

DES INDICATEURS DE DYNAMIQUE POUR LE SUIVI DES VASIERES EN ESTUAIRE DE SEINE

INDEXES OF DYNAMIC FOR MONITORING OF THE SEINE ESTUARY MUDDY SWAMPS

Thomas POUCHIN : Groupe « Environnement & Estuaire » - UMR « IDEES » 6063 du CNRS, Université du Havre

Email : thomas.pouchin@univ-lehavre.fr

RESUME : En estuaire de Seine, les surfaces de vases nues ont considérablement diminué en l'espace de quelques dizaines d'années. Si la sédimentation est ici un phénomène naturel, son ampleur est par contre démesurée et particulièrement inquiétante, les vasières étant des espaces vitaux pour les oiseaux migrateurs et des zones nourricières de premier ordre. La dégradation et la transformation de ces biotopes riches et spécifiques est un des phénomènes qui a nécessité la mise en place d'un observatoire des zones humides dans l'estuaire de Seine.

L'exploitation d'une série chronologique (1979 à 2000) composée d'images satellitales et de photographies aériennes a permis une appréhension fine et régulière de la cinématique paysagère de cette zone sensible. Après une mise en évidence des principales mutations spatiales, la quantification des mouvements (en termes de surface) a autorisé l'élaboration de tendances d'évolution qui renseignent sur la vitesse des phénomènes et sur leurs dynamiques futures. Outre le phénomène de sédimentation, un important processus d'artificialisation de l'estuaire qui multiplie les atteintes environnementales directes et indirectes à l'intégrité des biotopes a pu être étudié. Le principal résultat de ces différents travaux est un synopsis précis et complet des mutations spatiales intervenues dans ces zones de vasières. Dans l'estuaire de la Seine, le XXI^e siècle s'ouvre sur le chantier du gigantesque terminal portuaire « Port 2000 ». Son impact sur les milieux naturels de l'estuaire est une grande inconnue, l'observatoire des zones humides demeure donc plus que jamais d'actualité.

ABSTRACT : In the Seine Estuary, the bare sludge areas ha been decreasing very much last decades. If the sedimentation is a natural phenomenon, its importance is here excessive and especially worrying, the sludge areas are vital for migrating birds and very important for faun food. The transformation and the degradation of this rich and specific biotopes is one of the problems that have required the implementation of a wetlands observatory in Seine Estuary.

A time series (1979 – 2000) with remote sensing images and aerial photographs was built in order to observe regularly and finely the landscape dynamic. After having discovered the main landscape mutations, the movements quantification (i.e. surface-area) have permitted the elaboration of evolution tendencies that give some pieces of information on the phenomena speed and their future dynamics. Beside the sedimentation phenomenon, an important process of artificialisation in the estuary has been studied, that multiplies direct and indirect environmental affects on the biotopes integrity. The main result of these researches is a complete and precise synopsis of the landscape mutations that have arisen in this sludge areas. In the Seine Estuary, the XXI^e century begins with the enormous yard of the future harbour "Port 2000". The consequences on the natural environment are very unknown, therefore the wetlands observatory is more than ever an actuality.

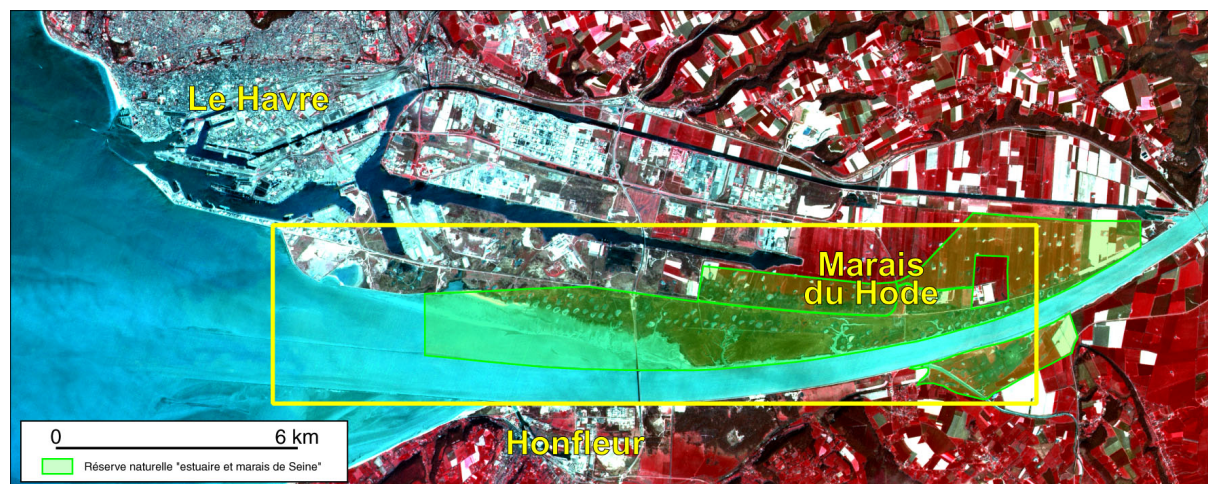
MOT CLEFS : Dynamique spatiale / Indicateurs de dynamique / Télédétection / Zones humides / Estuaires

KEY WORDS : Landscape dynamic / Indexes of dynamic / Remote sensing / Wetlands / Estuaries

L'estuaire de la Seine (figure 1) propose une diversité de milieux considérable et notamment de vastes zones humides. Outre le marais Vernier rive gauche (une des plus grandes tourbières de France), le marais du Hode qui s'étend sur la rive droite présente une variété de biotopes et d'écosystèmes importante. La richesse et la rareté de ces milieux naturels, ainsi que les nombreuses menaces dont ils sont l'objet ont motivé l'intégration de l'estuaire dans la liste des sites retenus pour le Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH).

Une des préoccupations sensibles des scientifiques et acteurs du PNRZH est l'appréhension de la sédimentation et de l'artificialisation des vasières du Hode. En effet, l'endiguement quasi-complet des deux berges de la Seine notamment par des digues submersibles qui limitent le dragage du chenal de navigation en piégeant les sédiments, exagère très fortement un phénomène de sédimentation théoriquement naturel. L'implantation du pont de Normandie, surtout avec le remblai d'accès nord a très sensiblement contribué à l'augmentation de la sédimentation en perturbant les échanges hydrauliques. Ces vasières nues sont des espaces vitaux, entre autres pour les oiseaux migrateurs et les poissons de la baie de Seine. La disparition progressive de ces zones nourricières pour l'avifaune migratrice et de ces espaces de reproduction pour les poissons est préoccupante. L'avancée de la roselière est extrêmement rapide, difficilement maîtrisable et signifie une forte perte de biodiversité et une banalisation du milieu. La colonisation d'étendues de vase par des roseaux est un intéressant témoin de la sédimentation alarmante qui sévit dans cette zone. En effet, le roseau est une plante qui ne peut vivre que s'il est planté dans une zone inondée régulièrement par 30 centimètres à 1 mètre d'eau. En dessous de ces limites, il manque d'eau et est remplacé par des espèces moins hygrophiles ; au dessus d'un mètre, il est noyé ou emporté par la violence des courants. La progression des roseaux sur des zones littorales signifie donc une remontée du niveau du sol, et par conséquent une dynamique de sédimentation. Le deuxième phénomène préoccupant est l'artificialisation progressive des zones humides de l'estuaire de la Seine. La mise en chantier de lourdes infrastructures de transports, le développement de la zone industrielle et portuaire du Havre et l'implantation de décharges et de dépôts en tous genres font régresser d'année en année la surface de marais.

Figure 1 : L'estuaire de la Seine en 1997 (composition colorée RVB = P+XS3.97 / P+XS2.97 / P+XS1.97)



Images SPOT XS du 13 mars 1997 et P du 31 mai 1997
Fusion P+XS par conversion RVB > ITS > PTS > RVB (BOURCIER 94)

La télédétection aérospatiale nous a permis de qualifier et surtout de quantifier ce phénomène d'artificialisation, de dégradation et de transformation de ces biotopes d'une très grande richesse. L'exploitation d'une série chronologique de 13 ans d'images (1987 à 2000) a déjà donné des résultats satisfaisants, notamment grâce à l'élaboration d'indicateurs de dynamique spécialisés.

1 Appréhension de la cinématique paysagère

1.1 Élaboration de la série chronologique

La série chronologique d'images de télédétection qui a été élaborée est composée de trois images panchromatiques SPOT, six images multispectrales SPOT et d'une image radar ERS. Ainsi, une scène satellitale est disponible tous les un ou deux ans entre 1987 et 2000, ce qui permet un suivi fin et régulier de la dynamique de l'estuaire. L'intégration de données IGN, notamment le Scan-25 et une série de missions aériennes que nous

avons numérisé, a été conduite dans le but de faciliter l'interprétation des images satellitales et afin d'avoir un aperçu de la zone d'étude avant février 1986 (date de lancement de SPOT 1).

L'image de référence utilisée pour le calage de toutes les données images est une scène panchromatique SPOT (enregistrement du 31 mai 1997 – niveau de correction 2B) sélectionnée pour ses qualités géométriques optimales. La méthode polynomiale par prise de point d'appui nous a permis d'intégrer chaque image, en conservant cette même scène de référence quelle que soit la résolution spatiale (les données XS ont donc été ré-échantillonnées à 10 mètres). La reventilation thématique des données a été effectuée par interpolation bicubique, méthode qui possède l'immense avantage de très bien conserver la géométrie des images, paramètre décisif en ce qui nous concerne. Les clichés aériens, une fois numérisés à un mètre de résolution, ont été calés en utilisant le Scan-25 comme strate de référence. La précision géométrique des deux strates primaires est très importante puisqu'elle conditionne la précision de l'ensemble des données de la série chronologique. Elle est de 10 à 30 mètres pour l'image panchromatique (spécifications SPOT Image) et de 15 à 25 mètres pour le Scan-25 (spécifications IGN).

1.2 La composition colorée diachronique

L'utilisation de composés diachroniques, c'est à dire la superposition d'images multitudes, est une méthode simple pour avoir une vue d'ensemble fine et continue du phénomène étudié, néanmoins, la lisibilité de tels documents n'est pas toujours rapide et évidente. Les couleurs présentes sur un composé diachronique ne rendent plus compte de l'occupation du sol, mais des changements d'état du sol et les valeurs de gris marquent les persistances. Il est évidemment très important de ne pas mélanger des bandes spectrales différentes de dates distinctes, sans prendre d'infinies précautions lors de l'analyse d'image. Effectivement, le document final formerait un mélange complexe d'informations thématiques et temporelles.

Le problème était de trouver quels canaux superposer, car l'omniprésence de l'eau dans la vase nue et dans la roselière atténuée et « nivelée » considérablement la réponse spectrale. La combinaison d'indices de végétation (type NDVI) se révèle relativement décevante, puisque la réponse théoriquement importante générée par l'activité chlorophyllienne du roseau est profondément atténuée par l'absorption massive du proche infrarouge par l'eau. Un composé diachronique élaboré à partir de canaux rouges (figure 2) est un compromis acceptable bien qu'il mette davantage en avant les phénomènes de minéralisation des sols.

Figure 2 : Evolution des vasières composé diachronique RVB = XS2.1993 / XS2.1987 / XS2.1987

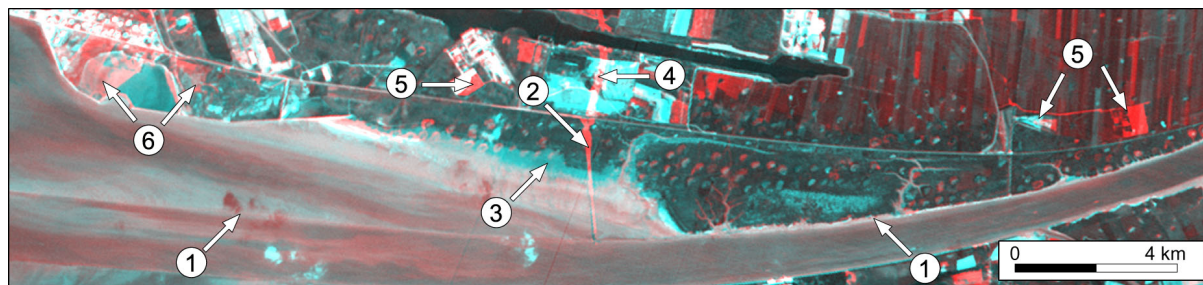


Image SPOT XS du 26 juin 1993 (min : 20 / max : 197 / moy : 42,2)
Image SPOT XS du 24 mai 1987 (min : 20 / max : 148 / moy : 36,2)

Le composé diachronique de la figure 2 présente l'évolution de la zone des vasières entre 1987 et 1993, période qui a certainement été la plus dynamique des dernières décennies. L'image la plus récente est datée du 26 juin 1993 (image SPOT XS) et la plus ancienne du 24 mai 1987 (image SPOT XS). Les zones codées en valeurs de cyan sont celles qui ont connu une forte progression végétale, alors que les surfaces qui apparaissent en valeurs de rouge ont été caractérisées par de très fortes minéralisations. La sédimentation naturelle, considérablement accélérée par la digue submersible (1) et le remblais nord du pont de Normandie (2), a pour conséquence la végétalisation progressive de la slikke (zone cyan clair en 3). Ce phénomène de végétalisation est comme nous l'avons vu, un témoin important de la sédimentation de la zone d'estran. L'omniprésence de l'eau et le peu de différences de réflectance entre les zones de vases nues (en clair au sud) et les surfaces en roseaux (en gris moyen au nord) rendent délicate l'appréhension de la progression végétale.

Le développement et l'implantation des dépôts de déchets (5) et de matériaux (6) est l'héritage d'une conception obsolète des zones humides. Espaces « vierges » et sauvages gorgés d'eau, les marais étaient les endroits rêvés pour se débarrasser des déchets de toutes sortes, qu'ils soient industriels ou ménagers. Le classement de la zone

en réserve naturelle en 1998 a mis fin à une pratique, qui comme nous le voyons, a perduré jusqu'au dernier moment. Les décharges sont poreuses et les risques environnementaux causés par les fuites sont considérables. Néanmoins, le centre d'enfouissement technique du Hode (5, à l'est et en rouge) est encore en fonctionnement puisqu'il représente une enclave au sein de la réserve naturelle (cf. figure 1) et n'est de ce fait aucunement concerné par la protection.

La construction du pont de Normandie et de l'autoroute A29 (2 et 4) sont autant de pressions qui s'exercent sur les vasières et les prairies humides au nord. Le remblai nord du pont (en 2, véritable digue élevée en 1988) a notamment coupé les échanges hydrauliques entre l'ouest et l'est, ce qui peut expliquer le comblement important de la filandre qui le borde à l'est. L'artificialisation de cette zone n'est pas un phénomène passé ou en régression, de vastes implantations industrielles et portuaires (comme Port 2000 à l'extrême ouest de l'image) ainsi que de grands chantiers logistiques vont accroître cette pression anthropique dans la décennie 2000.

1.3 L'indice global de mouvements

Ce premier indice a pour vocation l'appréhension des mouvements paysagers dans leur globalité. Il prend la forme d'un néocanal dont le gradient progressif de valeurs de gris signifie une quantité croissante de mouvements. Plus les changements d'état sont importants plus les teintes vont s'approcher du blanc, les zones de persistances seront codées en un noir d'autant plus profond que leur similitude aux deux dates sont importantes. Cet indice est uniquement représentatif d'une quantité de mouvements et non du type de mouvements observés. C'est une première approche très intéressante pour appréhender la dynamique paysagère à petite échelle, en termes de zones en mutations et faisant abstraction des thèmes concernés.

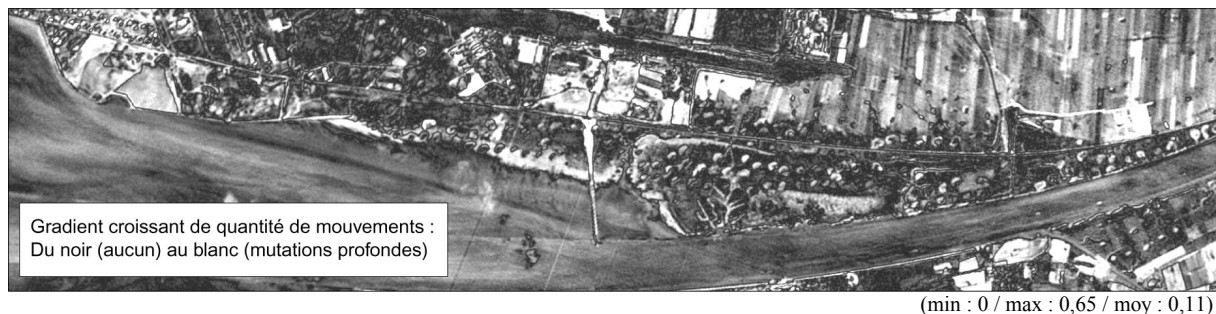
L'indice global de mouvements (figure 3) se construit donc en appliquant sur un composé diachronique de canaux rouges (XS2 de SPOT ou TM2 de Landsat) une conversion RVB => ITS (Rouge-Vert-Bleu => Intensité-Teinte-Saturation). L'intensité correspond à l'image en noir et blanc, la teinte reflète la couleur principale et la saturation renseigne sur le degré de pureté d'un point par rapport à sa couleur primaire d'origine. La formule de l'indice global de mouvements est la suivante :

$$IGM = S(r_1, r_2)$$

avec S est le canal saturation, r le canal rouge, 1 la date la plus récente et 2 la plus ancienne

Plus les mouvements sont profonds et importants, plus les couleurs du composé diachronique sont saturées, donc plus la variabilité est forte, et plus les teintes de l'indice global de mouvement vont confiner au blanc. Les surfaces codées en noir sur l'indice sont les zones dont la stabilité temporelle est la plus forte. Les valeurs en gris foncé ou moyen représentent les changements conjoncturels, comme les phénomènes cycliques ou saisonniers. Comme nous le verrons par la suite, les mouvements les plus importants en termes de fréquence, d'occurrence et de surface sont des phénomènes de végétalisation ou de minéralisation. Les réponses spectrales des zones végétalisées et minéralisées sont très contrastées dans la bande spectrale rouge (sombres pour les premières et très claires pour les secondes). La saturation des couleurs d'un composé diachronique qui est donc associée à l'importance des changements observés explique la pertinence de cet indice. La mise en œuvre de cet indice est donc rapide et simple, ce qui est prépondérant du fait de sa vocation principale : une appréhension globale et une première reconnaissance des zones en mutation. L'indice global de mouvements fonctionne dans tous les cas de figure car il repose directement sur les disparités spectrales entre les images brutes et non sur une classification ou autre opération complexe.

Figure 3 : L'indice global de mouvements (1987 à 1993)



Les zones dynamiques identifiées sur le composé diachronique sont toutes bien visibles sur l'indice global de mouvements (figure 3). Les surfaces codées en gris moyen, donc peu à moyennement dynamiques, sont souvent caractérisées par des changements conjoncturels. C'est le cas des variations de turbidité de la Seine ou des différences d'humidité dans les prairies humides (au nord-est).

Figure 4 : Classification par l'indice global de mouvements (1987 à 1993)



L'image issue du seuillage des données issues de l'indice global de mouvements offre une bien meilleure visibilité de la dynamique générale de la zone d'estran. Aussi pertinent et intéressant soit-il, l'indice global de mouvements présente certaines limites. D'abord, certains changements cycliques, conjoncturels ou saisonniers peuvent apparaître comme des changements d'état plus profonds. C'est par exemple le cas des différences d'humidité ou encore des variations dans la turbidité des eaux. Ensuite, la progression d'un élément sur un autre peut être sous-estimée lorsque leurs réponses spectrales respectives sont trop similaires. C'est le cas de la végétalisation des zones de vases nues (ou les espèces herbues pionnières sont confondues avec la vase) où la couleur et l'humidité des deux composantes sont une source de baisse importante des réflectances. Ce phénomène est caractérisé par un indice global de mouvements moyennement fort alors que le changement d'état est massif et indiscutable. Ceci étant, l'indice fonctionne très bien si l'on considère sa vocation première. Il présente l'essentiel des mutations et des persistances, les erreurs sont marginales et facilement identifiables. Les changements cycliques, conjoncturels et saisonniers, s'ils peuvent parfois perturber l'interprétation générale du document sont néanmoins des indicateurs qu'il est important de bien prendre en compte. Ainsi par exemple, les variations d'humidité dans les prairies humides n'affectent pas toutes les parcelles, renseignant ainsi sur leur drainage ou leur altitude.

1.4 L'indice dynamique de couverture des sols

Après avoir appréhendé les mouvements paysagers dans leur globalité spatiale et thématique, il est important de commencer progressivement à classer les changements d'état en fonction de leur nature. Les changements les plus nombreux en termes de surface, de fréquence et d'occurrence sont ceux qui affectent la végétation car celle-ci couvre la majorité de la zone d'estran et est caractérisée par une très grande variabilité conjoncturelle et structurelle. Un sol nu laissé à l'abandon va se végétaliser en quelques mois, les parcelles agricoles changent constamment de visage en fonction des saisons et de la rotation des cultures, les déboisements et plantations vont modifier profondément la physionomie des espaces boisés... C'est à partir de ce constat simple qu'est venue l'idée d'un indice dynamique de couverture des sols qui permettrait d'appréhender les alternances sols nus / sols végétalisés, c'est à dire les phénomènes de minéralisation et de végétalisation des espaces. Cet indice se distingue très nettement des indices de végétation par son caractère dynamique et par sa manière d'aborder les surfaces végétales. Effectivement, l'objectif premier n'est pas l'appréhension des mutations internes au couvert végétal, mais avant tout l'identification des progressions et régressions des zones végétalisées par rapport au reste des espaces observés.

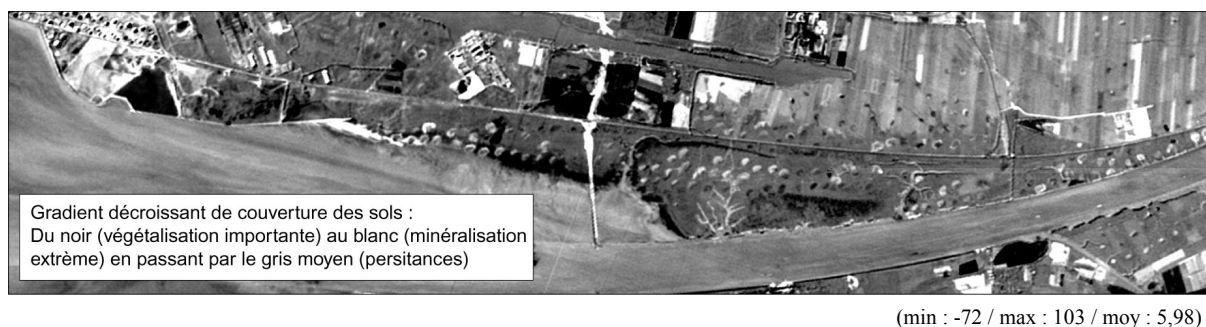
L'indice dynamique de couverture des sols (figure 5) se présente sous la forme d'un gradient de valeurs de gris allant du noir pour les progressions végétales nettes et importantes au blanc pour les progressions minérales massives. Les valeurs moyennes signifient la persistance des thèmes d'occupation du sol qu'elles concernent. Le choix du canal rouge comme base de l'indice dynamique de couverture des sols est évident puisqu'il présente des contrastes très forts entre les surfaces végétalisées (faible réponse spectrale) et les surfaces minéralisées (très forte réponse spectrale). La mise en oeuvre de cet indice est très simple puisqu'il s'agit de soustraire au canal rouge de la date la plus récente, le canal rouge de la plus ancienne. La formule de l'indice dynamique de couverture des sols est donc la suivante :

$$IDCS = (r_1 - r_2)$$

avec r est la valeur radiométrique dans le canal rouge, 1 la date de l'image la plus récente et 2 la plus ancienne

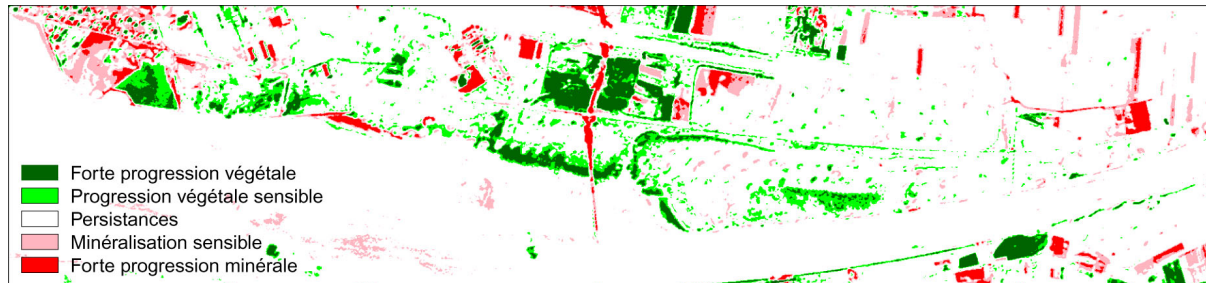
Grâce à cette opération, on obtient un double gradient. Gradient croissant de minéralisation du gris moyen au blanc et gradient croissant de végétalisation du gris moyen au noir. Outre la simplicité d'élaboration, le canal rouge apporte une grande stabilité temporelle pour tous les phénomènes saisonniers affectant la végétation. Effectivement, la réponse spectrale des végétaux dans les longueurs d'ondes rouges va demeurer basse avec des variations de faible amplitude quelle que soit la saison. La réflectance des zones minéralisées sera toujours beaucoup plus forte que celle des surfaces végétalisées.

Figure 5 : L'indice dynamique de couverture des sols (1987 à 1993)



L'indice présente des résultats très contrastés, toutes les apparitions minérales étant codées en blanc très vif et les progressions végétales en noir profond. Les persistances apparaissent en gris moyen plus ou moins clair.

Figure 6 : Classification par l'indice dynamique de couverture des sols (1987 à 1993)



Encore un fois, le seuillage (figure 6) donne une image très lisible de la dynamique de la zone d'estran. L'indice dynamique de couverture des sols présente néanmoins quelques limites. D'abord, une chute de la réponse spectrale entre deux dates a tendance à être considérée comme une végétalisation. Or, la présence d'humidité ou l'immersion de certaines zones n'ont rien à voir avec le développement de la végétation. De même, les implantations industrielles caractérisées par un bâti massif et étendu ont souvent une réponse très hétérogène générée par des différences de lumiance entre les deux dates (orientation des capteurs, variation de l'angle et de l'élévation solaire...), ainsi que du léger flou généré par la superposition des images et la reventilation thématique des données. Malheureusement, ce problème est récurrent et quasiment insoluble. Malgré certaines limites, l'indice dynamique de couverture des sols est une très bonne première approche pour connaître rapidement les mouvements du paysage dans leur ensemble. Il permet d'identifier de manière nette, facile et rapide les principales zones affectées par des phénomènes de végétalisation ou de minéralisation. C'est certainement l'indice qui donne les meilleurs résultats, d'autant plus qu'il a tendance à gommer ou au moins à minimiser les variations conjoncturelles.

1.5 L'indice de variations végétales

La dernière série d'indices qu'il était intéressant d'élaborer est celle des indices dynamiques qualitatifs. Leur vocation est de proposer des informations sur les changements beaucoup plus fins et plus difficiles à percevoir

sur un composé diachronique classique. S'il est important de connaître les principales mutations, c'est à dire le passage d'une occupation du sol à une autre très différente, il est également prépondérant d'observer à l'intérieur de chaque thème, les variations subtiles très riches en enseignements. Ces changements subtils à l'intérieur même des surfaces végétales ou minérales sont bien plus difficiles à appréhender puisqu'ils font appel à de faibles variations des valeurs spectrales, mais leur prise en compte est essentielle pour comprendre la cinématique paysagère dans sa globalité, sans pour autant caricaturer les résultats. Malheureusement, la recherche d'une plus grande richesse thématique passe par une exagération de certaines réponses, ce qui va noyer les grands mouvements spatiaux dans les changements plus fins. Il n'est donc aucunement question de remplacer les indices précédents par les nouveaux, chacun apportant des informations différentes mais complémentaires.

Seul un indice de variations végétales a pu être élaboré. Les indices de variations d'humidité ou les indices de variations minérales ont donné des résultats bien trop approximatifs pour être présentés. Enfin, parmi les indices de variations végétales, seul le plus pertinent a été retenu.

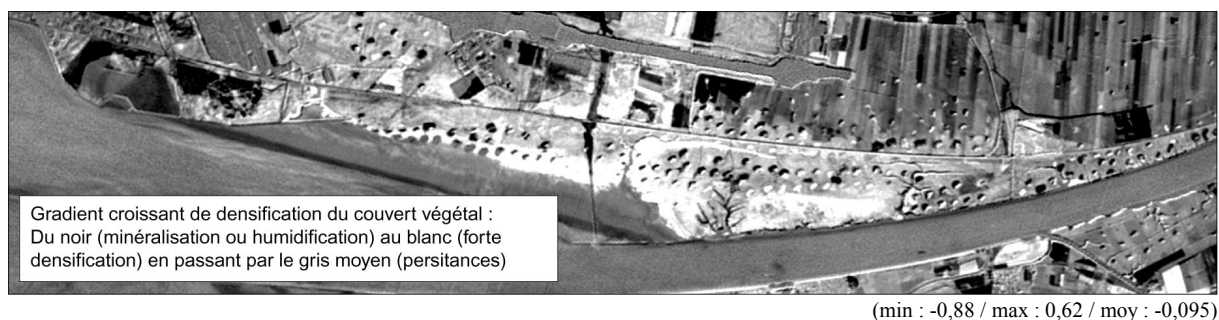
Le principe de l'indice de variations végétales (figure 7) est simple puisqu'il s'agit de soustraire l'indice de végétation normalisé (NDVI) de la date la plus ancienne à celui de la date la plus récente. Le NDVI est un indice qui présente un gradient croissant d'activité chlorophyllienne ou de biomasse verte. C'est donc tout naturellement qu'il a été choisi, même si nous verrons qu'il est assez limité sous certains aspects. La formule de l'indice de variations végétales est la suivante :

$$IVV = \left(\frac{ir_1 - r_1}{ir_1 + r_1} \right) - \left(\frac{ir_2 - r_2}{ir_2 + r_2} \right)$$

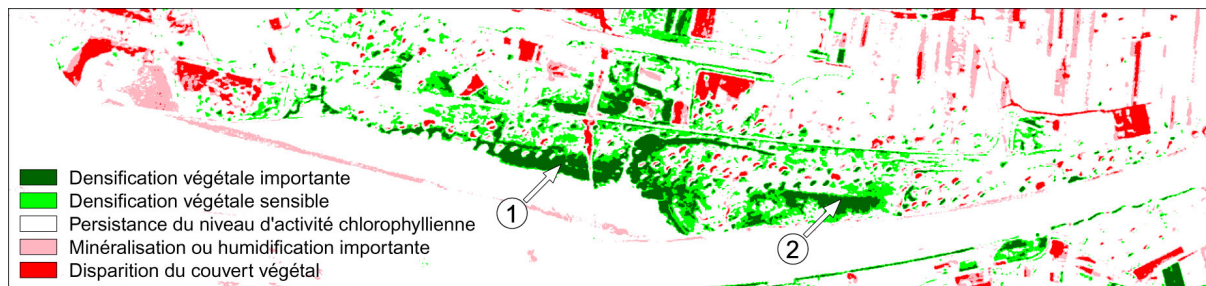
avec ir est la valeur radiométrique dans le canal infrarouge et r dans le canal rouge et 1 la date de l'image la plus récente et 2 de la plus ancienne

L'indice prend la forme d'un gradient de végétalisation ou de densification du couvert végétal qui va du noir (végétalisation négative, donc progression minérale) au blanc (progression végétale massive). Il est très important de noter que ces mesures se font à partir du canal proche infrarouge (XS3) et reposent donc sur l'activité chlorophyllienne des végétaux.

Figure 7 : L'indice de variations végétales (1987 à 1993)



Comme on peut le voir sur la figure 7, l'image est très contrastée et les zones de progressions végétales se sont considérablement étendues. La classification (figure 8) en 20 classes, effectuée par « maximum de vraisemblance », permet de mieux différencier les variations internes aux zones codées en blanc.

Figure 8 : Classification par l'indice de variations végétales (1987 à 1993)

La première grande différence avec les deux précédents indices (indice global de mouvements et indice dynamique de couverture des sols), c'est la taille de la surface des zones végétales considérées comme étant en mutation. La progression du schorre sur la slikke (en 1 sur la figure 8) paraît bien plus importante parce que l'indice de variations végétales prend en compte la végétalisation des surfaces minérales mais aussi la densification du couvert végétal, à savoir la colonisation des surfaces d'herbus par du roseau. De plus, on peut maintenant apercevoir les nombreuses zones de roseaux qui se densifient à cause de la sédimentation. Enfin, la colonisation de l'ancien banc herbeux par du roseau apparaît beaucoup plus nettement. En ce qui concerne les surfaces minéralisées, les résultats sont plus nuancés (mais ce n'est en aucun cas la vocation première de cet indice). Ainsi, le remblai nord du pont de Normandie est en grande partie tronqué et le défrichage des alentours des mares à gabions est classé comme une progression minérale massive et forte alors qu'il s'agit tout au plus d'une mise à nu de la vase. Il faut enfin signaler que les persistances du bâti industriel qui pose en général de nombreux problèmes (luminances différentes, problèmes de superposition...) sont ici parfaitement bien rendues.

Si l'indice de variations végétales autorise une appréhension assez fine des mouvements affectant les zones végétalisées, il reste complémentaire aux deux autres indices plus globaux et moins spécialisés thématiquement. Il permet certes d'identifier des variations internes au couvert végétal, mais il ne les différencie pas bien des changements d'état importants qui voient le type d'occupation du sol d'une zone se modifier profondément. Il faut être très prudent lors de la lecture de cet indice car l'indice de végétation normalisé, qui en est à la base, est bien connu pour surestimer la biomasse verte (20% environ – BOURCIER 94). L'indice de variations végétales doit donc être pris comme un indicateur ou un révélateur intéressant, mais ne doit jamais être pris tel quel. Il est impératif de le lier avec les deux autres indices pour bien faire la part entre conquête végétale, phénomènes saisonniers et densification du couvert. Evidemment, il est indispensable de prendre des images source de même saison, sinon les changements phénologiques perturberont irrémédiablement l'analyse de l'indice.

2 Quantification et tendances d'évolution

Nous avons étudié la sédimentation de la zone d'estran entre 1987 et 1993, certainement la période la plus critique et la plus incertaine depuis plusieurs décennies. En exploitant toutes les strates d'informations intégrées dans la série chronologique (tableau 1), nous avons pu quantifier (en termes de surface) l'avancée de la roselière sur les surfaces de vases nues entre 1979 et 1999. Les premières estimations effectuées avec les images multispectrales SPOT ont donné une première évaluation générale entre 1987 et 1997. La prise en compte de clichés aériens et d'images panchromatiques SPOT nous a permis un suivi plus précis et sur une plus longue période (figure 10).

Pour quantifier l'avancée du schorre sur la slikke, les essais de quantification par classification ou binarisation n'ayant pas donné de résultats satisfaisants, le front de progression a été digitalisé (figure 9) sur chacune des données listées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Dates des mesures effectuées et types de données employées

1979 - Photographies aériennes
 1985 - Photographies aériennes
 1987 - Image SPOT XS
 1988 - Image SPOT P
 1990 - Image SPOT XS
 1991 - Image SPOT P
 1992 - Image SPOT XS
 1993 - Image SPOT XS
 1994 - Photographies aériennes
 1997 - Image SPOT P
 1999 - Photographies aériennes

Figure 9 : Front de progression du schorre entre 1979 et 1999

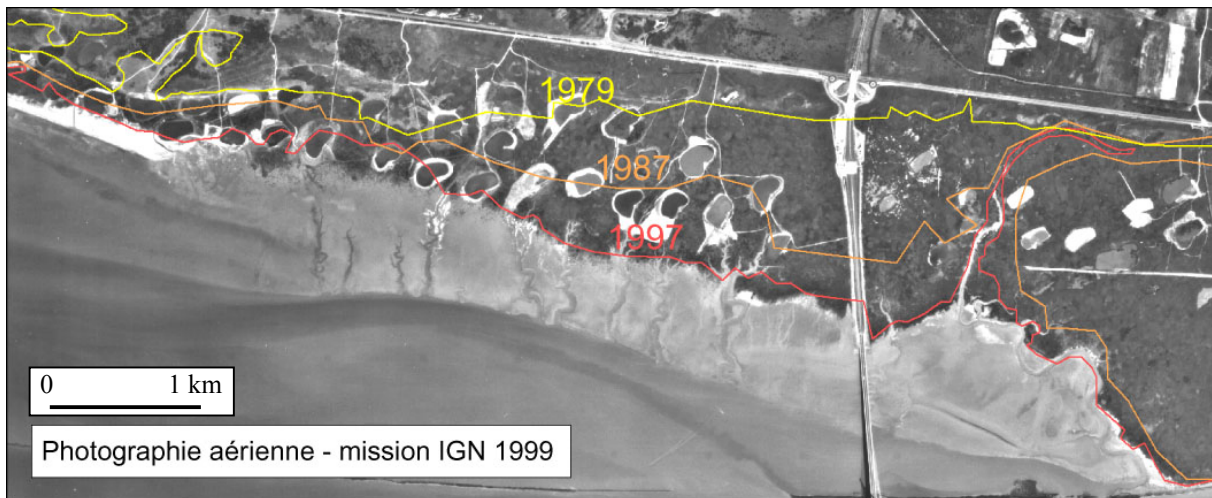
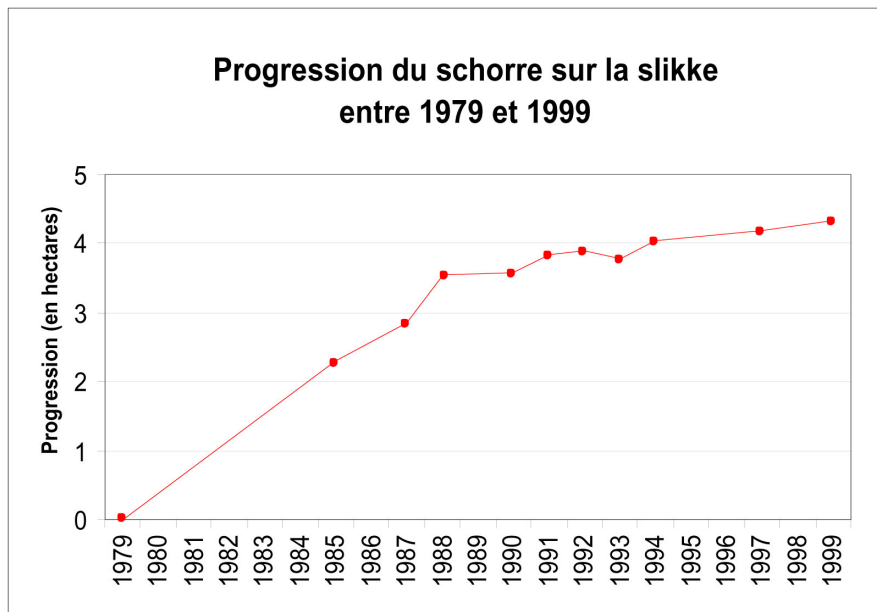


Figure 10 :Tendance d'évolution de la végétalisation des vasières nues entre 1979 et 1999



Ces données chiffrées sont très intéressantes et bien représentatives du phénomène de sédimentation dans sa globalité. Néanmoins, elles ne sauraient constituer autre chose qu'une tendance d'évolution générale. Seule une série chronologique constituée d'orthophotoplans numériques (actualisation irrégulière et prix exorbitant) par exemple, autoriserait l'appréhension du problème avec plus de finesse et moins d'incertitudes. De plus, grâce à la très haute résolution de ces données de télédétection aérospatiale, il serait possible de détecter les bancs herbus et autres espèces pionnières qui peuplent la zone de transition entre schorre et slikke.

Le remblai nord du pont de Normandie, construit entre 1987 et 1988 a indéniablement accéléré la sédimentation. Néanmoins, celle-ci semble se ralentir depuis, certainement à cause de l'accélération des courants due au rétrécissement de la zone du chenal, mais aussi à cause de l'accroissement des pentes généré par la sédimentation. Seul un suivi à plus long terme, c'est à dire l'acquisition de données antérieures à 1979 et l'actualisation régulière de la base permettront de vérifier ou d'étayer ces hypothèses.

Conclusion

La mise en œuvre de différents indicateurs de dynamique a autorisé l'élaboration d'un synopsis complet et précis des mutations paysagères qui ont affecté les vasières du marais du Hode. La répétitivité et la transposabilité de la méthodologie est bonne du fait même de la simplicité des indicateurs, mais il faut constamment avoir à l'esprit leurs limites respectives.

Il est assez difficile et parfois hasardeux d'imaginer l'évolution future de la zone d'estran, l'artificialisation et la sédimentation étant des phénomènes complexes, aux comportements souvent chaotiques. Néanmoins, les biotopes et les écosystèmes du marais du Hode, d'une rare richesse, sont maintenant classés en réserve naturelle, degré ultime de protection de l'espace. Ce classement n'empêche cependant pas des menaces indirectes telles que l'endiguement visant au rétrécissement du chenal de navigation en amont, la poldérisation en aval, et l'implantation du futur terminal conteneur Port 2000 de peser lourdement sur ces milieux.

Copyrights

Images SPOT © CNES 1987, 1993 et 1997 - Distribution SPOT Image ®

Photographie aérienne © IGN, Paris 1999

Bibliographie

AVOINE J., 1984, L'aménagement de l'estuaire de la Seine, conséquences sédimentologique, in *Journées de l'hydraulique*, pages 11 à 18

BESSINETON C., 1996, « L'environnement dans l'estuaire – les milieux et leur évolution », in *Atlas de l'estuaire de la Seine, Rouen : Publication des universités de Rouen et du Havre*, 155 pages

BONN F. et ROCHON G., 1996, *Précis de télédétection volume 2 – Applications thématiques*, Presses de l'Université du Québec, UREF & AUPELF, 633 pages

BONN F. et ROCHON G., 1992, *Précis de télédétection – volume 1 Principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec, UREF & AUPELF, 485 pages

BOURCIER A., 1994, *Télédétection et combinaison d'informations géographiques en mode image. Application à l'aménagement de l'estuaire de la Seine*, Thèse de doctorat, Département de géographie, Université de Rouen, 421 pages.

BOURCIER A., BOURCIER J.C., POUCHIN T., 1999, « Appréhension de la cinématique paysagère par télédétection spatiale en estuaire de Seine : contribution au Programme National de Recherche sur les Zones Humides », in *Actes du colloque « La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives »*, 8^o journées scientifiques de télédétection de l'AUF, 22-25 novembre 1999, Lausanne (Suisse), 22 pages

BOURCIER A., BOURCIER J.C., POUCHIN T., ROBINET F., 1999, *L'observatoire des zones humides – Zones humides de l'estuaire et des marais de Seine : structure, fonctionnement et gestion*, Rapport de l'exercice 1998-1999, projet pilote n°48, Programme National de Recherche sur les Zones Humides, CIRTAI, Université du Havre

- CIEPP (Comité Interministériel de l'Évaluation des Politiques Publiques), 1994, *Les zones humides, rapport d'évaluation*, La documentation Française, 391 pages
- KERGOMARD C., LAGANIER R., 2000, « Contribution de la télédétection à la caractérisation des zones humides de la plaine de la Scarpe (Nord) », in *Revue Internationale de Géomatique*, n°2/2000, vol.10, pages 241-256
- LIEGE F., 1997, *Étude des dynamiques paysagères par analyse de données multisources et multitudes*, Thèse de doctorat, LATES : Paris VI, décembre 1997
- MARCHAND J.-P., 1999, « Du Palus à SPOT : la délimitation des zones humides », in *Le droit des zones humides. Ed. Le Louarn, Paris, CNFPT, Economica*.
- MARCHAND Y., 1997, *Cartographies sédimentologiques et morphologiques par télédétection de la baie du Mont Saint-Michel (ouest de la France) -Comparaison de capteurs et de méthodes de segmentation d'images*, Thèse de doctorat, Ed. BRGM, Série "Technique et Méthode", n° 259
- MAS J.M., 2000, « Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement », in *Journal canadien de télédétection*, vol. 26, n°4 - août 2000, pages 349 à 362
- POUCHIN T., 1998, *Appréhension des mutations paysagères par télédétection spatiale en estuaire de Seine*, Mémoire de D.E.A., Université du Havre, Centre Interdisciplinaire de Recherche en Transports et Affaires Internationales (CIRTAI), UPRESA 6063 du CNRS, 117 pages
- SIMON & L. al, 2000, « Structure et dynamique forestière en milieu tempéré », in *Cybergéo n°171, 05 mai 2000*
- VERGER F., 1995, « Slikkes et schorres, milieux et aménagement », in *Norwis, 42ème année, tome 42, n° 165*, pages 235-245
- VINE P., PUECH C., 1999, « Cartography of Post-Fire Forest Regeneration by Coupling a Spectral Mixture Model with a Vegetation Regrowth Model », in *Journal canadien de télédétection*, vol. 25, n°2 - juin 1999