

Acteurs et données géographiques littorales

Jusqu'à présent les interactions simultanées des politiques envisagées, des enjeux de durabilité et des conditions écologiques n'étaient pas respectées par les approches sectorielles classiques. En effet, de nombreux intervenants se partagent le « droit » au littoral, créant des tensions en cas de mauvaises concertations ou d'intérêts contradictoires [RUOA, 2006]. Plusieurs pôles majeurs centralisent ces enjeux parfois divergents.

Le premier pôle concerne la **problématique environnementale** au travers des **programmes de recherche scientifique** sur l'étude et la protection des écosystèmes côtiers [RUOA, 2006], ainsi que la prévention des risques naturels présents (érosion côtière¹, tsunamis, inondations).

¹ <http://www.eurosion.org/>

A ces problématiques s'ajoutent de nombreuses **applications cartographiques** en géologie (IFREMER, BRGM) et des thématiques plus géographiques centrées sur la remise à jour du trait de côte² ([Allain et al., 2000], [Le Berre et al., 2004]) ou l'établissement des cartes marines (SHOM). De façon plus marginale, le besoin de cartographie continue du littoral intervient dans beaucoup d'applications militaires sur la frange littorale. Elles concernent les problèmes de débarquement des troupes ou de véhicules amphibies sur des rivages.

A cette préservation du milieu s'opposent les **activités d'aménagement du littoral** d'une part et les activités **économico-industrielles** d'autre part. Les premières concernent les aménagements urbain, touristique et de loisirs, tandis que les secondes représentent les constructions industrielles : installations portuaires, usines à énergie marémotrice. Les activités économiques ont trait à l'exploitation des ressources maritimes et de l'estran (pêche, aquaculture).

L'ensemble de ces acteurs ont besoin d'une connaissance précise du littoral ainsi que d'une représentation suffisamment fine pour obtenir une bonne compréhension des phénomènes étudiés et orienter au mieux les décisions envisagées. Ceci passe par l'intermédiaire d'informations acquises soit par des organismes publics, soit par des sociétés privées dans le cadre de programmes de recherche spécifiques.

Parmi toutes les données collectées, le **modèle numérique de terrain** (MNT) tient une place importante en raison de sa capacité à modéliser l'environnement d'étude au plus proche de la réalité ([Li et al., 2005]). Il permet de localiser dans un espace géographique un phénomène (répartition biologique, construction, courant marin, etc.), tout en permettant un déplacement dans une dimension supplémentaire. En effet, il représente le relief à la manière d'une carte avec d'autres informations majeures : l'altitude et ses dérivées. Même s'il n'intervient pas directement dans les études, il sert de support pour la majorité des informations collectées grâce à son impact visuel fort :

- l'impact des mécanismes d'érosion, et donc de l'évolution du trait de côte, est fortement dépendant de la force des vagues et de la « rudesse » du paysage concerné (altitudes hautes ou basses, reliefs émoussés ou à crêtes saillantes) ;
- un plan de prévention des risques utilise un MNT pour prédire les zones potentiellement inondables suite à une montée des eaux, que ce soit en raison de grandes marées ou de tsunamis (raz de marée). L'étude des raz de marée utilise le calcul des pentes et de leur angle de stabilité : la formation de ces vagues meurtrières est induite par un glissement de terrain provoqué lors d'un tremblement de terre ;
- l'aménagement du littoral s'appuie également sur une vision du milieu pour étudier le rendu d'un ouvrage important (pont, barrage), ou tout simplement l'impact, aussi bien visuel qu'écologique, d'une construction touristique ;
- en biologie marine, la finesse d'un MNT permet de prédire les lieux privilégiés d'habitats côtiers (dans les infractuosités par exemple) ;
- toute étude multi-échelle ou temporelle de la géodynamique d'un milieu en géomorphologie repose sur un modèle de relief.

Dans ce cadre, un logiciel capable d'importer et de gérer un grand nombre de données de sources variées impose la reconsidération de leur cohérence et de leur complémentarité.

2 Continuité et cohérence au sein des données géographiques

La vulgarisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) a considérablement favorisé l'échange d'informations ainsi que la concertation entre ces divers intervenants au

² Notamment : <http://www.logicacmg.com/coastchart/default.htm>

travers d'une vision d'ensemble du littoral. Un SIG est un logiciel informatique capable d'organiser et de présenter des données numériques spatialement référencées en vue de les analyser ou de les cartographier.

En parallèle, ce mouvement est favorisé par le constat de la nécessité réelle de mettre en place une politique globale de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) qui ne soit plus dépendante des secteurs économiques ou des communautés urbaines. Il y a donc un besoin croissant de données suffisamment **homogènes** pour croiser les informations, et **continues** dans le temps (pour les visions à long terme) et dans l'espace littoral (pour le suivi des phénomènes naturels qui ignorent les frontières terrestre/marin). Ces requis impliquent une reconsidération des méthodes de production des données et de leurs traitements.

En effet, en France (comme dans certains autres pays, européens ou non), la majorité des données littorales disponibles est acquise par des organismes publics différents selon le milieu considéré : le service hydrographique de la marine (SHOM) pour la bathymétrie et l'institut géographique national (IGN) pour la topographie. Certains problèmes surviennent alors : référentiels, systèmes de coordonnées, formats de données, standards utilisés, méthodes d'acquisition différentes et surtout continuité de l'information non assurée.

Tout ceci entraîne la présence simultanée de plusieurs bases de données géographiques qui fournissent des représentations du milieu qui varient selon les spécifications, l'échelle de saisie, la qualité, l'actualité. Ces différences sont susceptibles d'engendrer des réponses discordantes sur une requête faite via un SIG ou lors d'un travail de synthèse d'informations. Il est donc impératif de mettre les données en cohérence, ou de disposer d'un standard (comme par exemple le format S57 du SHOM), avant toute analyse. Par ailleurs la majorité des activités ignore les frontières (phénomènes de pollution par exemple), ce qui implique également de disposer de données ininterrompues.

3 Contexte de recherche

Le manque de cohérence et de continuité des données a entraîné la mise en place depuis une trentaine d'années, aux niveaux **international** et **national**, de programmes relatifs à la gestion intégrée des zones côtières et de recherches scientifiques dans ce domaine.

EuroSDR³ (European Spatial Data Research) [EuroSDR, 2007] est un organisme européen établi à Paris en 1953 qui comprend dix-sept pays au travers d'organisations géographiques nationales, d'instituts de recherche et d'entreprises du secteur privé. Il a pour finalité d'identifier les besoins de la recherche au niveau du financement de la gestion et de la distribution de données spatiales. Ceci se réalise notamment grâce à des collaborations internationales sur des projets de recherche ou des conférences. L'objectif est de déterminer et de documenter l'état de l'art et les progrès effectués en Europe au niveau de l'intégration de bases de données marines et terrestres. Les rapports issus des différentes conférences ont montré la nécessité :

- de définir un standard de données spatiales (nommé S-100 en référence au format actuel des données marines S-57) afin de faciliter l'échange de données hydrographiques ;
- de promouvoir ce format auprès des organismes géographiques ;
- et de planifier au niveau des organismes participants des campagnes d'acquisition continue du littoral.

³ http://www.eurocdr.net/workshops/landsea_2007/organisers.htm

L'association **Eurocoast**⁴ (**European Coastal Association for Science and Technology**), fondée en 1989, représente un regroupement de scientifiques, ingénieurs et acteurs de la prise de décision en milieu littoral. Les objectifs de cette association sont, en premier lieu, de créer un réseau d'échange et de coopération technique sur des sujets relatifs à la protection, au développement et à la gestion des zones côtières, et ainsi améliorer les connaissances existantes dans ce domaine. En second lieu, elle vise à promouvoir les recherches inter disciplinaires ainsi que la synthèse de thèmes communs entre utilisateurs de domaines différents.

Son objectif global est la conception d'une base de données comportant tous les aspects de la zone côtière et sa large communication au sein de la communauté scientifique. Par exemple, en 2002, cette association a permis des échanges internationaux pour la mise en place d'un projet de gestion intégrée des zones côtières (**ICZM**⁵) en Ukraine⁶.

Parmi les multiples symposiums centrés sur la thématique de la gestion côtière, **CoastGIS**⁷ se démarque par ses orientations SIG et cartographie assistée par ordinateur appliquée aux domaines côtiers et marins. La première rencontre CoastGIS, qui a eu lieu à Cork (Irlande) en 1995, n'avait pas une thématique bien définie mais a servi « d'état de l'art – bilan » aux groupes d'intérêt variés alors participants. Depuis, tous les deux ans, ce symposium constitue un portail d'échanges complémentaires et interdisciplinaires entre experts du SIG et spécialistes côtiers. Le but est d'initier un partage d'expérience et/ou de connaissances entre chercheurs et ingénieurs tout en favorisant des collaborations mutuelles. Il vise également à utiliser l'expertise scientifique aux travers de SIG afin de résoudre les problèmes de gestion côtière.

En parallèle à ces organismes et congrès, de nombreux programmes européens ont été lancés avec des thématiques assez diverses mais concernant toute la recherche et le développement en milieu littoral : les programmes successifs **ROCC** et **PROTECT** visent à étudier l'érosion des falaises de craie du littoral de la manche. **EUROSION** et son successeur **RESPONSE** étudient l'érosion côtière en général, tout en prenant en compte les problèmes de variations côtières et l'apparition de risques liés aux changements climatiques.

Au niveau **national**, le projet **Litto 3D** [Louvart & Gateau, 2005] a été initié pour répondre à une directive européenne datant de 2002. En effet, suite aux catastrophes pétrolières successives, l'Europe a décidé de renforcer sa politique environnementale côtière en recommandant aux états membres d'effectuer un inventaire détaillé du littoral. En France, les deux organismes de cartographie, l'IGN et le SHOM, se sont alors associés pour mettre en commun leurs compétences. Une gestion optimale du littoral nécessite de prendre en compte plusieurs thématiques :

- environnementales, au travers du suivi du trait de côte sous l'effet de l'érosion, de la protection du domaine côtier et de la protection de la faune et de la flore ;
- humaines, avec la prévention des risques d'inondation, de pollution, ou de catastrophes naturelles ;
- d'équipement, avec les aménagements de loisirs ou industriels ;
- économiques, avec l'exploitation des ressources maritimes ;
- de recherche scientifique, avec l'étude des écosystèmes spécifiques à l'estran, ou de l'impact des marées noires sur la faune et la flore par exemple ;

⁴ <http://www.eurocoast.org/index.html>

⁵ <http://ec.europa.eu/environment/iczm/home.htm>

⁶ <http://www.eurocoast.org/ukraine%20project.pdf>

⁷ <http://www.coastgis.org/>

- militaires, dans le cadre de débarquements de troupes et d'applications amphibies.

Suite au bilan de ces besoins, le constat a été fait que les données existantes dans le domaine étaient insuffisantes au niveau de leur précision, de leur validité et de leur continuité. En effet, les données bathymétriques du SHOM sont de grande précision mais discontinues dans le temps et l'espace. A l'inverse, les données de l'IGN sont denses avec une grande fréquence d'acquisition mais insuffisamment précises pour produire des cartes de navigation ou d'estimation de risque lié à l'érosion ou autres phénomènes côtiers. Dans ce cadre, il a été décidé de procéder à la réacquisition complète du littoral à l'aide de nouveaux moyens de mesure. Dans l'attente de la production de cette cartographie exhaustive du littoral, une base de données historique, **Histolitt** [Louvart & Grateau, 2005], a été constituée à partir des bases de données du SHOM et de l'IGN. Au final, cette base de données comporte une densité d'information bien supérieure à celle figurant sur les cartes, car elle rassemble toutes les données historiques collectées depuis la création des deux organismes.

De même, au niveau de la recherche française, la problématique plus large de l'intégration de représentations multiples est traitée par l'**axe de représentations multiples de l'information géographique**, antenne du Groupe de Recherche SIGMA⁸ (Systèmes d'Information Géographique, Méthodologies et Applications) dit CASSINI. L'objectif de ce groupe de travail est de proposer des méthodologies facilitant la multi représentation en fonction des besoins et permettant la gestion conjointe de données disponibles à différents niveaux de détail. La multi représentation naît de différentes traductions de phénomènes naturels ou anthropiques complexes, dans des bases de données géographiques ou des cartes, selon les spécifications, le modèle attendu, les besoins des utilisateurs et/ou les objectifs de l'application. Elle se traduit par des niveaux de détail, des représentations de simulation, des représentations temporelles ou des points de vue différents, nécessaires à une bonne prise de décision.

Les données possédant de multiples représentations du même phénomène entraînent des difficultés lors du processus d'intégration et de fusion. C'est pourquoi le but final de ce groupe de travail est de proposer un formalisme et/ou des méthodologies qui permettent d'intégrer la représentation multiple dans la gestion de l'information géographique sous toutes ses formes. De nombreux intervenants travaillent sur l'intégration de bases de données vectorielles, l'appariement automatique [Mustière & Devogele, 2008], l'évaluation de la cohérence entre les représentations [Sheeren, 2005] ou entre MNT dans un contexte de risques [Rousseaux, 2005]. Leurs approches offrent une vision complémentaire à cette thèse au niveau de la gestion des incohérences entre représentations, de la problématique d'appariement⁹ ou de l'intégration.

En parallèle, le groupe de recherche **SIG** de l'institut de recherche de l'école navale (**IRENav**) a donné à cette thèse son aspect interdisciplinaire entre les divers domaines de la géographie, de l'informatique, et de la géomatique. En effet, les axes de recherche de ce groupe se focalisent sur la modélisation et l'analyse de l'information spatiale et temporelle dans les SIG à deux et trois dimensions appliquées au contexte maritime. Ils s'organisent selon deux axes majeurs :

- le développement de modèles spatio-temporels d'intégration et d'analyse de l'information géographique ;

⁸ <http://recherche.ign.fr/labos/cogit/sigma/index.htm>

⁹ Processus qui vise à identifier entre deux bases de données les représentations du même phénomène du monde réel.

- le développement de modèles de représentation et de traitement des données maritimes dans les domaines du transport et de la sécurité maritime.

Ces thématiques comprennent le raisonnement spatial et temporel, la géométrie algorithmique et géomorphométrique et la conception de SIG. Le sujet de cette thèse se place donc transversalement entre ces domaines d'études : premièrement parce qu'elle tient compte des changements morphologiques temporels, sources d'incohérences lors du processus d'intégration [Sriti et al., 2005]. Deuxièmement parce qu'elle se base également sur la caractérisation de relief via ses éléments topographiques [Saux et al., 2004]. Et finalement parce qu'elle reprend les travaux développés par [Devogele, 2002] sur l'appariement de bases de données à l'aide de l'algorithme de Fréchet. Toutes ces notions sont utilisées afin de réaliser un outil SIG d'intégration de MNT basé sur l'analyse du paysage littoral afin de proposer une représentation continue terre/mer. En effet de nombreuses organisations ou organismes gouvernementaux ont établi l'importance et la nécessité de posséder une cartographie complète et précise du littoral.

4 Démarche et problématique

Pour faire face à cette demande, de nombreux programmes de recherche et de campagnes de ré acquisition ont été lancés. Cependant il n'existe aucune indication sur la manière de traiter par la suite ces données au mieux afin d'obtenir une représentation continue ni comment les intégrer avec celles déjà existantes. Cette étape a longtemps été considérée comme secondaire. Néanmoins elle entraîne de nombreuses erreurs et imprécisions liées aux traitements effectués parfois de manière non appropriée. En effet, les processus d'intégration employés sont définis selon un jeu de données spécifique ayant une qualité qui lui est propre, et la connaissance qu'a l'utilisateur du milieu qu'il étudie. Il en résulte la plupart du temps, la mise en place de méthodes ponctuelles non réutilisables dans un autre contexte. L'idéal serait de pouvoir disposer d'outils permettant dans un premier temps un pré traitement générique des données et dans un deuxième temps, en cas de difficultés, de permettre à l'utilisateur de décider des traitements les meilleurs. Ceci se rapproche de ce qui est réalisé pour l'intégration de bases de donnée géographiques.

La démarche ici est donc d'établir un lien entre les domaines de la géométrie algorithmique, de la géomorphologie et enfin des systèmes d'information géographique au travers de l'intégration de données Terre/Mer. Les processus d'intégration actuellement décrits font appel à des notions et des outils développés par la géométrie algorithmique et appliqués aux bases de données géographiques multi représentations (deux dimensions). Les données Terre/Mer utilisées dans ce travail sont des modèles numériques de terrain (trois dimensions) pour lesquels très peu d'outils SIG ont été développés.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie d'intégration de MNT de manière à obtenir une représentation continue la plus exacte possible en fonction des données disponibles. Pour cela divers outils SIG sont nécessaires. Certains des outils identifiés ont donc été implémentés afin de répondre à cette attente. Cette thèse se place ainsi à la frontière entre la géographie, la géométrie algorithmique, et les SIG (voir figure 1).

La géographie, par l'intermédiaire de la géomorphologie littorale apporte la compréhension nécessaire du paysage pour réaliser une intégration pertinente des MNT. La géométrie algorithmique met à disposition des outils de comparaison et d'appariement d'objets linéaires, ponctuels ou surfaciques. La programmation de ces outils permet d'effectuer une fusion de ces objets. Les SIG, par la visualisation de ces données nouvellement intégrées, offrent une multitude d'applications possibles.

Le point fort de la méthodologie présentée est qu'elle est générique à tous types de MNT (issus du programme Litto3D ou antérieurs) mais s'adapte aux divers paysages traités dans les modèles numériques. Ainsi, les éléments qui font la particularité d'un relief sont conservés. L'originalité de cette préservation de l'information clé du relief est d'éviter une perte de l'information pertinente pour des modélisations ultérieures (présence ou non d' « accidents » dans le paysage).

Les différentes étapes d'intégration impliquent premièrement de pouvoir mesurer des similitudes entre objets issus de deux bases de données. A partir de ces mesures il s'agit de déterminer si les deux objets étudiés représentent bien le même phénomène du monde réel ou non (appariement). Les outils de comparaison et d'appariement qui permettent de réaliser cette étape sont issus de ceux déjà existants pour les données 2D.

Ensuite les différents types de relief sont identifiés au sein de chaque modèle numérique de terrain. Une typologie basée sur des connaissances en géomorphologie du littoral recense de manière exhaustive les diverses classes de paysages côtiers.

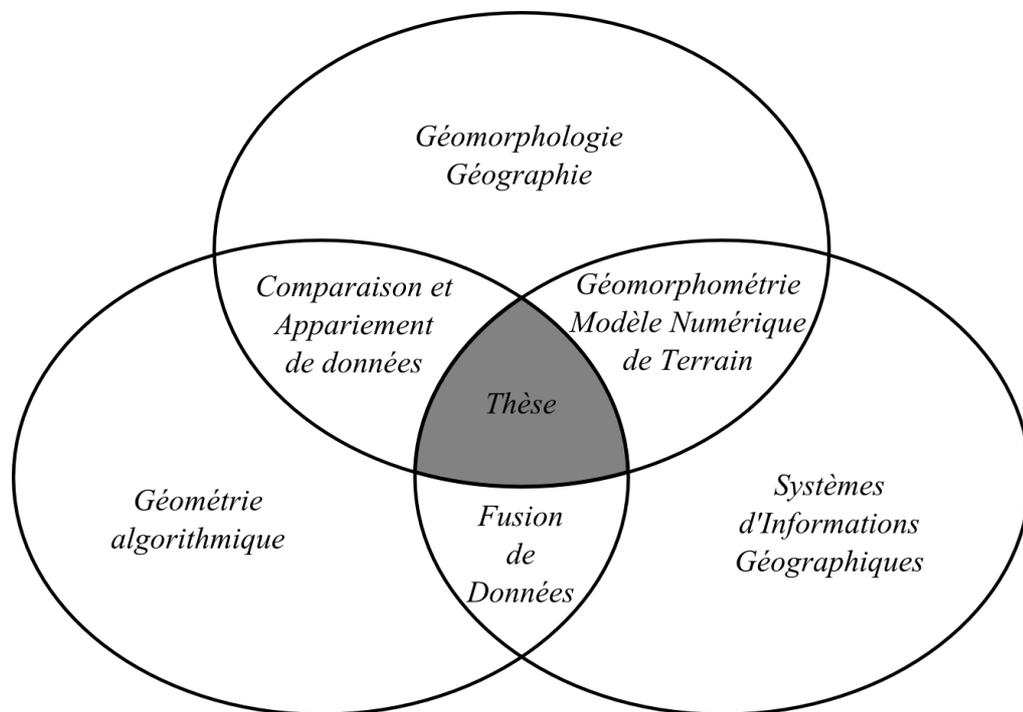


Figure 1 : Positionnement de la thèse.

Cette typologie est alors complétée à l'aide de valeurs numériques données par la géomorphométrie. Ces valeurs permettent l'extraction des reliefs identifiés par la typologie dans n'importe quel MNT. Par ailleurs, des algorithmes de traitement ont été suggérés pour chaque type paysager en fonction de ses caractéristiques. De cette manière il est possible d'adapter les traitements effectués sur le modèle et ainsi préserver les informations importantes lors de l'intégration.

La **méthodologie d'intégration** mise en œuvre a pour but de produire au final un modèle continu et cohérent entre les divers modèles. Elle effectue pour cela un enchaînement de traitements répartis en trois phases principales qui visent à préparer au mieux les données au processus d'intégration (conversion dans un système cartographique, enrichissement et segmentation des modèles, appariement, etc...). L'intérêt de cette méthode est qu'elle travaille de manière relative sur les données elles-mêmes. Elle s'affranchit donc des problèmes de positionnement, de variabilité temporelle ou de différence de qualités. En conséquence, elle permet d'intégrer des données déjà existantes comme des données

nouvellement produites avec les mêmes considérations paysagères. En ce sens, elle se veut adaptative tout en étant générique.

5 Plan de thèse

Les différentes phases de la méthodologie d'intégration sont directement dépendantes des outils sur lesquels elle se base. Par exemple la fusion proprement dite ne pourra s'effectuer qu'après une étape préalable de recalage des données et de la détection des éléments représentant le même phénomène du monde réel.

La première partie de cette thèse réalise tout d'abord une description de l'ensemble du milieu littoral, des agents édificateurs du relief présents et des classes de paysages rencontrés sur les côtes. Elle définit ensuite les termes utilisés lors du processus d'intégration et pose ainsi les fondements des processus d'intégration pour des données 2D. En complément, elle détaille la structure des données 3D et ce qui a été établi dans le domaine de la fusion de MNT.

Les algorithmes de fusion choisis suite à l'état de l'art et les types de relief à traiter étant connus, il est nécessaire dans une seconde partie d'expliquer quelles sont les extensions imposées pour réaliser cette intégration, conformément aux objectifs définis.

Une troisième partie effectue la synthèse de tout ce qui a été introduit précédemment en décrivant en détail la méthodologie d'intégration proposée et son application sur des données simulées simples. L'application à ce type de données permet de vérifier la robustesse des outils implémentés, et ainsi les valider, mais également d'en mesurer les limites et de proposer des améliorations futures.

La conclusion dresse un bilan des apports de cette thèse vis-à-vis du processus d'intégration. En perspectives, elle propose également des améliorations des outils développés en vue d'une chaîne de traitement la plus automatique et complète possible.