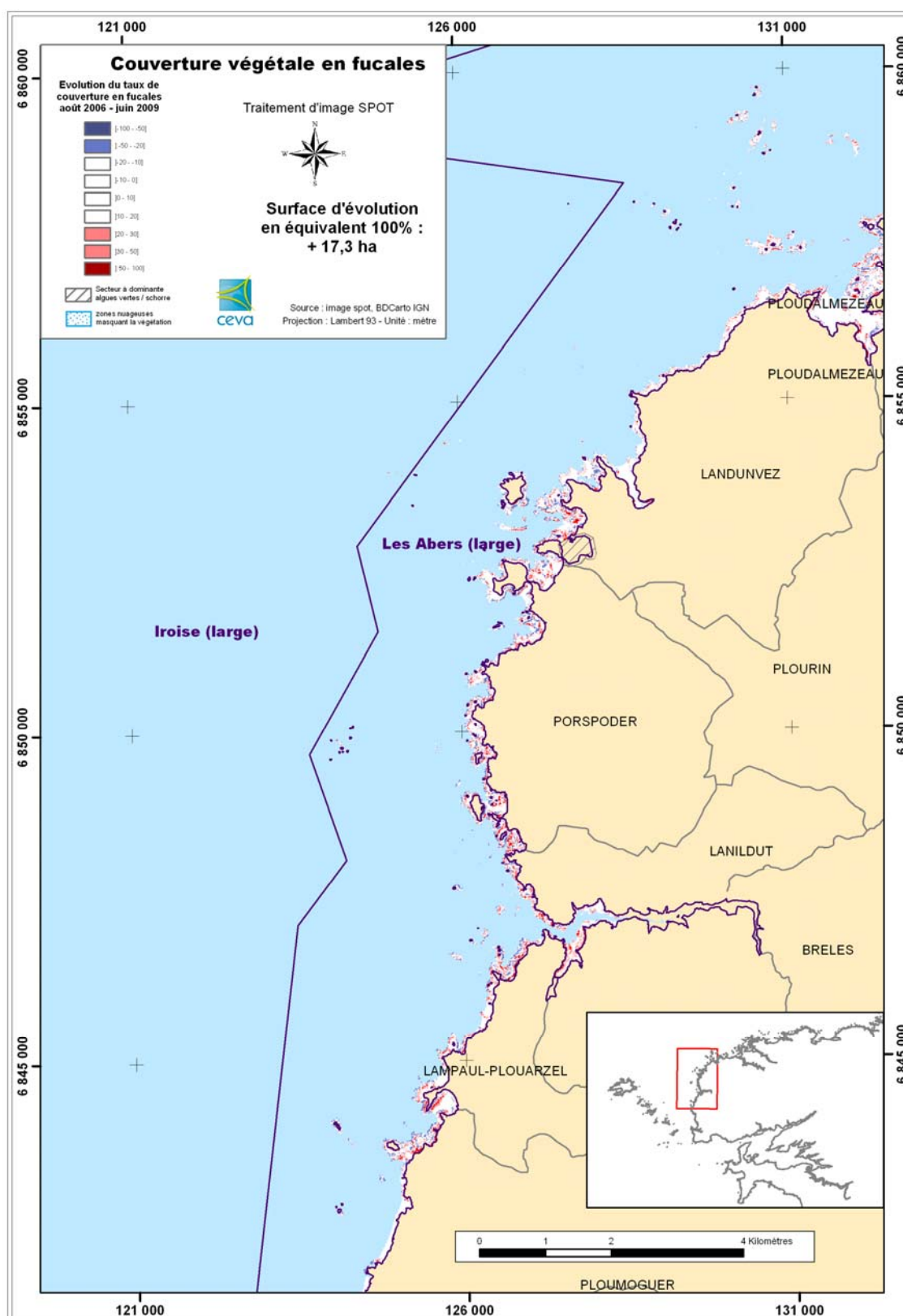
Suivi de la couverture en macroalgues intertidales de substrats durs
Dans le cadre du projet REBENT/DCE

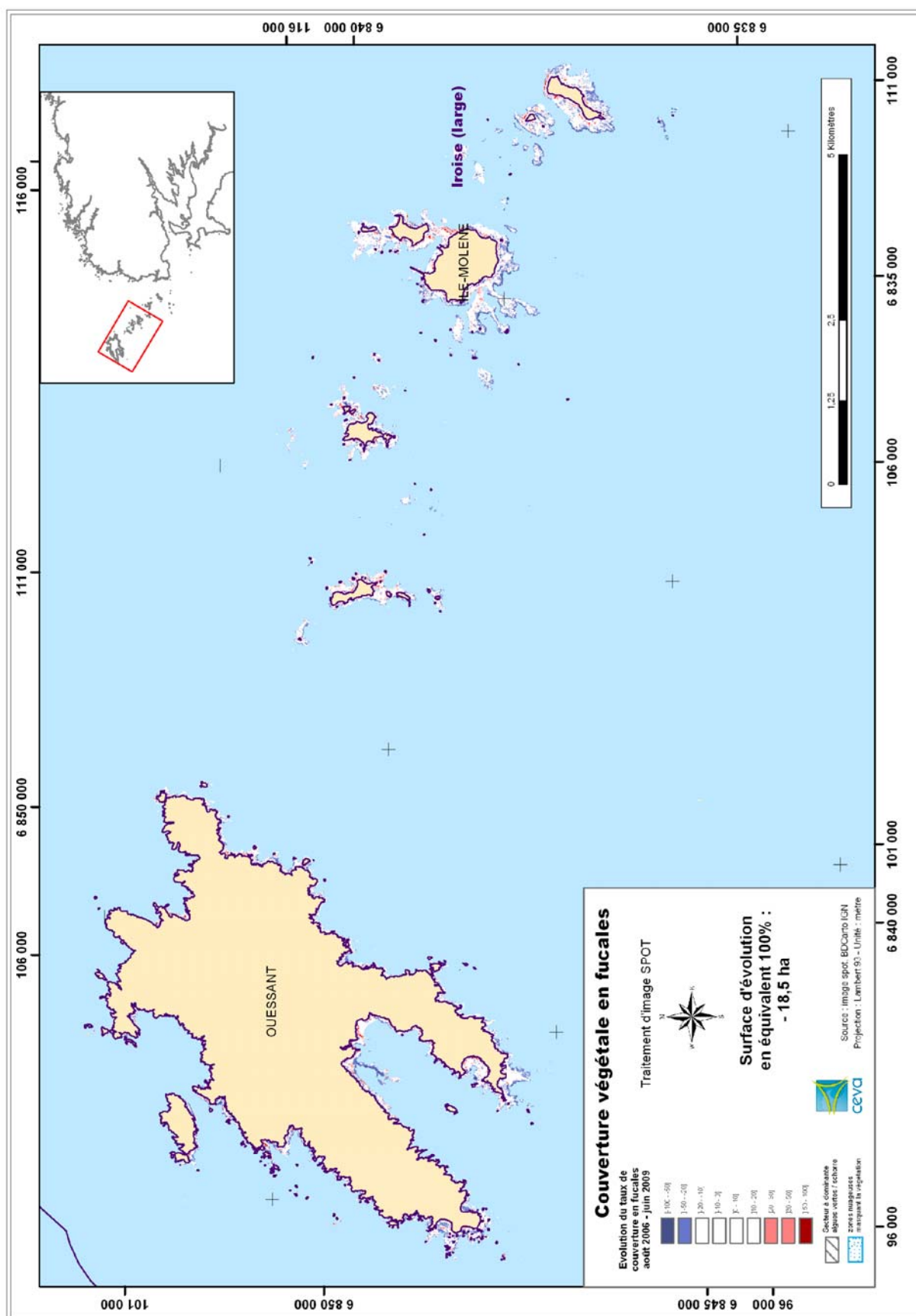
ANNEXE 5

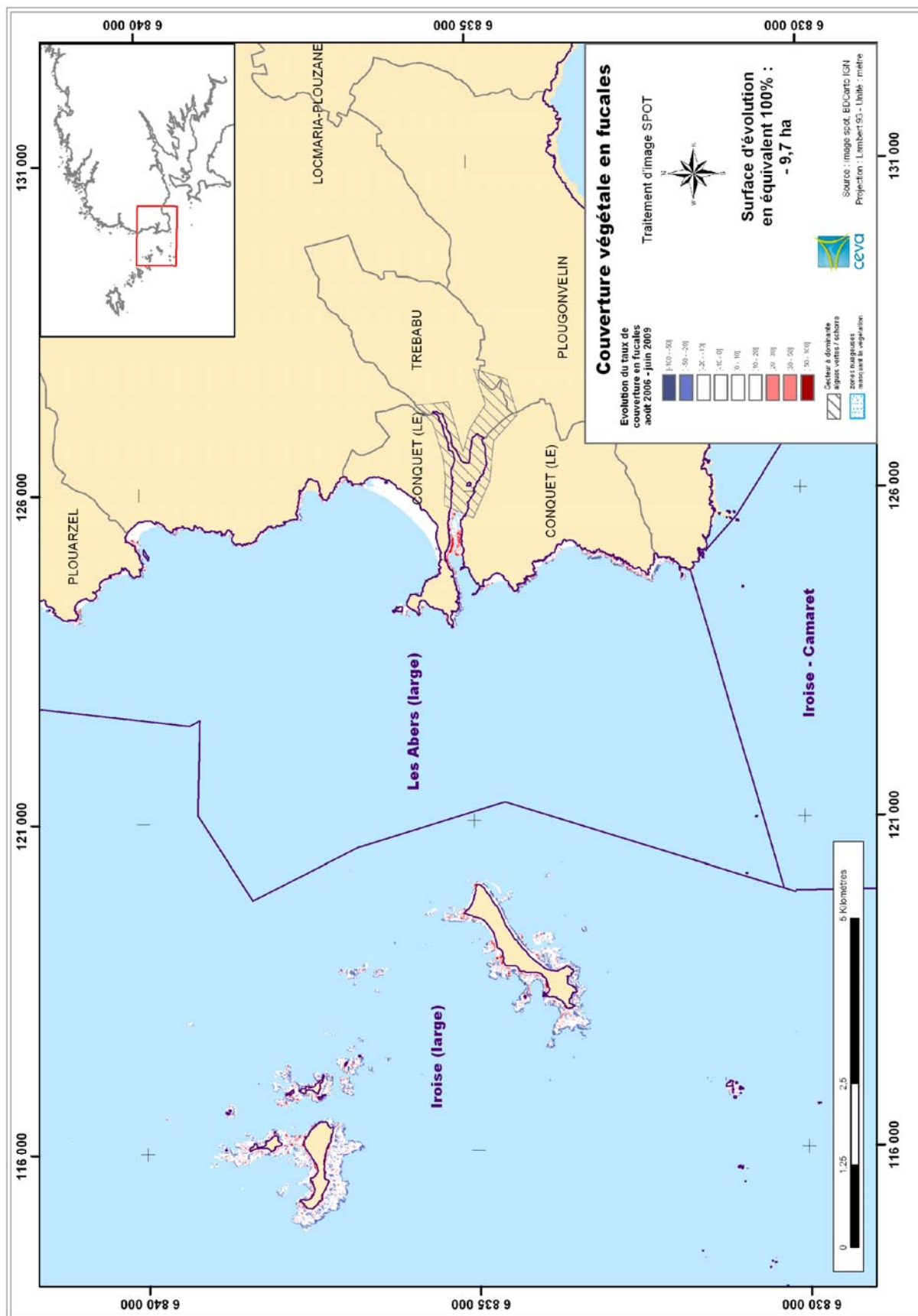
CARTES DE DIFFERENTIEL D'EVOLUTION ENTRE LES IMAGES SPOT DU 23 JUIN 2009 ET DU 12 AOUT 2006

**MASSES D'EAU DCE CONCERNEES :
LES ABERS COTE ET LARGE + IROISE LARGE + RADE DE BREST**









ANNEXE 6

TABLEAU DE CORRESPONDANCE ENTRE LES CODES DES MASSES D'EAU ET L'APPELATION DES MASSES D'EAU

Masses d'eau de transition

Code ME	Dénomination
FRGT02	Bassin maritime de la Rance
FRGT03	Le Trieux
FRGT04	Le Jaudy
FRGT05	Le Léguer
FRGT06	Rivière de Morlaix
FRGT07	La Penzé
FRGT08	L'Aber Wrac'h
FRGT09	L'Aber Benoît
FRGT10	L'Elorn
FRGT11	Rivière de Daoulas
FRGT12	L'Aulne
FRGT13	Le Goyen
FRGT14	Rivière de Pont-l'Abbé
FRGT15	L'Odét
FRGT16	L'Aven
FRGT17	La Belon
FRGT18	La Laïta
FRGT19	Le Scorff
FRGT20	Le Blavet
FRGT21	Rivière d'Etel
FRGT22	Rivière de Crac'h
FRGT23	Rivière d'Auray
FRGT24	Rivière de Vannes
FRGT25	Rivière de Noyal
FRGT26	Rivière de Penerf
FRGT27	La Vilaine
FRGT28	La Loire
FRGT29	La Vie
FRGT30	Le Lay
FRGT31	La Sèvre Niortaise

Masses d'eau côtières

Code ME	Dénomination
FRGC01	Baie du Mont-Saint-Michel
FRGC03	Rance - Fresnaye
FRGC05	Fond Baie de Saint-Brieuc
FRGC06	Saint-Brieuc (large)
FRGC07	Paimpol - Perros-Guirec
FRGC08	Perros-Guirec (large)
FRGC09	Perros-Guirec - Morlaix (large)
FRGC10	Baie de Lannion
FRGC11	Baie de Morlaix
FRGC12	Léon - Trégor (large)
FRGC13	Les Abers (large)
FRGC16	Rade de Brest
FRGC17	Iroise - Camaret
FRGC18	Iroise (large)
FRGC20	Baie de Douarnenez
FRGC24	Audierne (large)
FRGC26	Baie d'Audierne
FRGC28	Concarneau (large)
FRGC29	Baie de Concarneau
FRGC32	Laïta - Pouldu
FRGC33	Laïta (large)
FRGC34	Lorient - Groix
FRGC35	Baie d'Etel
FRGC36	Baie de Quiberon
FRGC37	Groix (large)
FRGC38	Golfe du Morbihan (large)
FRGC39	Golfe du Morbihan
FRGC42	Belle-Ile
FRGC44	Baie de Vilaine (côte)
FRGC45	Baie de Vilaine (large)
FRGC46	Loire (large)
FRGC47	Ile d'Yeu
FRGC48	Baie de Bourgneuf
FRGC49	La Barre-de-Monts
FRGC50	Nord Sables-d'Olonne
FRGC51	Sud Sables-d'Olonne
FRGC52	Ile de Ré (large)
FRGC53	Pertuis Breton
FRGC54	La Rochelle