



UNIVERSITÉ D'ORLÉANS



ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ

CEDETE (EA 1210)

THÈSE présentée par :

HUSSEIN EL HAGE HASSAN

Soutenue le : **27 Juin 2011**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline : **GEOGRAPHIE**

**Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des
évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du
risque érosif dans la plaine de la Bekaa (LIBAN).**

Exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi

THÈSE dirigée par :

**Madame Françoise ARDILLIER-CARRAS,
Monsieur Laurent TOUCHART,**

Professeur, Université d'Orléans
Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

**Monsieur Michaël DAVIE,
Monsieur Jean-Noël SALOMON,**

Professeur, Université de Tours
Professeur, Université de Bordeaux 3

JURY

**Madame Françoise ARDILLIER-CARRAS,
Monsieur Michaël DAVIE,
Monsieur Abdulrahim IBRAHIM,
Monsieur Jean-Noël SALOMON,
Monsieur Laurent TOUCHART,**

Professeur, Université d'Orléans
Professeur, Université de Tours
M.C., Université Libanaise
Professeur, Université de Bordeaux 3
Professeur, Université d'Orléans

INTRODUCTION GENERALE

1-Problématique.

L'observation de l'évolution de l'occupation du sol est de plus en plus indispensable, à la fois pour la connaissance d'un territoire et pour son aménagement. Le développement des techniques de la télédétection et du système d'information géographique permet une approche de plus en plus précise. En effet, il s'agit souvent des seuls moyens permettant la connaissance des terrains interdits à l'observation ou dangereux. Nous avons choisi cette méthode pour observer l'évolution de la plaine de la Bekaa au Liban.

L'évolution du couvert des sols se définit comme un processus dynamique assez complexe, qui dépend à la fois de facteurs physiques et socio-économiques. Nous entendrons par couverture du sol la végétation (naturelle ou conduite par l'homme) et les structures anthropiques (constructions, routes...).

La plaine de la Bekaa, notre région d'étude, qui est une région à forte production agricole, a connu au cours des cinquante dernières années une évolution importante dans le couvert urbain et surtout dans le couvert végétal, essentiellement due aux changements sociaux, économiques, voire politiques. L'évolution constatée nous pousse à chercher les causes et les conséquences du changement du couvert du sol afin de mettre en place une politique pour développer le secteur agricole et protéger l'environnement.

Cette région intérieure présente deux types d'unité géomorpho-dynamique :

- les versants des monts Liban et Anti-Liban à forte valeur de pente, lithologie différenciée et affleurente dans certains endroits causée par l'érosion hydrique, sol peu profond, végétation claire, existence de chenaux d'écoulement, qui posent un problème sur les parcelles agricoles.

- la plaine caractérisée par sa platitude, par l'épaisseur des sols et l'absence d'affleurement géologique et surtout par la présence d'une agriculture.

A l'échelle locale, il s'agit de distinguer les types d'érosions dans un système « naturel » de montagne, de celles d'un agro-système où les contraintes de développement des processus et les processus eux-mêmes sont très différents. Nous prendrons en compte le contexte méditerranéen, la répartition saisonnière des précipitations, leur intensité, la longueur de la période sèche (qui dure 3 mois au moins en été), suivie d'une période pluvieuse en automne-hiver, ainsi que l'environnement social et politique, particulièrement important au Liban. Cela nous pousse à poser de nombreuses questions sur l'avenir de l'agriculture et l'environnement dans cette région.

- Comment appréhender le changement d'occupation du sol afin d'envisager des solutions pour aménager les terrains et lutter contre l'érosion hydrique des sols?

Figure n ° 1 : Image satellite du Liban et localisation de notre région.

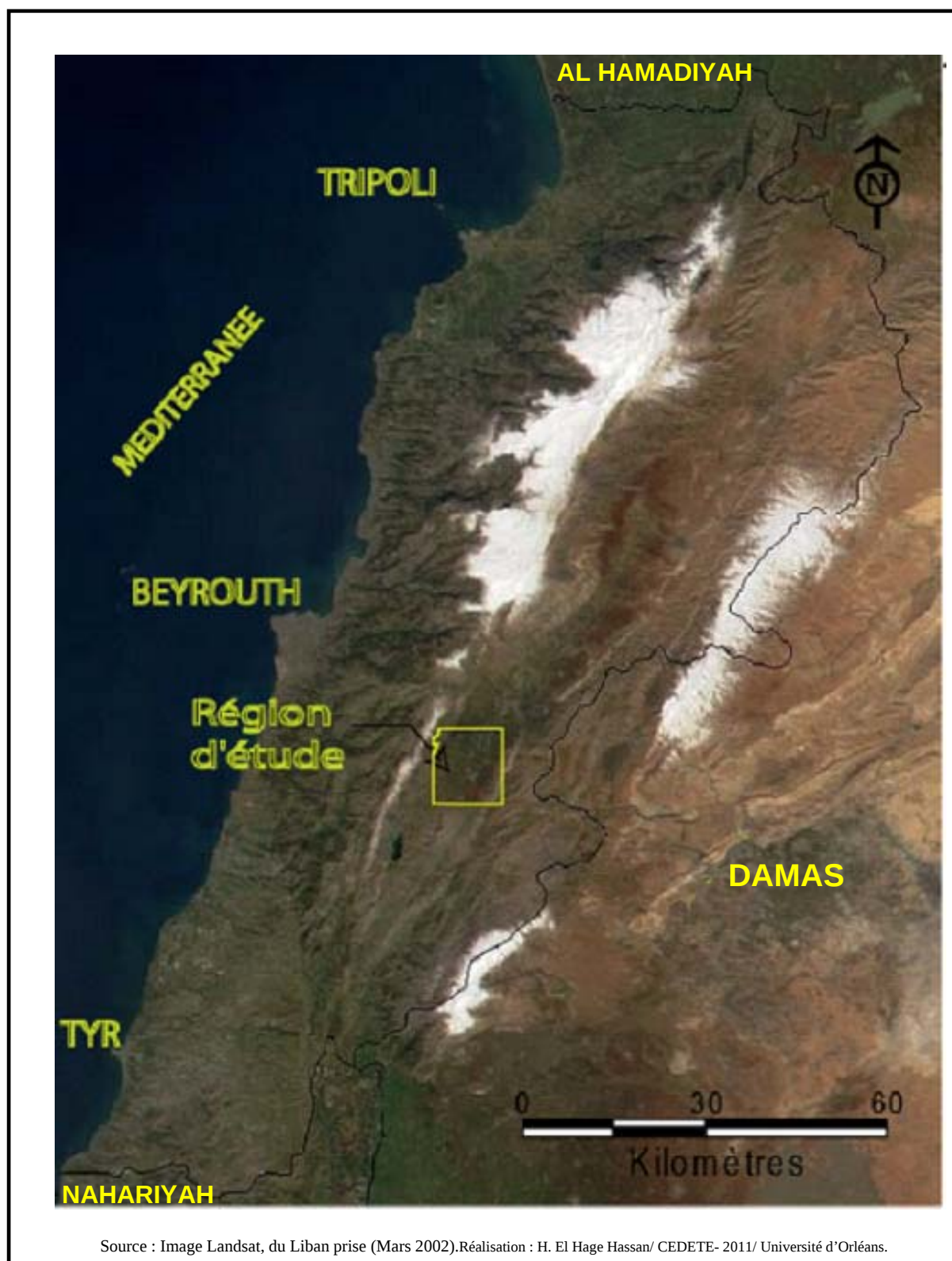
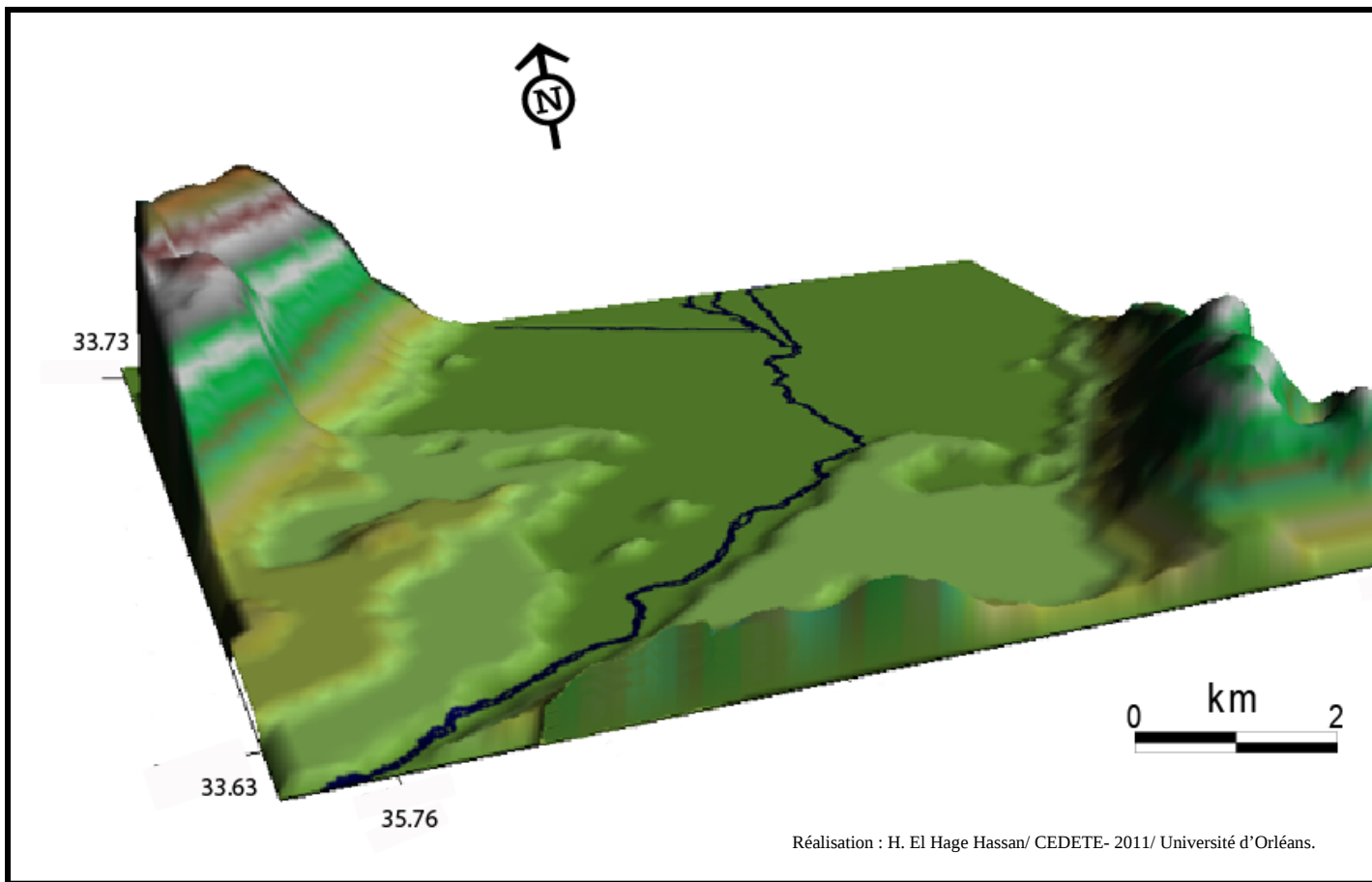


Figure n°2 : La région d'étude à partir du modèle numérique du terrain dont les courbes de niveau sont distantes de 10 mètres.



Cette figure de la région en question montre l'exemple de deux types d'unité géomorphodynamique : les versants et la plaine. Nous remarquons que la rivière Litani (rivière) traverse la plaine en se dirigeant du nord vers le sud ouest.

3-Choix du terrain

Notre choix s'est porté sur un pays de la méditerranée orientale, le Liban, dans la mesure où ce pays possède encore une agriculture importante, y compris dans des secteurs de marge climatique semi-désertique. Cette activité est, de plus, appelée à se développer. Mais les conditions géopolitiques qui créent une forte insécurité et qui rendent difficile le travail de terrain, ainsi que l'enquête socio-économique, nous ont conduits à privilégier l'approche par le SIG.

Nous pouvons rappeler que le Liban se situe dans la partie orientale du bassin méditerranéen et s'étend sur une longueur de 210 km et sur une largeur de 25 à 50 km. Le territoire libanais prend ainsi une forme quasi-rectangulaire sur une superficie de 10 452 km². Situé entre 33°10' et 34°40' de latitude Nord et entre 35° et 37° de longitude Est, il est au cœur de la zone tempérée nord. A cela s'ajoute le fait que le Liban est dans un système global méditerranéen dans la mesure où il fait partie de la zone ouest asiatique avec une côte méditerranéenne.

Pour notre région d'étude, nous avons choisi, à l'intérieur du Liban, un secteur de la région de la Bekaa ouest, située entre 35°N et 33°E. L'étude portera sur une surface de 136 km². À l'intérieur de cette région, il sera choisi des secteurs de plus petites tailles pour lesquels nous disposons d'informations plus abondantes et sur lesquels nous ferons porter nos efforts. Cette région couvre une surface quasi-plane insérée entre les chaînes occidentales (Mont Liban) et orientales (Anti-Liban). A ses extrémités Nord et Sud, l'altitude peut varier entre 500 et 900 m, lui conférant ainsi un paysage légèrement vallonné, sous un climat à affinité sèche.

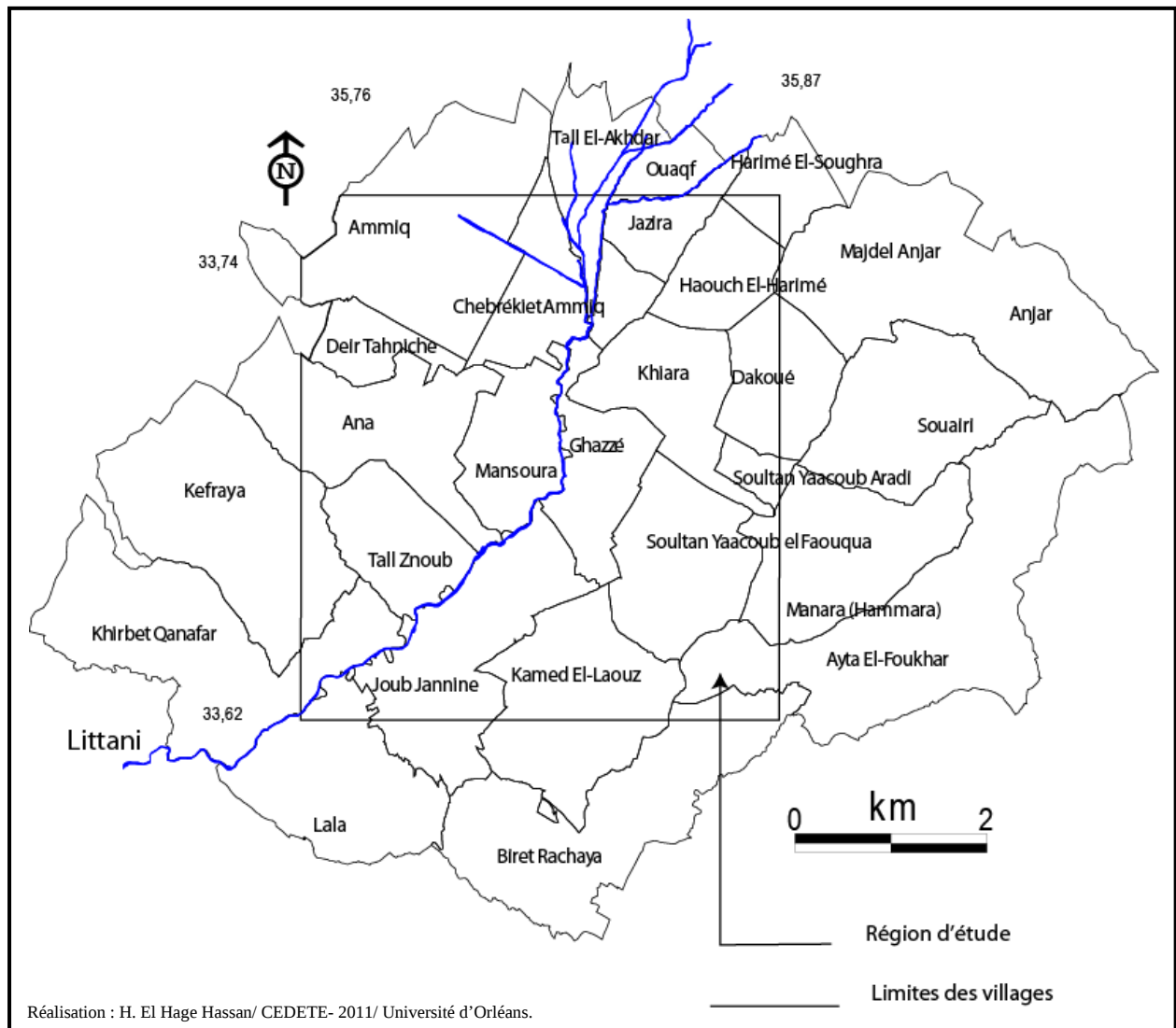
Au départ, nous avons envisagé d'étendre notre région d'étude sur une surface plus grande avoisinant les 500 km², couvrant ainsi la totalité de la Bekaa ouest et débordant sur les deux départements de Rachaya et Zahlé. Mais les événements qui se sont déroulés au Liban durant les années de la thèse, surtout à partir de l'année 2006, ont rendu l'accès à certains endroits de notre terrain d'étude difficile. Cela nous a donc contraints à rétrécir notre région d'étude, afin de pouvoir réaliser des contrôles sur le terrain pour valider la photo-interprétation.

Toutefois, en dépit de sa petite taille, la région étudiée est parfaitement représentative de l'évolution observée dans la plus grande partie de la Bekaa (climat, fonctionnement socio-économique...).

La région d'étude est une région intérieure à l'abri de reliefs, où l'on peut remarquer des zones de piémont, limitée par les chaînes occidentales et orientales ; elle est à tendance climatique sèche et l'on note des processus de risque d'érosion hydrique forte, notamment dans les zones de piémonts. C'est une région peuplée, agricole, importante pour l'économie libanaise ; de ce fait elle est particulièrement intéressante pour les enjeux socio-économiques qu'elle constitue.

Enfin, c'est une région sur laquelle des travaux de recherche ont déjà été effectués. Il y a des données disponibles au FAO, au CNRS Libanais, au Ministère de l'agriculture et au Ministère de la Défense (direction des affaires géographiques et géodésiques). Ces données constituent une première étape dans notre recherche. Et pour nous, il s'agit surtout de montrer une méthode que l'on puisse appliquer à d'autres terrains.

Figure n°3 : Présentation de la région d'étude



La figure n°3 nous montre les différents villages de la région de la Bekaa ouest. Nous avons délimité notre secteur d'études par le carré figurant sur la carte. Certains villages seront étudiés entièrement, compte tenu de la disponibilité des données et de la situation politique, ce qui ne pourra pas être le cas pour d'autres.

5-Historique des méthodes et modèles utilisés pour estimer l'érosion hydrique des sols :

De nombreuses recherches et articles ont été réalisés sur les risques de dégradations des terres agricoles, simultanément avec le développement de la population mondiale. Différentes approches ont été conçues pour évaluer le risque d'érosion hydrique. Toutefois, nous pouvons distinguer des approches qualitatives basées sur l'expertise et des approches quantitatives.

-Les approches basées sur la modélisation.

En 1958, Wischmeier et Smith ont mis en place un modèle, quantitatif et empirique, pour estimer les pertes en sol provoquées par l'érosion hydrique : Universal Soil Loss Equation (USLE). En 1978, ces chercheurs ont établi le modèle RUSLE, celui ci est une équation multiplicative de plusieurs indices :

$$\text{Les pertes en sol (A)} = R * K * SL * C * P$$

L'érosivité des pluies (R) est calculée en fonction de l'énergie cinétique des pluies. L'érodibilité des sols (K) dépend des matières organiques, de la texture, de la perméabilité et de la structure du sol. La topographie (SL) dépend de la longueur et de l'inclinaison de la pente. Le couvert végétal (C) est variable d'une saison à l'autre. Ils ont aussi pris en compte les pratiques utilisées pour limiter le risque érosif (P).

Même si ce modèle, (USLE), qui est conçu pour estimer les taux annuels d'érosion sur le long terme dans les zones agricoles, est très utilisée grâce à sa simplicité et sa fiabilité, il ne s'applique jamais à l'érosion linéaire ni à l'érosion en masse, mais il s'applique qu'à l'érosion en nappe. En plus, ce modèle attribue une grande valeur au facteur topographique par rapport à d'autres facteurs. Ce modèle est établi pour des conditions de milieux existants aux Etats Unis ce qui signifie que ce modèle ne peut pas être appliqué tel qu'il est dans les pays méditerranéens (Cormary et Masson 1964).

En 1985, Frenette M. et *al.*, ont développé un modèle nommé LAVSED pour prédire l'érosion des bassins et le transfert de sédiments dans les cours d'eau nordiques. Ce modèle qui étudie les précipitations, les caractéristiques du bassin, l'érosion, la sédimentation et l'exploitation du territoire, est basé sur l'équation universelle de pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1965) ainsi que sur l'équation de Kiline et Richardson, qui est basée sur l'intensité de pluie, reliant l'érosion aux caractéristiques hydrauliques de ruissellement. A partir de ces données et de ces équations, les chercheurs ont établi la carte du risque érosif des bassins et ils ont déterminé les apports de solides aux cours d'eau. Le LAVSED, comme le (USLE), donne une grande importance à l'érosion en nappe par rapport à l'érosion linéaire.

En 1982, Morgan et *al.*, ont créé le modèle Silsoe qui permet de calculer la production des sédiments causée par les pentes dans la partie du nord-ouest de l'Iran. Dans ce modèle, le chercheur sépare le détachement du transport des matériaux. La carte de détachement des matériaux dépend de l'intensité de la pluviométrie, de la couverture végétale et du sol. Elle doit être comparée à la carte du transport qui, elle, est fonction de la couverture du terrain, du ruissellement et de la pente. Ce modèle ne prend pas en compte l'impact de la vitesse d'écoulement sur l'érosion. De ce fait ce modèle ne note aucun transfert d'écoulement en bas en pente.

En 1995, Kirkby a établi le modèle MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use pour le niveau régionale. Ce modèle, qui été conçu pour déterminer le ruissellement et la sédimentation, nécessite une grande quantité de données. Malgré la performance de ce modèle pour évaluer les sédimentations au cours des inondations, il se montre peu performant pour évaluer le ruissellement.

En 1997, De Jong et Riezebos ont établie le modèle SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean Areas). Celui-ci, qui est intégré dans un SIG, permet d'élaborer plusieurs produits intermédiaires, cartes de ruissellement, carte de la capacité de détachement et du transport (Bou kheir 2002), et permet également d'identifier les zones vulnérables à l'érosion. Malgré les avantages de ce modèle, nous constatons que les résultats dépendent de la précision des données des sols ; de plus, ce modèle ne prend pas en compte l'encroûtement de la surface des sols.

En 1997, Quinton a élaboré le modèle EUROSEM (European Soil Erosion Model), pour estimer le risque d'érosion au niveau parcellaire pour la prédiction annuelle des pertes de terre. Ce modèle, établi en Europe, ne prend pas en compte les pratiques culturales, et estime les pertes en terre sans préciser les formes d'érosion hydriques.

En 2000, Van Der Knijff, Jones, et Montanarella ont estimé l'érosion hydrique en Italie grâce à une approche fondée sur une modélisation à partir de l'équation USLE de Wischmeier et Smith (1978). Ce modèle empirique fonctionne à un intervalle mensuel de temps et permet d'estimer le taux annuel des pertes de sol des terres agricoles. Cette étude a pris en compte l'interaction entre la croissance végétale et les précipitations. Il nous paraît impossible de valider les résultats à l'échelle de travail. L'angle de la pente a été étudié à partir d'un MNT avec une résolution de 250 mètres. Cette dernière est grossière pour estimer le risque d'érosion. Quant au facteur d'érosivité des précipitations (R), les chercheurs n'ont pas pris en compte le facteur de la variété climatique en Italie.

En 2000, Van der Knijff *et al.* ont utilisé une méthode basée sur le modèle de USLE pour estimer l'érosion hydrique du sol en Europe. A partir de leur méthode et en combinant l'érosivité des précipitations, l'érodibilité du sol, la topographie et le couvert du sol, ils ont calculé les taux moyens annuels d'érosion par hectare. Le modèle utilisé pour estimer l'aléa érosion du sol en Europe est inspiré de l'aléa érosion du sol en Italie.

En 2003 Kirkby *et al.* ont établie le modèle PESERA pour estimer l'aléa d'érosion hydrique des sols pour l'ensemble de l'Europe. Ce modèle, qui combine les effets de la topographie, du sol, du climat de la végétation est conçu pour prévoir le ruissellement avec un pas journalier. Le taux d'érosion a été évalué à partir des enregistrements quotidiens des précipitations. Selon Van Rompaey 2003, ce modèle qui peut fonctionner comme un outil d'évaluation de changements de climat ou d'occupation du sol, propose des résultats concernant le taux d'érosion deux fois plus élevés que les valeurs observées en Belgique et quatre fois plus faible en République tchèque.

-Approches qualitatives basées sur l'expertise

En 1989, De Ploey a établie la carte de risque d'érosion des sols de l'Ouest de l'Europe en utilisant des méthodes basées sur l'expertise. Plusieurs experts ont délimité les aires là où le

processus d'érosion était très important. Le point faible de cette approche est que le chercheur n'a pas défini les critères utilisés pour délimiter ces aires (Yassoglou et *al.*, 1998 ; Van der Knijff et *al.*, 2000).

En 1992, l'union européenne a adopté la méthode CORINE pour estimer le risque d'érosion hydrique dans la région méditerranéenne. Ce modèle, basé sur des points assignés à des facteurs apparentés à l'angle de la pente (8 classes), le couvert végétal (9 classes), la capacité du sol à la formation des croûtes (4 classes) et l'érodibilité (3 classes), a permis de dresser les cartes des risques d'érosion pour 17 pays européens et 2 pays d'Afriques du Nord. Mais ce qu'il est important de noter est que ces cartes n'ont pas été validées pour tester la pertinence du modèle appliqué. De plus, il n'y a aucune information actuelle sur la précision de leurs résultats.

En 1998, Montier et *al.*, ont estimé l'érosion des sols en France en se basant sur une méthode d'expertise. Pour ce faire, les chercheurs ont étudié les facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique : la couverture végétale (9 classes), la capacité du sol à former une croûte de battance (4 classes), l'angle de pente (8 classes) et l'érodibilité (3 classes). L'avantage de la méthode employée, est qu'elle prend en compte les différents types d'érosion qui peuvent être constatés dans les secteurs cultivés ou dans les montagnes.

En 1998, l'Institut National de la Recherche Agronomique, (INRA), a développé un modèle, MESALES, pour évaluer l'aléa de l'érosion hydrique en France. Le modèle développé a été amélioré plus tard, suite à plusieurs tests réalisés à différentes échelles et à une approche basée sur un arbre de décision afin de définir des classes qualitatives d'aléa érosif. Les chercheurs ont regroupé les facteurs qui contribuent à l'érosion en plusieurs classes : l'occupation du sol 9 classes, la sensibilité à la formation des croûtes de battance 4 classes, l'érodibilité du sol 3 classes et la pente avec 8 classes. Le croisement de ces facteurs a conduit à établir la carte de la sensibilité à l'érosion. Cette dernière a été croisée avec l'intensité et le volume des précipitations, ce qui a permis d'établir la carte d'aléa pour chaque saison. Ce modèle, qui permet de simuler l'évolution des aléas en France et de mettre à jour les différentes données, permet également de faire une comparaison entre les différentes régions françaises ainsi qu'une cartographie saisonnière des aléas érosifs.

L'avantage de l'arbre à décision est qu'il est simple à construire et permet de classer un grand nombre d'échantillons en plusieurs classes. Malgré les avantages de cette méthode, et si toutefois des nouvelles données devaient être intégrées, il serait alors nécessaire de construire un nouvel arbre de décision. Cela signifie que ce modèle ne sera pas facilement adaptable dans le cas où un nouveau critère serait jugé important après la validation du modèle (Cerdan *et al.*, 2006).

En 2003, Ouattara *et al.*, ont développé une approche, le MEH-SAFER (Modèle d'Érosion Hydrique en milieux Semi-arides de Forte Énergie de Relief) afin d'étudier les risques d'érosion hydrique dans le bassin versant du lac Laka-Laka en Bolivie, qui est un milieu semi-aride de forte énergie de relief. Ce modèle développé est basé sur le croisement du potentiel de ruissellement et de la vulnérabilité topographique, sur des images satellites issues de plusieurs sources et sur des modèles numériques du terrain afin de cartographier la topographie de la surface. Pour ce modèle, les chercheurs ont utilisé un MNT généralisé : un MNT moins grossier permet de donner plus de détails pour cette étude, ajoutant que ce modèle ne quantifie pas les pertes en érosion.

En 2004, Dumas a utilisé une approche qualitative pour cartographier la sensibilité des sols à l'érosion hydrique, dans certaines régions de la Nouvelle Calédonie. Il a établi la carte de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique à partir d'une analyse multicritère qui combine les facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique (la pente, le sol et l'occupation du sol) dans un SIG. Chacun de ces facteurs a été regroupé en plusieurs classes selon sa sensibilité ou non à favoriser l'érosion. Dans cette approche, l'auteur n'a pas pris en compte le facteur climatique, et le modèle utilisé étudie les surfaces émettrices des particules solides et ne prend pas en compte la sédimentation et leurs impacts.

En 2004, Le Bissonnais *et al.*, ont établi la cartographie de l'aléa d'érosion du département de l'Aisne à partir d'un modèle « de type système expert » et à l'aide du système d'information géographique. Les différents facteurs qui contribuent à l'érosion hydrique du sol ont été croisés, pour établir la carte de l'aléa d'érosion. Le changement saisonnier a été mis en valeur dans cette approche pour mieux étudier l'interaction entre le couvert du sol et le climat. Le modèle appliqué est le même modèle établie par l'INRA en 1998 pour évaluer l'aléa de

l'érosion hydrique en France, les chercheurs ont utilisé des données plus précises comme le MNT qui a été établie à partir des courbes de niveaux distantes de cinq mètres. Dans cette étude les chercheurs ont pris en compte le rôle de la matière organique pour étudier la sensibilité des sols à l'érodibilité et à la battance.

En 2005, Atherton et *al.*, ont développé un modèle additif basé sur la combinaison de cinq facteurs (la pente, le sol, l'occupation du sol et les précipitations absolues ou saisonnières) et à l'aide d'un SIG afin de déterminer l'érosion des sols dans les bassins versants des îles Fidji. L'inconvénient de ce modèle est que les chercheurs n'ont pas validé leurs résultats sur le terrain pour tester le modèle, ainsi que la quantification de l'impact de l'infrastructure sur l'érosion.

En 2005, Batti a étudié la probabilité des particules solides à l'arrachement et au transport dans les bassins versants du Lagon St Gilles sur le côté nord-ouest de l'île de la Réunion. Pour ce faire, l'auteur a utilisé un modèle qualitatif, basé sur une analyse multicritère à l'aide d'un arbre de décision à dire d'experts, pour établir la carte de l'aléa d'érosion des sols. La méthodologie appliquée est celle de l'IFEN/ INRA élaborée par Le Bissonnais et *al.* (1998). Quatre facteurs ont été pris en compte pour cette étude (le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat). L'un des points faibles pour ce travail est que le modèle utilisé a été déjà validé sur plusieurs sites en France mais, en revanche, n'a pas été validé dans un contexte tropical.

En 2006, Antoni et *al.*, ont adapté un modèle pour estimer l'aléa du risque érosif dans le contexte méditerranéen : l'exemple pris était la région du Languedoc-Roussillon. L'approche utilisée pour cartographier l'aléa du risque érosif est une approche expertise basée sur la combinaison des facteurs suivants : occupation du sol, battance, pente, érodibilité, et intensité des pluies, et faite à l'aide d'un Système d'Information Géographique. Cette approche, inspirée par le modèle de l'IFEN/ INRA élaborée par Le Bissonnais et *al.* (1998), a permis de cartographier les zones d'aléa érosif, prend en compte spécifiquement le taux de pierrosité, la teneur en matières organiques et en fer des sols et la texture.

En 2003, Van Rompaey A. et *al.*, ont évalué l'exactitude des trois modèles d'estimation de l'érosion hydrique du sol, USLE, INRA et PESERA, afin de valider les estimations de l'aléa de l'érosion des sols à l'échelle européenne. Cette estimation est faite à partir de réservoirs

qui permettent de mesurer le volume sédimentaire transporté dans différents bassins versants. Après avoir délimité le bassin versant de chaque réservoir et déterminé le coefficient de rapport de dépôts des sédiments, cette méthode a été appliquée dans différents pays européens comme l'Espagne, l'Italie. Ces chercheurs ont constaté que les modèles peuvent fournir une estimation satisfaisante dans certains pays européens, (Belgique et République tchèque), mais pas dans d'autres (Espagne et Italie). Les raisons viennent de l'incertitude qui subsiste sur les données de sédimentation dans les réservoirs et sur le non prise en compte de tous les processus de production et de transport des matériaux.

-En ce qui concerne le Liban :

En 2001, Bou Kheir et *al.*, ont étudié la sensibilité à l'érosion hydrique pour les sols de la région Jbaïl – Qartaba au Liban. Ces chercheurs ont établi un modèle à dire d'expert, qui utilise les facteurs qui favorisent l'érosion hydrique des sols (la géologie, le sol, la pente, la pluie, l'occupation des sols), basé sur l'intégration des images satellites ainsi que des données cartographiques, dans un système d'information géographique (cf. annexe A4). Quatre classes d'érosion ont été retenues (nulle, faible, modérée et forte).

En 2002, Rania Bou Kheir a établi une thèse intitulée ''Etude des risques d'érosion hydrique des sols par Télédétection et SIG''. Dans ce travail, l'auteur a élaboré un modèle basé sur les facteurs classiques de Wischmeier and Smith (1958), qui ont été adaptés aux conditions de sa région d'étude. Elle a intégré les images satellites et les données cartographiques dans un système d'information géographique, pour cartographier le risque d'érosion hydrique. Elle a étudié la morphologie, le couvert végétal, l'infiltration et l'arrachement des roches, l'infiltration, la rétention et l'arrachement des sols, les pluviométries et la densité hydrographique. Ce modèle a utilisé des données existantes, ce qui lui a permis d'établir des cartes dérivées et des cartes thématiques. L'auteur a réussi à établir la carte des risques d'érosion, en répertoriant les risques en plusieurs classes. Pour l'auteur, la nature des roches joue un rôle primordial dans le risque d'érosion hydrique.

En 2003, Dar-El-Handasah/IAURIF en collaboration avec les experts du CNRSL ont étudié le l'aléa d'érosion hydrique au Liban, en appliquant une approche qualitative faite à partir d'un modèle additif :

$([\text{sol}] * 30 + [\text{pente}] * 35 + [\text{lithologie}] * 20 + [\text{précipitation}] * 15) * 50 + [\text{couverture du sol}] * 50$.

Pour estimer l'aléa d'érosion Ce modèle utilise les facteurs suivant : la géologie, le sol, la pente, la pluie, l'occupation des sols. Différentes pondérations ont été attribuées à chacun de ces facteurs. En raison d'absence de données météorologiques, l'intensité de pluviométrie a été remplacée par les quantités des dernières pluies.

Certes, les modèles utilisés par Bou Kheir et *al.*, 2001 et Dar-El-Handasah/IAURIF en 2003 sont très intéressants, surtout qu'ils prennent en compte les particularités de la région étudiée ainsi que les particularités du Liban. De plus, ces modèles sont conçus d'une façon convenable avec les bases de données disponibles. Malgré ces atouts, nous pouvons constater quelques inconvénients dans les études qui concernent le Liban. Ces dernières n'ont pas pris en compte l'intensité des précipitations. L'absence des données a conduit ces chercheurs à remplacer l'intensité par la quantité de précipitations. Certes, la quantité des précipitations peut être utile pour estimer le risque d'érosion, mais ces chercheurs n'ont pas pris en compte la distribution saisonnière des précipitations et en quelles saisons le risque atteint son apogée. Même si ces études concernent des régions agricoles, elles n'ont pas traité la sensibilité des sols à la battance.

Pour conclure, nous constatons que les approches qualitatives et quantitatives possèdent des avantages et des inconvénients. Les modèles basés sur l'expertise sont nombreux. Ces approches qui sont conçues en fonction de la disponibilité des bases de données, sont peu coûteuses et conviennent à beaucoup de pays en voie de développement. Elles offrent une simplicité dans la lecture des résultats. Ces modèles prennent en compte les particularités locales des régions étudiées en attribuant des pondérations aux différents facteurs qui favorisent l'érosion hydrique.

Malgré ces avantages, certains problèmes peuvent être rencontrés en appliquant ces approches. De plus, la classification des données entraîne une perte d'information, et les résultats d'analyse vont fortement dépendre des limites de classes et du nombre de classes utilisés (Van der Knijff *et al.*, 2000). Le deuxième problème qui peut être rencontré est l'estimation des pondérations qui sont basées sur des dires d'expert, ce qui signifie que ces pondérations seront un objet de discussion si d'autres experts sont consultés (Cerdan *et al.*, 2006).

Pour les approches quantitatives, ces derniers essaient de relier des paramètres mesurables à des phénomènes physiques de façon rigoureuse (Cerdan 2006). Mais ces modèles exigent un grand nombre de données qui ne sont pas toujours disponibles pour beaucoup de pays en voie de développement. En plus certains modèles quantitatifs sont conçus pour fournir des estimations ponctuelles de perte en sol, si ces modèles sont appliqués au niveau régional les résultats doivent être traités prudemment.

A partir de ces études, nous constatons que ces modèles diffèrent de la façon dont ils combinent les variables afin d'estimer l'érosion hydrique des sols. En plus, ces modèles n'utilisent pas toujours les mêmes variables. A titre d'exemple, l'équation USLE détermine les pertes de sol à partir des six facteurs déjà précités, nous remarquons que le modèle EUROSEM ne prend pas en compte le facteur P. Au Liban le modèle adapté pour estimer le risque d'érosion ne prend pas en compte le facteur L, en revanche ce modèle introduit des nouvelles données comme la capacité des roche à infiltrer l'eau.

Enfin, un modèle unique pour estimer le risque d'érosion ne peut pas être appliqué à l'échelle de tous les pays. Chaque pays doit élaborer ou adapter un modèle en fonction de ces particularités locales, de la base de données disponibles et en se référant à d'autres modèles connus. Au Liban, l'absence de statistiques concernant l'intensité des précipitations n'a pas empêché les chercheurs d'étudier le risque d'érosion en remplaçant l'intensité des précipitations par la quantité des précipitations.

6-Plan

La première partie de la thèse porte sur l'état des lieux de la région à étudier. Une recherche bibliographique a été effectuée pour étudier les particularités de notre région d'étude par rapport à la plaine de la Bekaa et à l'ensemble du Liban. Dans cette première partie, nous avons effectué un rappel sur les caractéristiques physiques, en particulier sur la géologie, le climat et les différents types de sols avec leurs caractéristiques physiques et chimiques. Ensuite, nous avons travaillé sur plusieurs échelles, en allant du général au niveau du Liban, jusqu'au niveau de notre région d'étude, en utilisant des cartes de petite échelle jusqu'à la grande échelle. Nous avons aussi effectué un descriptif de la population, de notre région d'étude, en se basant sur des statistiques effectuées par l'Administration Centrale de Statistiques libanaise (ACS) et des travaux menés sur le terrain.

La deuxième partie de la thèse porte sur la mise au point d'une méthode basée sur l'intégration des images satellites et des données cartographiques dans un SIG afin d'évaluer le changement d'occupation du sol de notre région d'étude. Cette étude est basée sur l'analyse diachronique des changements de l'occupation du sol dans la région d'étude entre 1962, 1998. Nous avons étudié la majorité des couverts du sol, végétal et urbain, ce qui nous a permis d'établir des cartes pour chaque type de couvertures. Nous avons mis en évidence les principales cultures qui sont pratiquées, en remplaçant celle-ci par rapport à d'autres régions de la plaine et à l'ensemble du Liban. Le changement du couvert du sol a été étudié entre 1962, 1998, et 2005 à partir de différents documents. En réalisant des croisements, nous avons établi des cartes et des tableaux qui montrent l'évolution de chaque culture en mettant en évidence les gains et les pertes. Ensuite, nous avons cherché les causes du changement du couvert du sol en le mettant en relation avec les changements environnementaux et humains.

La troisième partie, qui consiste à étudier la sensibilité de la région d'étude à l'érosion hydrique, apporte une proposition pour optimiser les cultures ayant pour but d'aboutir à un aménagement agricole durable. Nous avons étudié les facteurs qui favorisent l'érosion hydrique du sol. Nous avons réalisé une étude détaillée pour chacun de ces facteurs environnementaux de façon à comprendre comment il participe à l'érosion hydrique. Après avoir défini les principaux facteurs qui sont déterminants dans le processus de l'érosion

hydrique de notre région d'étude, nous avons regroupé ces éléments en plusieurs classes selon leur contribution à l'érosion.

Ainsi, nous avons établi la carte de la sensibilité à l'érosion de la région en question à partir d'un modèle qualitatif en croisant la pente, la géologie, le sol et le couvert du sol en 2005. Ensuite, nous avons réalisé la carte d'aptitude du sol pour optimiser différents types de cultures. A partir de cette carte, nous avons proposé plusieurs scénarii pour limiter le risque d'érosion avec pour objectif, une agriculture durable, rentable et productive.

7-La présence de l'érosion hydrique dans notre région d'étude.

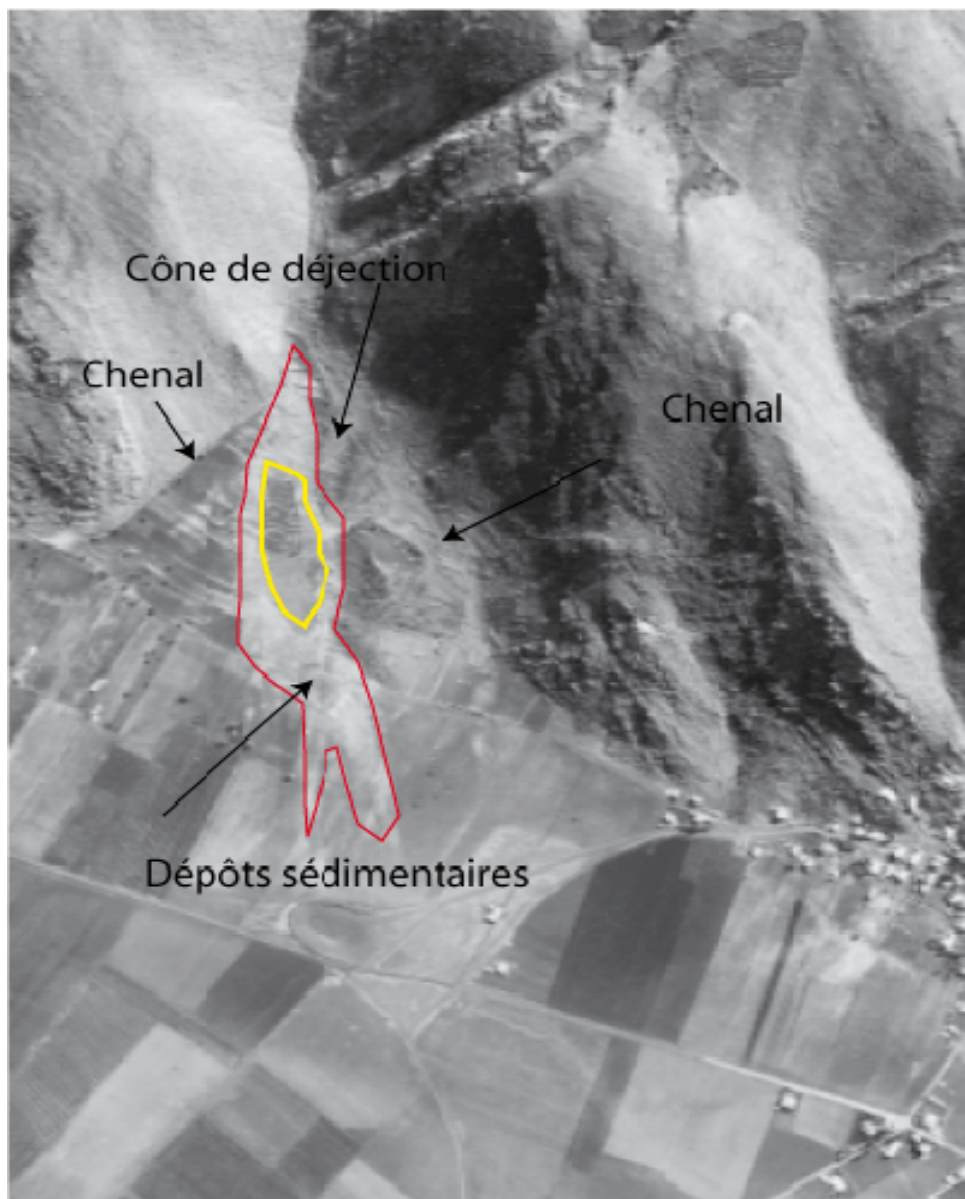
La carte morphologique du Liban, Bekaa, Anti-Liban, (1/200 000) établie par Etienne de Vaumas en 1954, note la présence de cônes de déjection. Selon le travail de terrain effectué durant les années de thèse, nous avons identifié plusieurs cônes de déjection dans notre région d'étude, qui sont situés au bord des piémonts. Ces cônes sont le résultat du transport des roches et des sables des hautes altitudes à l'aide de la forte pente. Ils ne sont qu'un indice qui prouve que l'érosion hydrique des sols a eu lieu dans cette région. Mais la question qui se pose pour entamer ce travail, est de savoir si l'érosion est encore active aujourd'hui dans notre région d'étude.

La réponse à cette question nous a conduits à une recherche qui s'articule en deux points :

- 1- L'examen de la photo d'interprétation.
- 2- Un travail de terrain qui consiste à identifier les rigoles et les mouvements du sol.

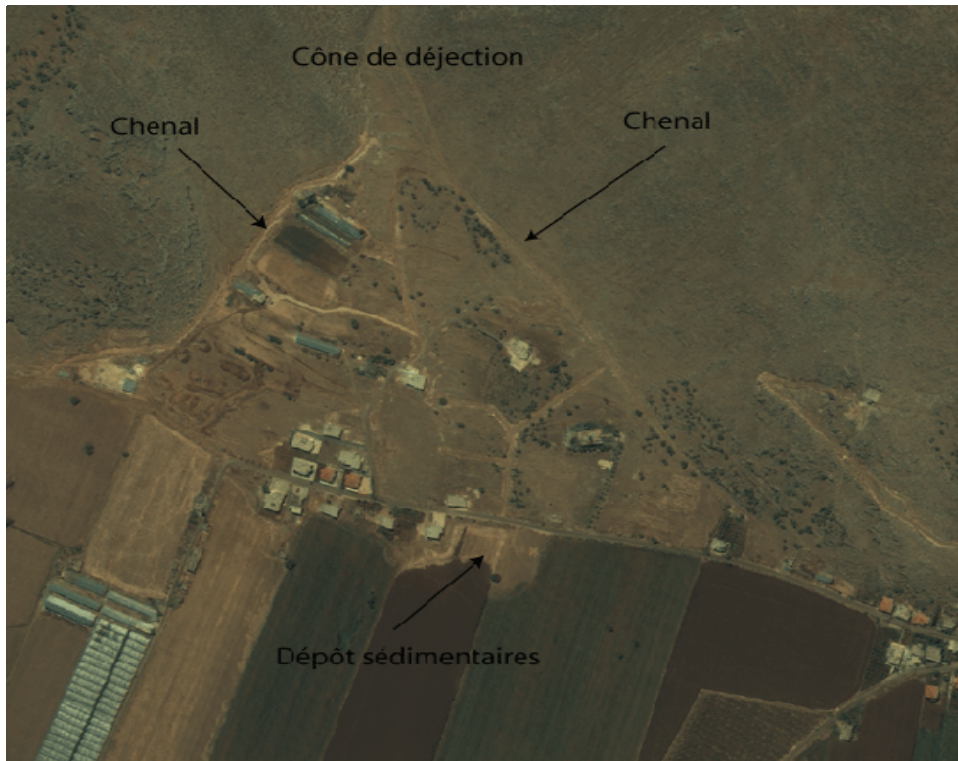
C'est grâce aux photos aériennes de 1962, établies par la direction des affaires géographiques et géodésiques de l'armée libanaise, et à l'image satellite Ikonos de 2005, que nous avons remarqué que l'érosion hydrique du sol est toujours active dans notre région d'étude, comme le montrent les deux photographies suivantes.

Photographie n° 1 : Le cône de déjection du Soultan Yaacoub issue d'une photo aérienne prise en 1962.



Cette photo de 1962 nous montre un cône de déjection traversé sur ses extrémités par des chenaux. Cela indique que l'eau descendant des montagnes traverse ces chenaux. De plus, si nous examinons cette photo, nous remarquons les dépôts sédimentaires qui s'étalent sur les parcelles agricoles qui sont déjà tracées par les agriculteurs.

Photographie n° 2 : Le cône de déjection du Soultan Yaacoub issue d'une image satellite Ikonos prise en 2005



Cette image nous montre clairement les dépôts sédimentaires qui couvrent les parcelles agricoles déjà tracées. De plus, si nous augmentons la taille de cette photo, nous constatons l'absence totale de plante à l'intérieur des chenaux. En revanche, ces plantes se trouvent sur leurs bords. A partir de cela, nous constatons que l'eau coule toujours dans ces chenaux, ce qui empêche les plantes de pousser.

Toutes les raisons précitées mettent en évidence que les enjeux sont nombreux et difficiles à prendre en compte.

- Comment faire du développement agricole en tenant compte du contexte socio-économique global actuel et de son évolution ?
- Comment mettre en place de nouvelles pratiques agricoles dans le contexte culturel libanais ?
- Comment pratiquer des cultures en limitant la sensibilité du sol à l'érosion hydrique ?

Notre but est de montrer ce qu'un S.I.G. peut apporter à la connaissance et à la gestion d'un territoire. Ces démarches nous conduiront à une réflexion prospective. L'intérêt de ce travail est de montrer les potentialités du territoire étudié, en particulier en termes agronomiques, et de faire des propositions d'utilisation dans le cadre d'une agriculture moderne protectrice, contre l'érosion, qui s'inscrit dans un développement durable. Pour atteindre l'objectif, nous avons suivi une démarche qui s'appuie sur plusieurs approches : La géographie physique du milieu, une approche socio-économique et recour au système d'information géographique.

LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Notre étude s'appuie sur plusieurs phases:

- **une première phase analytique**, permet de comprendre les données du milieu.
- **une seconde phase conduit à étudier les grands changements** intervenus dans l'occupation du sol à partir des photos aériennes et des images satellites.
- **une troisième phase contribue à étudier la sensibilité de la région à l'érosion hydrique**, comme étant un risque naturel menaçant le secteur agricole, et **la mise en place de propositions pour l'aménagement agricole de la région étudiée**. Celles-ci seront adaptées à l'aptitude agronomique et à la potentialité d'occupation des sols, afin d'optimiser les cultures et limiter la sensibilité du sol à l'érosion hydrique. Tout ceci sera étayé à l'aide du système d'informations géographiques.

La démarche méthodologique de travail met en évidence l'intérêt du système d'information géographique pour notre travail.

1-Le système d'information géographique.

Le S.I.G. est un outil qui permet de rassembler diverses données « relatives à la fois à la terre et à l'homme, à leurs interactions et leurs évolutions respectives » (Denègre et Salgé, 1996). Cet outil permet de faire le lien entre des thématiques différentes, à condition d'avoir un point commun d'ordre spatial (Noiset, 2006).

Le système d'information géographique est conçu pour répondre à des besoins précis « qui déterminent une modélisation finalisée du monde réel » (Joliveau, 2006). Il permet de saisir, gérer, analyser des données de référence spatiale et d'en faire une présentation sur des cartes plus ou moins réalistes de l'environnement spatial, en se basant sur des objets géographiques, comme les polygones, les lignes et les points, auxquels sont associées des données qualitatives, telles que les caractéristiques naturelles (végétation,...).

Le S.I.G. facilite l'intégration de diverses données hétérogènes (Joliveau, 1993). Il permet de stocker, visualiser, manipuler et afficher toute une gamme d'informations basées sur la géographie. L'information combine des données géométriques et thématiques, dont chaque thème est représenté par une couche, qui rassemble un ensemble d'objets homogènes (parcelles, routes, population), associant la représentation cartographique des objets spatiaux et la table d'informations statistiques. Cela permet d'établir des cartes de synthèse.

Ce système permet également de croiser des couches contenant chacune des informations géographiques sur une région donnée. Ce croisement équivaut à superposer deux feuilles transparentes qui contiennent des informations différentes pour la même région.

En ce qui concerne notre sujet d'étude, il est basé sur le système d'information géographique pour plusieurs raisons : l'une des plus importantes repose sur le fait que notre étude porte sur l'interprétation comparée des photos aériennes de 1962, établies sous forme de cartes topographiques en 1963, et des images Landsat (1998) et Ikonos (2005), afin d'étudier les éventuels changements du mode d'occupation des sols. A l'aide du S.I.G, nous avons pu transformer ces images numériques en cartes vectorielles, ayant la même référence spatiale et la même projection.

Notre sujet traite plusieurs thèmes : les potentialités agronomiques, l'estimation de la sensibilité de la région d'étude à l'érosion hydrique et également l'étude de l'évolution du

mode d'occupation du sol et les mises à jour des données agricoles et environnementales. Tout cela fait d'un S.I.G. un outil essentiel dans notre travail.

Sur le plan socio-économique, la mise à jour tient compte de la population, de l'urbanisme, du réseau routier, des exploitations agricoles...

Enfin, ce système n'est pas uniquement utile à la cartographie, il s'agit d'un outil capable de structurer l'information géographique, qui peut être repris par plusieurs chercheurs en fonction de leurs propres recherches (Noiset, 2006).

2-Matériels et techniques

Certains matériels et méthodes nous ont été utiles pour la préparation et l'analyse des données :

-Logiciel MapInfo

Les cartes, ainsi que les croisements de couches, ont été effectués à l'aide de la version MapInfo 8.1. C'est un outil dédié aux applications du système d'information géographique. Ce logiciel permet l'acquisition, la gestion, l'analyse ainsi que la présentation des informations localisées géographiquement.

De plus, nous pouvons citer quelques fonctions de MapInfo qui ont été indispensables dans notre travail :

- Accéder à tous les types de données attributaires : Excel ...
- Importer et exporter de nombreux formats cartographiques.
- Géoréférencer les images de type raster¹.
- Vectoriser² les images et les cartes de type raster.
- Effectuer des analyses thématiques.....

¹ Dans Map Info, le module Raster est très limité et ne permet de concevoir que des données de type "image". Ces données sont uniquement graphiques. La représentation de l'information graphique se fait sous la forme d'une matrice de points organisée en lignes et en colonnes.

² Dans le mode vecteur la représentation graphique de l'information se fait à l'aide d'une succession de points définis par leurs coordonnées X et Y. Un objet géographique est un élément graphique (point, ligne ou polygone) qui est indépendant dans l'espace. L'objet géographique représente une unité possédant des caractéristiques spatiales et descriptives qui lui sont propres. Les tables combinent graphisme et attribut où chaque objet graphique correspond à une ligne du tableau de données (un enregistrement). Les deux constituent un *OBJET* c'est à dire que chaque objet graphique possède une fiche signalétique.

- Le système de projection

Au Liban, les systèmes de projection utilisés sont : Lambert, stéréographique et UTM. Le système de projection adopté dans notre thèse est la projection UTM, ellipsoïde WGS84. Ce système est compatible avec les données régionales.

-Surfer

Ce logiciel permet d'effectuer des cartes graphiques en trois dimensions. A l'aide de ce logiciel nous avons établi les modèles numériques du terrain (MNT) à partir des courbes de niveau distantes de 100, 50 et 10 mètres.

- Choix de la nomenclature

Les cartes d'occupation du sol sont des outils indispensables à la prise de décision dans le domaine du développement durable. La mise à jour de la carte d'occupation du sol est très importante pour un pays comme le Liban qui, en raison des changements politiques récurrents, est confronté à des mutations rapides de l'urbanisation aux dépens de l'agriculture et de l'environnement.

L'échelle devrait être suffisamment grande pour que des informations détaillées puissent figurer sur les cartes, afin de compiler des statistiques et d'effectuer une planification ultérieure. Les cartes les mieux adaptées au Liban sont celles au 1:20 000, qui est devenue l'échelle standard au Liban. La nomenclature choisie doit être compatible avec l'échelle de travail (1:20 000).

Le choix de la nomenclature est toujours fait par rapport à la définition de la superficie minimale des unités cartographiées. Elle doit répondre au secteur de l'aménagement du territoire.

La nomenclature retenue pour cette étude est la nomenclature MOS (mode d'occupation du sol) du CNRS-libanais(1998) et celle de Corine Land Cover Europe³. Cela nous a permis de cartographier l'ensemble du territoire libanais.

³ <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/>

La nomenclature MOS est une nomenclature hiérarchisée en 4 niveaux. Elle comprend 9 postes au niveau 1 ; 28 au niveau 2 ; 35 au niveau 3 et 22 au niveau 4. Le premier niveau correspond aux grandes catégories d'occupation du sol repérables à l'échelle du pays, le second niveau est utilisable pour les échelles de 1:00 000, le troisième niveau est utilisé au 1:50 000 et le quatrième niveau pour le 1:20 000 (cf. annexe n°A5).

La nomenclature Corine Land Cover Europe est hiérarchisée à 3 niveaux et 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire (cf. annexe n°A6).

Toutefois certaines difficultés ont été rencontrées dans cette étude, comme l'absence d'une nomenclature unifiée de l'occupation du sol pour les cartes relevant des différentes années étudiées. Cela a nécessité une réinterprétation des types d'occupations du sol de manière à homogénéiser les nomenclatures. Nous pouvons citer l'exemple des forêts : sur la carte topographique de 1963 ces forêts sont nommées « bois » en revanche, la nomenclature de 1998 nomme le bois, « forêt », cela nous a conduit à unifier la nomenclature en les nommant surfaces boisées.

-Unité minimale de collecte

L'échelle de la cartographie (1:20 000) de terrain conditionne la taille minimale des objets cartographiables. On considère comme « cartographiable » un objet qui représente à l'échelle minimale de travail de terrain, un polygone d'une surface de 0.1 hectares.

3-Etat de lieu de la région d'étude

L'état de lieu de la région d'étude est basé sur une étude bibliographique, afin de rappeler les caractéristiques physiques et humaines du milieu, et le recoupement de données socio-économiques disponibles (données économiques, agricoles, statistiques) et de données météorologiques, d'images satellites, de photos aériennes et diverses cartes provenant de différentes sources, pour faire un bilan représentatif de cette région. A cela sera croisé un **travail de terrain** dont l'objectif sera de valider toutes ces données.

-Vectorisation des données cartographiques

Les données cartographiques ont été indispensables pour notre travail, ces données nous ont fournis des informations qui ne sont pas toujours faciles à extraire des images satellites, surtout pour les images de faibles résolutions. Ces données cartographiques disponibles, voire peu coûteux, nous ont permis d'effectuer des croisements afin d'appréhender certains phénomènes.

Certes, les photos aériennes et l'image satellite ont permis d'identifier le phénomène de l'érosion hydrique dans la région d'étude et cela en comparant visuellement les photos aérienne de 1962 et l'image satellite Ikonos de 2005(cf. Photographie n° 2), mais les données cartographiques, provenant de plusieurs sources ont permis également de comprendre les particularités de la région d'étude (données socio-économiques, climatiques, sol, ...) et d'envisager des solutions pour l'avenir dans le domaine de la protection de l'environnement.

Après avoir collecté les cartes de format raster qui sont utiles pour notre étude, nous avons procédé à la vectorisation de ces cartes en les alimentant avec d'autres données.

Nous avons établie la carte des sols de 1 :50 000, qui couvre notre région, à partir de la carte des sols de Rachaya de type raster, numérisée de 1998, publiée par le CNRS libanais. Elle couvre la totalité de notre région d'étude. À l'aide de MapInfo (SIG), nous avons vectorisé cette carte en montant une base de données, concernant les caractères physiques et chimiques de chaque type de sol à partir des données fournies par le CNRS libanais (Darwish et *al.*, 2006). Ce qui nous a aidés à créer plusieurs couches (profondeur, pourcentage de la matière organique et texture).

En ce qui concerne la vectorisation des cartes de températures et de pluviométries, nous nous sommes basés sur les cartes et les données de l'Atlas climatiques du Liban (1966) de

1 :200 000 fournies par le ministère des travaux publics et des transports.

La carte de la géologie de la région d'étude, nous l'avons vectorisée à partir de la carte de Rachaya à l'échelle de 1 : 50 000. Cette carte nous a été publiée par le CNRS libanais en format raster. Nous avons associé d'autres données à cette carte, issues d'une étude bibliographique, concernant la susceptibilité de la formation géologique à l'arrachement, l'infiltration ...

Nous avons établi plusieurs cartes orographique de la région d'étude, à l'aide de MapInfo et Surfer, et ce à partir des courbes de niveau distantes de 100, 50 et 10 mètres.

D'autres cartes, comme celles des sols, géologies, à l'échelle 1 : 200 000 et des cartes statistiques à l'échelle 1 : 200 000, nous ont été fournies vectorisées par le CNRS libanais et par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAL).

Les données collectées pour l'état des lieux de la région d'étude, nous ont été utiles dans les trois parties de la thèse. Certaines, relatives notamment à la géologie et au sol, ont été utilisées dans la première et la troisième partie, d'autres pour l'introduction, la deuxième et la troisième partie, telle que l'image satellite Ikonos, ou encore les données pluviométriques qui sont utilisées dans la première et la deuxième partie.

4-Identification des transformations d'occupation du sol

Cette étude est basée sur l'analyse diachronique des changements de l'occupation du sol dans la région d'étude en utilisant des données satellitaires, cartes topographique (formats raster) et le SIG, entre 1962, 1998.

Le point de départ de cette partie est de transformer les cartes topographiques (1/20 000) de la région d'étude, (cartes numériques de 1962, issues de photos aériennes), en format vectoriel, à l'aide du S.I.G.

-Les Photos aériennes de 1962

Avant les années 1960, ce sont les photos aériennes, dont le vecteur d'enregistrement est l'avion, qui ont permis d'acquérir des informations à distance pour certains secteurs de la surface de la terre, et d'en retirer des renseignements sur leur organisation.

Nous avons collecté des photos aériennes prises en 1962 par l'armée libanaise à l'échelle 1 :20 000. Ces photos ont été scannées en utilisant un scanner de photogrammétrie de haute résolution. Elles ont servi à vérifier le mode d'occupation du sol (MOS) des cartes topographiques de 1963 qui couvrent la région d'étude et d'identifier l'érosion hydrique en 1962 (cf. Photographie n° 1).

-Les cartes topographiques

La direction des affaires géographiques et géodésiques de l'armée libanaise (DAGG) a effectué en 1962 une couverture aérienne sur l'ensemble du territoire libanais à des échelles de 1 :20 000. A partir de ces photos, la DAGG a établi les cartes topographiques du Liban à l'échelle de 1 :20 000. Les trois cartes couvrant notre région d'étude sont les suivantes : Joub Jannine, Ghazé, Saghbine. Nous avons établi la carte d'occupation du sol dans notre région à partir de ces trois cartes, numérisées, en format raster, couvrant la totalité du périmètre d'étude. À l'aide de MapInfo (S.I.G.), nous avons vectorisé ces cartes topographiques, tout en créant plusieurs couches qui prend en compte les différents types d'occupation du sol en 1962 comme le couvert végétal, l'urbanisme, le réseau de transport....

-Les images satellites

Au cours des trois dernières décennies, les technologies et les méthodes de la télédétection ont évolué de façon spectaculaire. En effet, une série de capteurs fonctionnant avec une large gamme d'échelles a été mise en orbite autour de la terre, fournissant ainsi des images satellites qui ont eu un intérêt certain pour les chercheurs. La télédétection est ainsi considérée comme la source principale, pour la réalisation des cartes d'occupation du sol.

Les images satellites permettent d'accéder à une vision particulière de la surface terrestre. Cette vision semble être adaptée à la détection de grandes étendues et à l'interprétation de paysages parfois complexes. La répétitivité permet de comparer différents stades d'évolution d'une région au cours du temps, et d'élaborer des analyses diachroniques à l'aide de traitements numériques.

Les images satellites de faible résolution spatiale ont été mises à disposition depuis les années 1960 pour des applications météorologiques. En 1972, les Etats-Unis ont lancé le premier satellite civil Landsat à moyenne résolution spatiale. Ce satellite marque le début des activités de recherche dans le domaine de la télédétection qui ont été essentiellement orientées vers l'analyse de données et le développement des applications qui se poursuivent aujourd'hui.

Depuis 2000, les études montrent une multiplication des satellites dans l'espace portant des capteurs optiques et/ou radars (par exemple Terra et Envisat) et de plus en plus de capteurs avec une haute résolution spatiale (Quickbird, Ikonos).

Le satellite américain Ikonos est opérationnel depuis 11 ans. Gravitant à une altitude qui avoisine les 681 km. Ikonos possède deux capteurs dits à « Très haute résolution spatiale » qui enregistrent les informations numériques dans un mode panchromatique et dans un mode multi-bande comprenant quatre canaux (tableau n°1). Le plus petit pas d'échantillonnage, c'est-à-dire le plus petit élément identifiable sur le terrain, est de 1 m pour le canal panchromatique et de 4 m pour les quatre canaux multi-bandes.

Tableau n° 1: les informations numériques dans un mode panchromatique et dans un mode multi-bande enregistrées par le satellite Ikonos.

Mode	Canal	bande spectrale	Résolution	Fauchée
Multi-spectral	1	0,45 - 0,53 μ m (bleu)	4 x 4 m	11 Km
	2	0,52 - 0,61 μ m (vert)	4 x 4 m	
	3	0,64 - 0,72 μ m (rouge)	4 x 4 m	
	4	0,77 - 0,88 μ m (proche infrarouge)	4 x 4 m	
panchromatique		0,45 - 0,90 μ m (vis. et proche IR)	1 x 1 m	

Il a été estimé que près de 100 satellites ont été lancés entre 2000 et 2008. En conséquence, il existe actuellement un ensemble de données de télédétection avec des variétés diverses dans la résolution spatiale, spectrale, fréquence, polarisation et autres (images à haute résolution spatiale, images hyper spectrales, images radars avec polarisation et fréquence variable...).

La télédétection joue un rôle primordial pour l'étude du suivi des évolutions du mode d'occupation du sol. Elle donne une vision globale qui peut être répétée dans le temps surtout pour les terrains dont l'accès est difficile. De plus, la télédétection permet d'étudier la topographie de surface, les sols, le développement de tissus urbains ...

Le CNRSL, en collaboration avec les ministères de l'environnement et de l'agriculture libanais, a produit la carte d'occupation du sol du Liban à l'échelle de 1 :20 000, à partir d'une image satellite qui date de 1998, Landsat orthorectifiée, avec une résolution spatiale de

cinq mètres. La légende de cette carte a été prise en compte pour l'interprétation des autres données. La photo-interprétation assistée par ordinateur a été utilisée afin de produire cette carte.

A l'aide MapInfo, nous avons croisé les cartes d'occupation du sol des années 1962 et 1998. Ceci nous a permis d'extraire des matrices de changement, dont nous pouvons identifier des indicateurs sur les transformations dans la région d'étude.

Cette approche permet d'étudier les transformations de l'occupation du sol, qui évolue dans le temps et dans l'espace, résultant de l'interaction entre l'homme et son environnement.

À cela, nous avons ajouté la carte du couvert du sol en format SIG issue d'une image Ikonos prise en août 2005 (fournie par le CNRS libanais), vectorisée par nos soins, ceci afin d'analyser les évolutions et les variations de la structure du couvert du sol dans la région d'étude.

La photo-interprétation consiste à identifier l'occupation du sol en utilisant la numérisation sur fond d'écran. Le principe consiste à délimiter les zones qui représentent une structure d'occupation identifiée dans la nomenclature MOS-L.

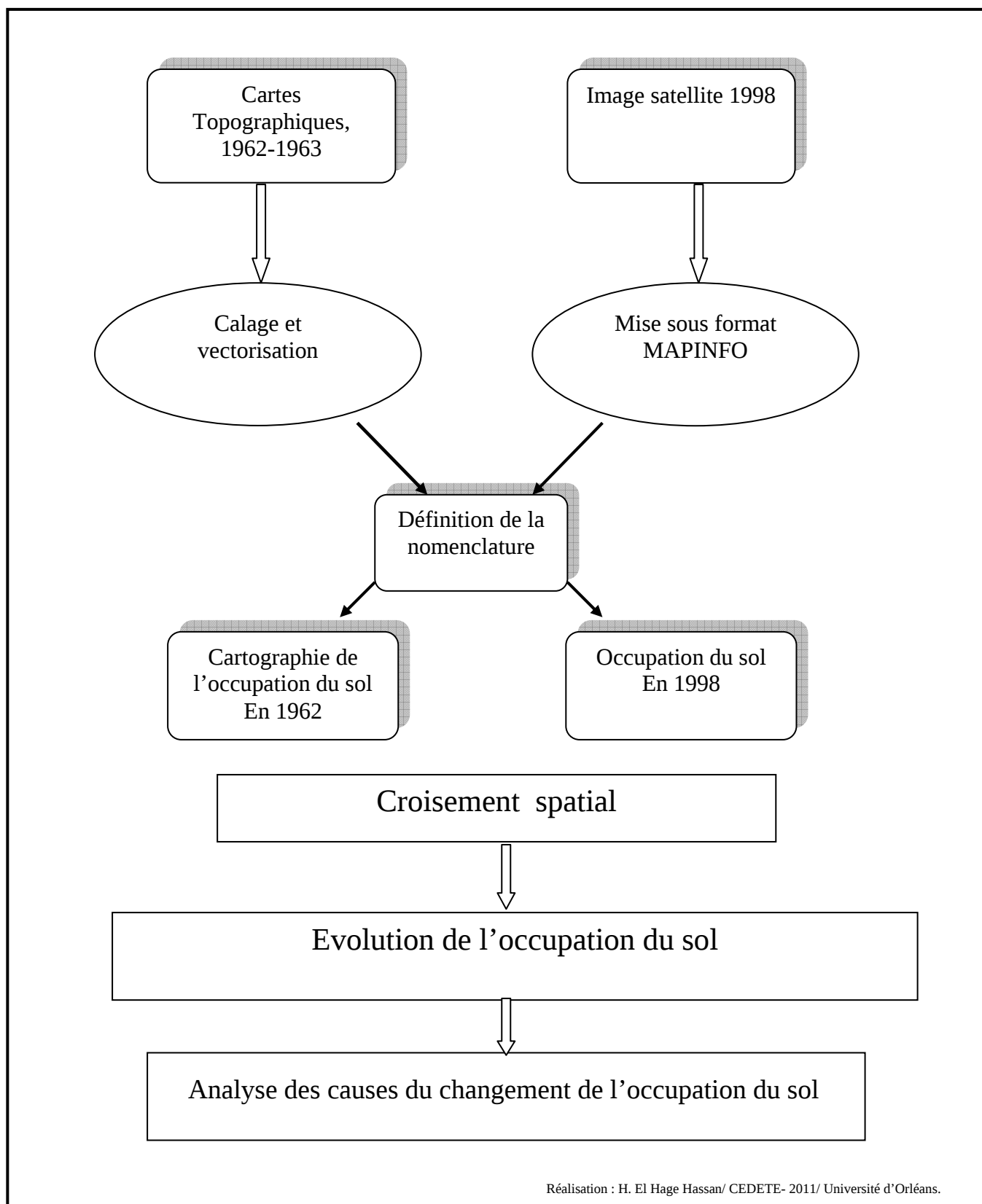
En vectorisant l'image satellite Ikonos, nous avons respecté les règles qui peuvent être résumées ainsi :

- Référence à l'ancienne carte pour mettre à jour la nouvelle carte.
- Affichage des étiquettes (en l'occurrence les codes de chaque polygone) au moment de la photo-interprétation, ce qui facilitera la tâche surtout en ce qui concerne le découpage et la combinaison des polygones.
- Utilisation de la même échelle d'affichage des images (en l'occurrence 1 :10 000), ce qui n'empêche pas de l'agrandissement.
- Définition de la taille du plus petit polygone à 0,1 hectare.
- Travail dans le niveau 4 de la nomenclature MOS-L, avec quelques modifications.

-Les données statistiques

Les données statistiques ont été produites par plusieurs administrations et instituts (ACS, INRAL...), ces données nous donnent une idée de la population de la région d'étude, enrichie nos informations sur le secteur agricole (taille d'exploitation, périmètre irrigué...) à cela doit s'ajouter un travail de terrain qui peut valider l'image d'interprétation.

Figure n° 4 : Méthode d'évaluation du changement entre 1962 et 1998



4-Estimer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique : L'aide multicritère à la décision et le SIG

Les S.I.G. sont utilisés comme de véritables outils d'aide à la décision. Il est utile de noter que le problème ne doit pas se poser en terme d'intégration de l'analyse multicritère aux SIG (où l'on intègre une ou plusieurs méthodes multicritères à l'intérieur du SIG), ni de celle des SIG à l'analyse multicritères (en ce sens qu'un SIG sert d'outil d'entrée des données pour les méthodes multicritères et également d'outil d'affichage de leurs résultats), mais plutôt d'intégration biunivoque au même processus décisionnel, où l'apport de l'un à l'autre pour enrichir ce processus décisionnel est essentiel. C'est pourquoi on parle d'intégration des SIG et d'analyse multicritère, pour l'aide à la décision à référence spatiale.

Une telle mise au point est en soi un apport important à la clarification de l'approche d'intégration proposée.

Les SIG apportent une aide substantielle pour la gestion des données à référence spatiale utilisées par les différents opérateurs œuvrant sur le territoire. Ils permettent également une dynamique certaine dans la vision des problèmes à référence spatiale.

Il existe différentes démarches pour faire face à une situation de décision. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépens d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients.

Pour l'approche multicritère, il ne s'agit nullement de rechercher une vérité cachée mais plutôt d'aider le décideur à maîtriser les données de son problème, souvent complexes, et ainsi à progresser vers une solution. Celle-ci dépend de la sensibilité du décideur, du contexte dans lequel s'opère l'aide à la décision et de la façon dont on formule le problème.

En effet, la recherche de cette solution se fait en trois étapes :

- Définir les solutions possibles ou envisageables : il s'agit d'un inventaire d'actions potentielles où l'ensemble est aussi complet que possible ;
- Définir les critères à prendre en considération ;
- Enfin, agréger ces jugements pour désigner la solution qui jouit globalement des meilleures évaluations.

Le champ de l'aide à la décision a fait l'objet de recherches menées par plusieurs scientifiques de différents domaines. Il a donc constitué un pôle attractif pour diverses études et applications.

Bernard Roy (1968) définit l'aide à la décision comme étant : «l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicites, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions qui se posent en intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part».

Selon Roy (1968) : «il est préférable de se faire une opinion à partir d'informations approximatives ayant un critère exhaustif plutôt qu'à partir de calculs exacts ne prenant pas en compte certains facteurs essentiels».

L'aide multicritère à la décision contribue à apporter un éclairage et des explications à une catégorie de problèmes où, selon Martel (1988), plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs sont pris en considération :

- Ces critères sont souvent hétérogènes (dans le sens où les critères ont des mesures sur différentes échelles (\$, m, qualitative, %, etc.) ;
- Ces critères sont généralement conflictuels ;
- Ces critères sont généralement considérés d'inégale importance.

Diverses méthodes utilisant l'analyse multicritère existent (pour estimer le risque, l'aléa et la sensibilité à l'érosion), s'appuyant sur des modèles qualitatifs ou des modèles quantitatifs, qui permettent de combiner ces différents facteurs dans l'environnement de SIG. Plusieurs études ont privilégié l'utilisation d'un modèle qualitatif ayant pour avantage d'affecter des pondérations pour les différents facteurs compte tenu de leur importance. Le modèle multiplication, est utilisé dans le cas où les différents facteurs ont le même poids (Faour, 2006).

Pour estimer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique, nous avons choisi d'utiliser le modèle qualitatif, afin de nous permettre d'attribuer une pondération différente pour chaque facteur. Celui-ci a été utilisé au Liban et validé sur le terrain par les chercheurs du CNRS Libanais. Ainsi, une pondération a été définie qui nous a permis de développer ce modèle (Rania Bou Kheir et Talal Darwish).

-la cartographie de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique

La cartographie à réaliser doit prendre en compte les différents types d'érosion dans la région d'études :

- La sensibilité des versants et des pentes moyennes à l'érosion.
- La sensibilité des champs de grandes cultures à l'érosion.

Après avoir créé la base de données en sélectionnant les facteurs qui contribuent à la sensibilité du sol à l'érosion hydrique (la carte du sol, de la pente, de la géologie, du couvert végétal), la cartographie de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique sera réalisée en plusieurs étapes.

Les principales étapes de l'étude sont les suivantes :

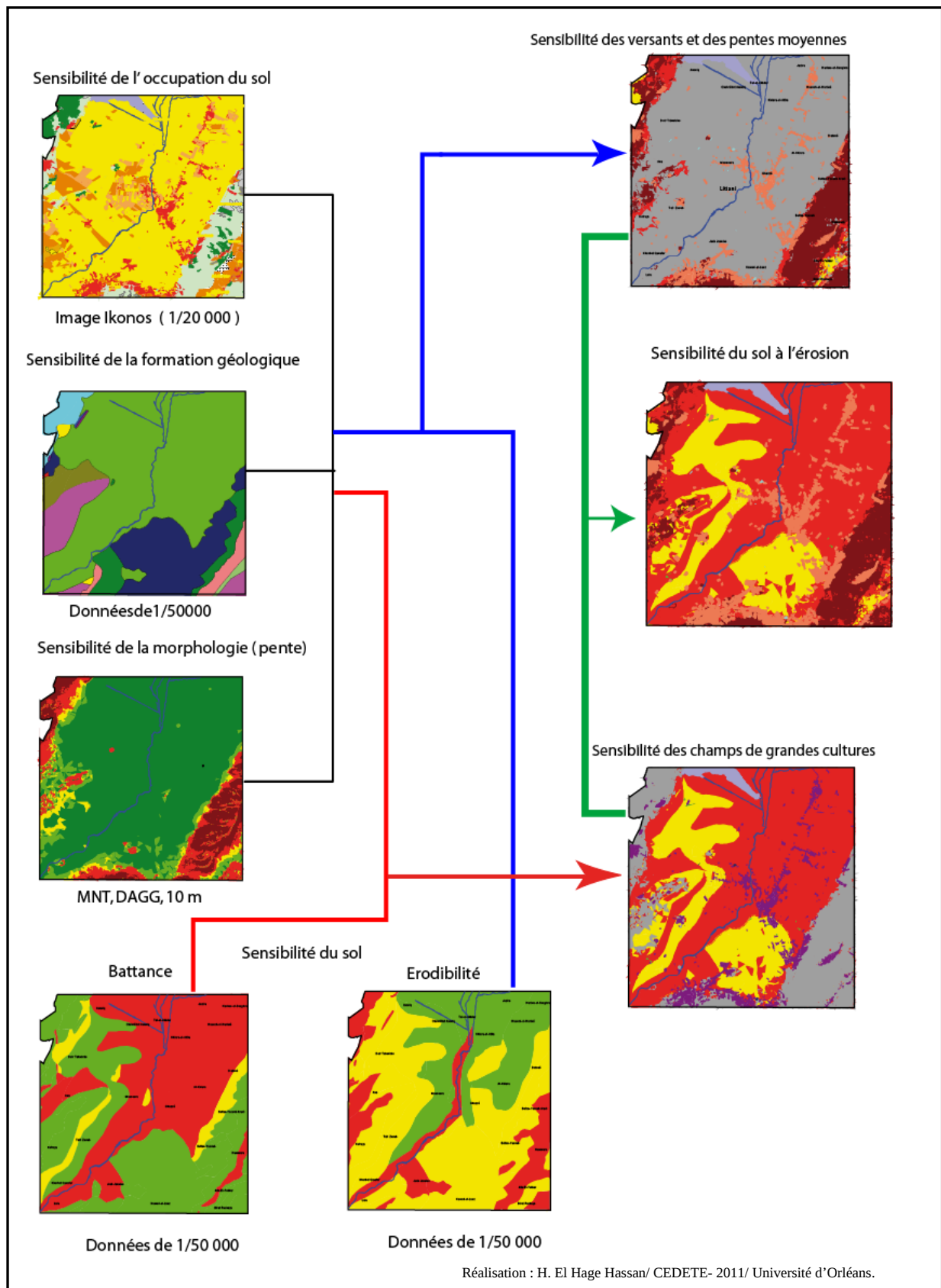
-Evaluation de la sensibilité de chaque facteur à l'érosion hydrique : Pour chacun de ces paramètres, un reclassement de données a été réalisé, grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique, sous forme d'un indicateur de sensibilité à l'érosion : sensibilité très faible, faible, moyenne, forte ou très forte.

-L'application d'un modèle qualitatif, qui permet d'établir :

- la carte de la sensibilité des versants et des pentes moyennes à l'érosion.
- la carte de la sensibilité des champs de grandes cultures à l'érosion.
- la carte de la sensibilité générale à l'érosion hydrique :

Ces cartes seront établies à partir du croisement de données de la sensibilité du sol (érodibilité, sensibilité à la battance), l'occupation du sol, la pente et la géologie.

Figure n°5 : Démarche méthodologique pour estimer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique



5-Cartographie du potentiel agricole et de la limitation de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique:

Comme pour la sensibilité du sol à l'érosion hydrique, la cartographie du potentiel agricole et de la limitation de la sensibilité du sol à l'érosion dans la région d'étude sera élaborée en plusieurs temps :

- Etablir la carte d'aptitude des sols en fonction des caractéristiques des sols qui couvre la région d'étude, ce qui permet de choisir les cultures qui conviennent aux différents types de sol.

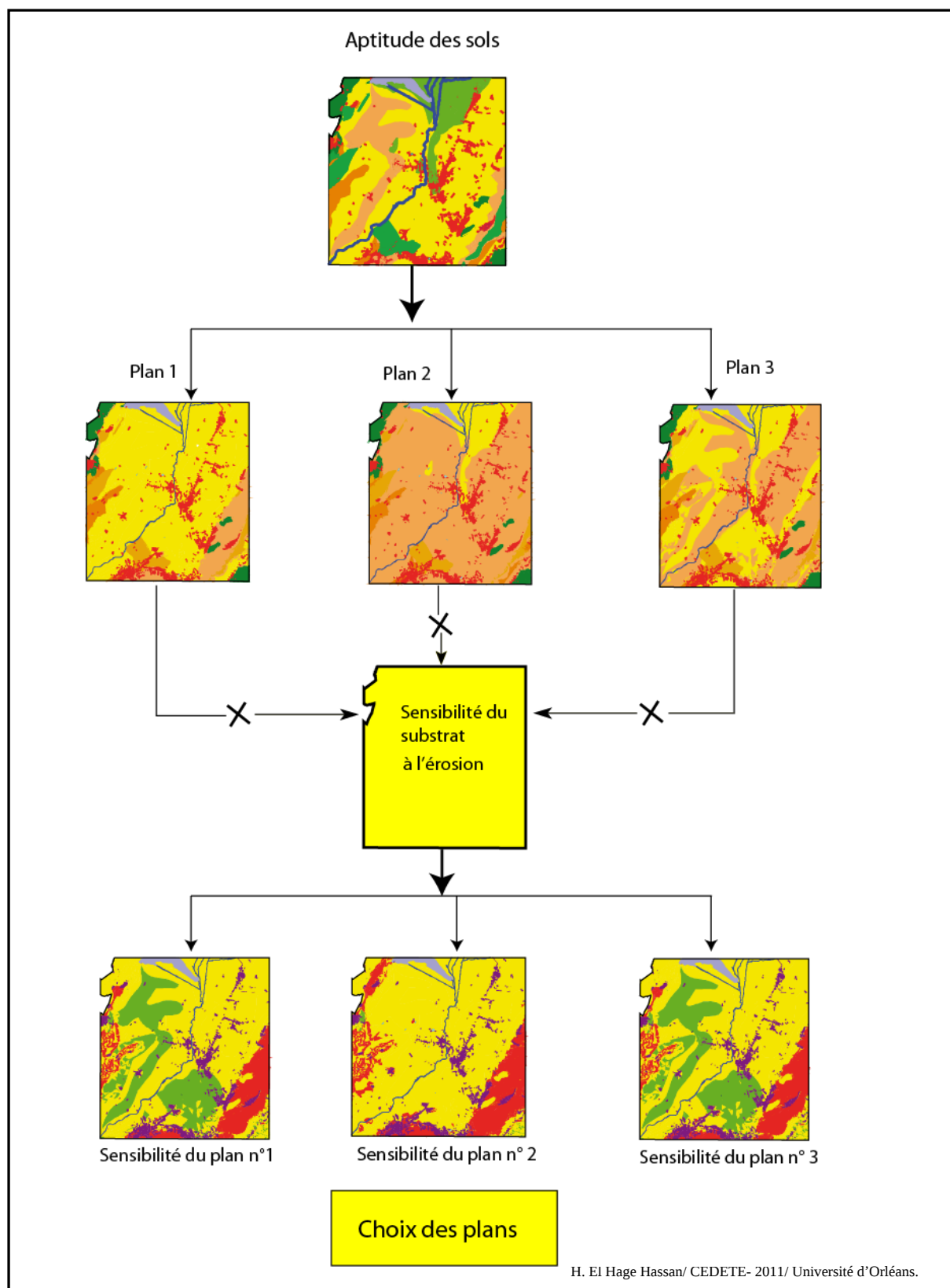
- Etablir plusieurs cartes d'optimisation des cultures (plan d'aménagement du couvert végétal) à partir de la carte d'aptitude des sols.

- Chaque plan d'aménagement agricole sera divisé en plusieurs classes en fonction de chaque type de couvert végétale à la sensibilité à l'érosion.

- la sensibilité de chaque plan d'aménagement du couvert végétal sera croisée avec les cartes de sensibilité du substrat (le sol, la lithologie et la pente). Ce travail doit permettre de dresser plusieurs cartes de sensibilité du sol à l'érosion hydrique en fonction de chaque plan.

- Etudier les variations de la sensibilité du sol à l'érosion entre le couvert végétal de 2005 et les plans d'aménagement du couvert végétal.

Figure n° 6: Méthodologie adaptée pour étudié le potentiel agricole et la limitation de la sensibilité à l'érosion



6- Les travaux de terrain

Certes, les images satellites et les photos aériennes sont très utiles pour étudier l'évolution de l'occupation du sol pour un lieu donné. Mais à cela doit s'ajouter un travail de terrain qui a pour objectif de valider les images satellites et de les compléter par des photographies qui permettent de donner une bonne approche pour certains phénomènes comme l'érosion hydrique du sol. De plus, l'enquête auprès des exploitants agricoles, des coopératives et de la population résidante contribue à identifier leurs attentes, et de comprendre le rapport existant entre ces derniers et l'environnement, permettant ainsi d'appréhender les facteurs d'évolution d'occupation du sol et de se constituer une idée sur les futures évolutions.

L'objectif de ces travaux de terrain et de ces enquêtes est :

- identifier le phénomène d'érosion hydrique des sols.
- évaluer la connaissance des exploitants agricoles en matière de protection de l'environnement.
- Evaluer la connaissance des exploitants en matière de développement agricole et les problèmes rencontrés.
- Comprendre le rôle des coopératives agricoles.

Avant d'enquêter sur le terrain d'étude, trois questionnaires ont été mis en place : le premier était destiné aux exploitants agricoles (cf. annexe A1), le second aux coopératives agricoles (cf. annexe A2) et le troisième aux habitants de la région d'étude (cf. annexe A3).

Les travaux de terrain ont connu plusieurs problèmes allant jusqu'à l'arrêt des travaux à une certaine période compte tenu de la situation politique du Liban.

La durée d'enquête sur les deux questionnaires s'est étalée sur quatre ans, pour de multiples raisons parmi lesquelles :

1- au départ sur la carte de la région d'étude nous avons choisi des secteurs pour y enquêter, prendre des photos et valider certaines données (nombre d'habitants, extension de l'urbanisation...). Cette méthode a été limitée par un obstacle : l'impossibilité de prendre des rendez vous en avance avec les exploitants agricoles. Cela a nécessité plusieurs campagnes

de terrain afin de rencontrer sur place le maximum d'exploitants agricoles. Parfois, nous ne rencontrons pas l'exploitant, c'est le chef des ouvriers qui gère la plantation ou la récolte et ces derniers étaient prêts à nous aider mais ils ignorent la majorité des réponses au questionnaire.

2- la situation politique instable au Liban : celle-ci nous a souvent empêchés de nous rendre sur le terrain d'étude.

En dépit de toutes ces difficultés, l'ensemble des travaux de terrain a été mené à bien sur la quasi-totalité de la région d'étude, nous avons pu valider l'image d'interprétation de 2005, (l'érosion hydrique...) sur laquelle nous avons choisis des points précis, puis nous avons relevé leurs coordonnées géographiques (x, y), et nous les avons tous validés à l'aide d'un GPS.

Appréhender l'évolution de l'occupation du sol et mettre en place un plan d'aménagement d'un couvert végétal, à la fois rentable et limitant le risque érosif, nous pousse à mettre en place une méthodologie adaptée à la particularité locale de la région d'étude. Le SIG nous paraît primordial pour organiser les données collectées sous forme de tableaux liés à des cartes en format vectoriel. Il doit nous permettre de visualiser et de quantifier les grands changements de l'occupation du sol dans notre secteur d'étude Cette étude est basée sur l'analyse diachronique des changements entre 1962, 1998 et 2005. Le SIG nous permettra également d'étudier la sensibilité de la région d'étude à l'érosion (sensibilité des versants et des pentes moyennes et la sensibilité des champs de grandes cultures à l'érosion) et de réaliser plusieurs propositions d'aménagements agricoles. Cela va nous conduire à chercher les causes des évolutions, qui vont nous aider à choisir le plan d'aménagement agricole le plus pertinent à la région d'étude, qui assure une protection contre la sensibilité à l'érosion et une agriculture productive et rentable.

Hussein El Hage Hassan

Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (LIBAN).

Exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi

Résumé

La plaine de la Bekaa, notre région d'étude, est une région qui a connu au cours des cinquante dernières années une évolution importante dans le mode d'occupation du sol (couvert urbain, couvert végétal). Le système d'information géographique permet une étude objective dans une région où la pratique directe du terrain n'est pas toujours facile. Pour conduire cette étude, nous avons choisi de comparer deux dates différentes : 1962, 1998. L'évolution constatée nous a poussés à chercher les causes du changement du couvert du sol (facteurs climatiques, facteurs socio-économiques). Ensuite, nous avons étudié le risque qui peut menacer cette région agricole. Le risque d'érosion hydrique (érodibilité et battance) est un problème majeur de dégradation du sol, qui menace l'avenir de l'agriculture dans la plaine de la Bekaa et dans la région d'étude.

Plusieurs facteurs déterminent le risque d'érosion hydrique. La majorité de ces facteurs, comme le sol, la pente, la géologie, ont une valeur constante. Quant au couvert du sol et à la pluviosité, ils peuvent varier d'une année à l'autre. Pour cela, nous avons travaillé sur le couvert végétal, compte tenu de son importance, pour assurer un couvert végétal productif qui aide à protéger le sol contre l'érosion hydrique.

Mots clés : S.I.G., évolution de l'occupation du sol, érosion, aménagement du couvert végétal, Liban, Bekaa.

GIS contribution to understanding land use evolution and limiting the risk of erosion in the Bekaa plain, Lebanon: *Bekaa Al-Gharbi case study area*

Summary

The Bekaa Valley, our study site, has undergone a significant land-cover evolution over the last fifty years (urban vegetation cover). This evolution has prompted us to seek the causes of soil cover change (climatic and socio-economic factors, etc.). The Geographical Information System (GIS) allows conducting an objective study in an area where direct on-site observations are not always easy. In our study, we compare two different periods (1962 to 1998). We study the risk factors that could threaten this agricultural region. The risk of hydric erosion (erodibility and crusting soil) is a major cause of soil degradation threatening the future of agriculture in the Bekaa Valley and the study area. Several factors are associated with hydric erosion hazard, most of which like the soil, slope of the area, and geology maintain a constant value while soil cover and rainfall may vary from year to year. For this, we worked on the vegetation cover, given its importance for ensuring productive agriculture which helps protect the soil against hydric erosion. This led us to establish several optimization maps of land-use according to the map of land suitability in an area which lacks agricultural guidance, and to study erosion sensitivity tailored to each optimization map, in order to be able to choose the most suitable mechanism of land development to protect the environment, taking into account the socio-economic factors of the study site.

Key words: GIS, land cover evolution, sustainable agricultural planning, Erosion, Lebanon, Bekaa.