

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI
ABDALLAH-

DEPARTEMENT IRRIGATION ET DRAINAGE

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

OPTION : IRRIGATION ET DRAINAGE

THEME :

**ESTIMATION DE L'HUMIDITÉ DU SOL D'UN PERIMETRE
IRRIGUÉ À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES**

Présenté par :

ZEROUATI FAICEL

DEVANT LES MEMBRES DU JUREY

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M ^r .MEDDI Mohamed	Professeur	Président
M ^r .RASSOUL ABDELAZIZ	M.C.B	Examineur
M ^r .YAHIAOUI SAMIR	M.A.B	Examineur
M ^{me} .AZIEZ WAHIBA	M.A.A	Examinatrice
M ^r .BENKACI TARIK	M.C.B	Promoteur

dédicaces



قُلْ لِي إِقْبَالٌ لِّأَنَّ لِي لِبَرْهَانٍ لِي تَدْمُونِي أَيْجِدُ
نَجْمٌ مِّنْ مِّنْ لَّالِ وَأَنَّ لِي تَوَاتُ رَمَمُ أ
مَوْجٌ مِّنْ مِّنْ لَّيْلِ لَصُ
مَكَّ وَنَاكَ وَشَا

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance envers :

Ma mère AICHA

Mon père L'aid

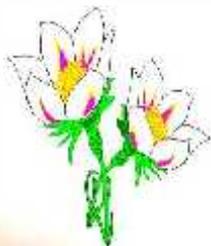
Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

Je le dédie également à

Mes frères : BILAL, RABAH, ramadhan, Amin.

Mes amis : YASSINE, SOFIANE ,ZANOUDA ,TAKI BOUKHARI, ISLAM, ,GARIB, BENHALIMA ,WAHAB ,GANO ,IDERISS, SAMIRE, et les autres qui sont nombreux.

En un mot, à toute ma famille, mes amis et ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation



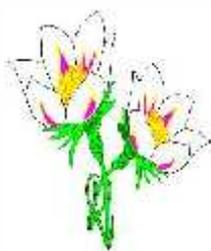
M. ZEROUATI FAICEL

Remerciements

D'abord je remercie Dieu tout puissant pour m'avoir permis d'accomplir dans les meilleures conditions ce travail et toutes mes études.

Ma reconnaissance va plus particulièrement à :

-  *Mon promoteur Mr : BENKACI TARIK pour sa disponibilité et ses conseils utiles.*
-  *A L'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.*
-  *Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail*



M.ZEROUATI. FAICEL

الملخص :

رطوبة التربة تمثل عامل هام لدى البلدان التي تعاني من الجفاف لتحديد كمية الانتاج حيث تعكس كمية المياه الارض, و ايضا يمكن ان تحسن الانتاج الزراعي و جعل التكهانات بشأن حجم و نوعية المحاصيل و الكشف السريع عن المخاطر مما يتطلب من المزارعين الاسراع لطلب المساعدة و التخطيط لتجنبها و تساعد ايضا في توقع الفيضانات التربة المشبعة التي لا يمكنها استيعاب المزيد من الامطار و ايضا تساعد على معرفة الري اي كمية الماء اللازم ومن اجل ذلك قمنا في هذه الدراسة بكيفية قياس الرطوبة واخذنا احدها وهي القياس بالأقمار الصناعية انواعها وفائدتها في المساحات الزراعية الكبيرة

كلمات مفاتيح :

Résumé :

L'humidité du sol est un facteur important dans les pays qui souffrent de sécheresse. Parmi les bienfaits de ce facteur, nous citons : déterminer le montant de la production, améliorer la production agricole, faire des prédictions sur la taille et la qualité de la récolte et enfin détecter rapidement les risques. Ce qui mène les agriculteurs à planifier et éviter les risques tels que les inondations causées par la nature du sol qui semble saturée et ne peut pas absorber plus de pluie. Ce qui permet également de connaître la quantité d'eau d'irrigation nécessaire quelle que soit la qualité du sol.

A cet effet, nous avons montré dans cette étude comment mesurer l'humidité où nous en avons gardé l'une de ses méthodes qui consiste à réaliser ces mesures par satellite dans les régions agricoles les plus vastes.

Mots clés : cartographie, Satellite, l'humidité du sol.

Abstract:

Soil moisture is a significant factor in countries that suffer from drought to determine the amount of production where reflect the amount of water in the ground, and also can improve agricultural production and to make predictions about the size and quality of the crop and the rapid detection of risks, which requires farmers to speed up to ask for help and Planning to avoid them and also help in predicting floods because of saturated soil can not absorb more rain and also helps to know the amount of irrigation water needed any soil For this purpose we have in this study how to measure humidity and we took one of them, a satellite measurement types and usefulness in large agricultural areas.

Key words: cartographie, Satellite, Soil moisture.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
Chapitre I : Le système sol-plante-atmosphère	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Le cycle de l'eau.....	2
I.3 Le sol.....	4
I.3.1 Caractéristique physiques et chimiques du sol.....	4
I.3.1.A. Texture du sol.....	4
I.3.1.b. Structure du sol.....	6
a- Définition et importance de la structure du sol.....	6
b- Degrés de structure du sol.....	6
c- Classes et types de structure des sols.....	7
I.4 L'eau dans le sol.....	8
I.4.1 Humidité à saturation.....	9
I.4.2 Humidité à la capacité du champ.....	10
I.4.3. Le point de flétrissement.....	10
I.4.4 .L'humidité résiduelle.....	11
I.4.5 La réserve utile.....	11
I.5 Facteurs influençant l'humidité de l'eau dans le sol.....	12
1.5.1 L'évaporation de l'eau de sol.....	12
1.5.2. La transpiration.....	12
1.5.3 Pertes par interception.....	14
1.5.4 L'infiltration.....	14
a- Définitions et paramètres descriptifs de l'infiltration.....	14
I.6 Conclusion.....	16

Chapitre II : Méthodes d'estimation de l'humidité du sol

II.1 Introduction.....	17
II.2 L'humidité.....	17
II.3 Les enjeux d'une connaissance de l'humidité du sol.....	18
II.4 Les différentes techniques de mesures de l'humidité du sol.....	20
II.4.1 Méthodes thermo-gravimétriques.....	20
II.4.2 -Mesures par les sondes neutroniques.....	21
II.4.3 Méthode par tensiométrie.....	23
II.4.4 Méthode capacimétrique.....	24
II.4.5 Méthode TDR.....	25
II.5 Modélisation de l'humidité du sol.....	27
II.6 Conclusion.....	29

Chapitre III : Analyse des méthodes de cartographie

III.1 Introduction.....	30
III.2 La cartographie.....	30
III.2.1 But de cartographie.....	31
III.2.2 Unité cartographie.....	32
III.3 Les techniques de cartographie.....	32
III.4 Etapes de conception d'une cartographie.....	32
III.5 Les méthodes cartographie.....	34
III.5.1 Méthodes numériques.....	34
III.5.2 Méthodes satellitaires.....	36
III.5.2.1 Les système d'information géographique.....	36
III.5.2.2 Méthodes satellitaire par télédétection.....	36
III.5.2.3 Méthode satellitaire par radar.....	37
III.6 Méthodes d'interpolation spatiales.....	38
III.6.1 Cartographie géostatistique.....	38

III.7 Principe de la géostatique.....	39
III.8 Le krigeage.....	39
III.8.1 Principe d'un krigeage.....	40
III.8.2 Propriétés du krigeage.....	40
III.9 Conclusion.....	41

Chapitre IV : Caractérisation de l'humidité du sol par télédétection

IV.1 Introduction.....	42
IV.2 principe de la télédétection.....	43
IV.2.1 Le spectre électromagnétique.....	44
IV.2.2 Interactions du rayonnement avec l'atmosphère.....	45
IV.2.3 Interactions du rayonnement avec la cible.....	46
IV.2.4 Signatures spectrales principales surfaces naturelles.....	46
IV.2.4.1 La végétation.....	46
IV.2.4.2 Le sol.....	47
IV.2.4.3 L'eau.....	48
IV.3 Télédétection multi spectrale.....	48
IV.4 Image satellite.....	48
IV.4.1 Image numérique de télédétection.....	49
IV.5 La place des techniques de télédétection.....	49
IV.5.1 Caractéristiques principales de ces techniques.....	49
IV.5.2 Les aspects positifs de l'utilisation des techniques de télédétection.....	50
IV.5.3 Contraintes et risques de l'utilisation des techniques de télédétection.....	50
IV.6 Les apports de la télédétection.....	51
IV.7 Mesure de l'humidité du sol par télédétection.....	52
IV.7.1 Autres facteurs influant la mesure de l'humidité du sol	53
IV.8 Les méthodes de mesure l'humidité du sol par télédétection.....	53

SOMMAIRE

IV.8.1 L'infrarouge thermique.....	53
IV.8.2 La télédétection à micro-onde active.....	54
IV.8.3 La télédétection à micro-onde passive.....	54
IV.9 La sensibilité des différentes émissions micro-ondes.....	55
IV.10 Conclusion.....	58
Conclusion Générale.....	59
Bibliographie	

LISTE DE FIGURE

Chapitre I

- Fig. I.1** – Le cycle de l'eau et ses flux annuels (Maidment 1992 et illustration de Brochure SMOS c ESA)2
- Fig. I.2** – Classification texturale des sols en fonction de leur teneur en argile, sable et limon (d'après jamagne, 1965).....4
- Fig. I.3** – Représentation schématique des différents teneurs en eau du sol : la saturation θ_s , la capacité au champ et l'humidité résiduelle θ_r9
- Fig.I.4** – Représentation schématique de l'eau absorbée et liée aux particules solides d'un sol (d'après Hillel 1988).....10

Chapitre II

- Fig.II.1** : Schéma type de la méthode thermogravimétrique.....20
- Fig.II.2** : Schéma d'un dispositif d'un humidimètre à neutrons.....21
- Fig. II.3** : Schéma d'une canne tensiométrique.....23
- Fig.II.4** : Schéma d'une sonde TDR et du signal théorique obtenu.....24

Chapitre III

- Fig.III.1** : représente les techniques et les méthodes de cartographie.....34
- Fig. III .2** : Principe général de la cartographie numérique des sols.....35
- Fig.III.3** : Principe de l'image numérique.....35
- Fig.III.4**: système de télédétection.....37
- Fig.III.5**: Principe du radar.....38

Chapitre IV

- Fig. IV.1** : Principe de la télédétection.....44
- Fig. IV.2** : Spectre électromagnétique source44
- Fig. IV.3** : Comportement spectral de la végétation dans le domaine du visible et l'infrarouge.....47

Fig. IV.4 : sensibilité de l'émission micro-ondes aux différents paramètres de surface (Kerr 1996).....	55
Fig. IV.5 : Exemple de cartographie de l'humidité du sol en France.....	56
Fig. IV.6 : Exemple de cartographie de l'humidité du sol en Afrique.....	57

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource vitale à la fois pour l'agriculture, pour l'approvisionnement en eau potable, pour la santé des populations et toute vie sur terre en dépend. L'eau est toujours en mouvement et change continuellement d'état, entre le liquide (la pluie, la rosée, le brouillard), le gaz (vapeur), le solide (la glace, la neige). Le cycle de l'eau décrit l'existence et le mouvement de l'eau sur, dans et au-dessus de la terre et son impact sur la circulation entre les océans, l'atmosphère et les surfaces terrestres.

Malheureusement, l'état hydrique du sol reste aujourd'hui encore une grandeur difficile à estimer avec une bonne précision sur de grands périmètres ou de grandes étendues.

Pourtant de nombreuses approches existent pour estimer l'humidité du sol, les approches vont de plus simples au plus complexes et sophistiquées.

Parmi les approches basées sur la télédétection spatiale, les mesures par l'infrarouge thermique et par micro-onde, ont été utilisées pour accéder à une mesure directe de l'humidité des sols.

La mesure de l'état hydrique du sol par la télédétection fournit une mesure de l'humidité du sol très précise à l'échelle locale, cette mesure directe permet de produire des valeurs d'humidité du sol à différentes échelles.

Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur l'humidité du sol qui conditionne de nombreux processus physiques à la surface et en lien avec l'atmosphère (évapotranspiration, besoins en eau des cultures, etc.). Une synthèse sur les méthodes d'estimation de l'état hydrique du sol, ainsi que les méthodes récentes, par la télédétection notamment été développée en fin de mémoire, pour mettre en évidence l'utilité de l'estimation de l'état hydrique des sols en irrigation.

Chapitre I :
Système sol-plante-atmosphère

Chapitre I : Le système sol-plante-atmosphère

I.1 Introduction :

L'eau est l'élément qui fait de notre Terre une planète si singulière. A l'état liquide, elle couvre près de 70% de la surface terrestre. Bien que la quantité d'eau présente sur la Terre soit constante, l'eau circule en permanence entre les océans, l'atmosphère et la surface terrestre (Escorihuela, 2006). Cette circulation (et conservation de l'eau terrestre). Elle est également présente sous d'autres états, solide et gazeux. L'eau est en continuel mouvement, changeant de milieux, d'état, selon le cycle de l'eau". Le cycle hydrologique continental, qui est l'une des composantes du cycle de l'eau, a une influence essentielle sur les processus d'échanges d'énergie des surfaces terrestres de notre planète.

I.2 Le cycle de l'eau

L'eau présente à la surface de la Terre est répartie de manière non uniforme dans l'atmosphère, les surfaces continentales, les océans et les calottes polaires. Le principal rassemblant tous les océans, contient 97,41% du volume d'eau total disponible sur Terre (De Marsily 1995). Les glaciers et calottes glacières en stockent 1,984% (soit 70% de l'eau douce de la planète). L'humidité contenue dans le sol correspond à 0,00505% de l'eau sur Terre, situant ce réservoir entre les lacs et l'atmosphère en termes de volume d'eau stockée.

Le cycle de l'eau décrit l'ensemble des échanges et mouvements d'eau qui s'effectuent de manière incessante entre les réservoirs (Figure I.1). C'est une composante à part entière du système climatique de notre planète dont le moteur est le rayonnement solaire. L'énergie reçue à la surface terrestre provoque l'évaporation des particules liquides des océans et des surfaces continentales.

A l'état gazeux, l'eau est stockée dans l'atmosphère ou elle se déplace avec la circulation des masses d'air. Le temps de résidence moyen de l'eau dans l'atmosphère est d'environ 8 jours.

C'est la durée moyenne qui s'écoule avant que les molécules gazeuses ne se condensent et que le poids de leur agglomération n'entraîne leur chute. L'eau rejoint à nouveau les océans

et les surfaces continentales qui peuvent être sous forme de précipitations de pluie, de neige ou de glace.

L'eau tombant sur les surfaces continentales va transiter à travers les différents réservoirs continentaux. Le temps passé dans chacun d'entre eux est défini par le ratio entre le volume du réservoir et les flux. Ainsi, les particules d'eau tombant sur un glacier y resteront plus de mille ans avant de fondre et rejoindre les réservoirs que sont l'humidité du sol, les eaux souterraines, les fleuves et rivières ou encore les lacs (De Marsily 1995).

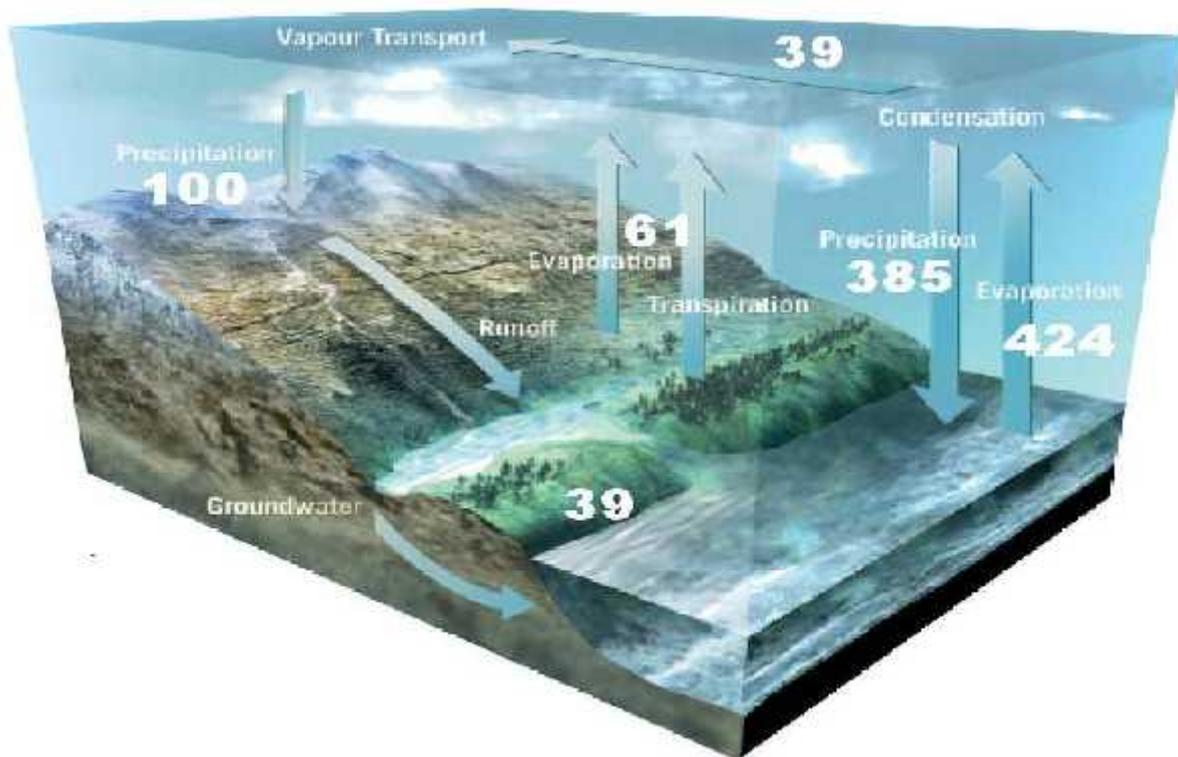


Fig.I.1 – Le cycle de l'eau et ses flux annuels

Les mouvements et masses d'eau entre les réservoirs sont relativement constants d'une année à une autre. La Figure I.1 indique les volumes d'eau échangés entre les principaux réservoirs avec pour référence les précipitations ayant lieu sur les surfaces continentales.

En moyenne globale annuelle, 39% de ces précipitations continentales proviennent de l'évaporation des océans, correspondant à la différence entre les quantités qui s'en évaporent (42.4%) et qui s'y précipitent (38.5%). La majeure partie (61%) des précipitations continentales provient de l'évapotranspiration continentale.

Les processus qui composent l'évaporation puisent majoritairement leurs ressources en eau dans le sol.

La disponibilité et la répartition des masses d'eau de ce réservoir sont donc déterminantes pour le cycle de l'eau et les précipitations sur les surfaces continentales.

I.3 Le sol

Le sol se définit comme la pellicule superficielle de l'écorce terrestre. Il résulte de l'altération de la roche mère à laquelle s'ajoute une fraction de matière organique, d'air et d'eau. La quantité d'eau qu'un sol peut contenir est très variable dans le temps et dans l'espace et d'un type de sol à un autre.

I.3.1 Caractéristiques physiques et chimiques du sol :

Le sol est un milieu très hétérogène, il est caractérisé par deux structures : les propriétés physiques et les propriétés chimiques (**Gobat et al., 1995**).

I.3.1.A Texture du sol :

La texture d'un sol correspond à la répartition dans ce sol des minéraux par catégorie de grosseur (en fait, diamètre des particules supposées sphériques) indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. La texture du sol ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique.

Classement des particules :

Les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre : blocs, galets et graviers (diamètre > 2 mm) sont classés à part. Cette classification est due au physicien suédois Atterberg, (**Calvet, 2003**)

La granulométrie proprement dite concerne la terre fine :

sables : > 50 μm

limons : de 50 μm à 2 μm

Argiles : < 2 μm

Classification des textures :

Cette classification est représentée à l'aide d'un triangle, appelé triangle des textures, dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile.

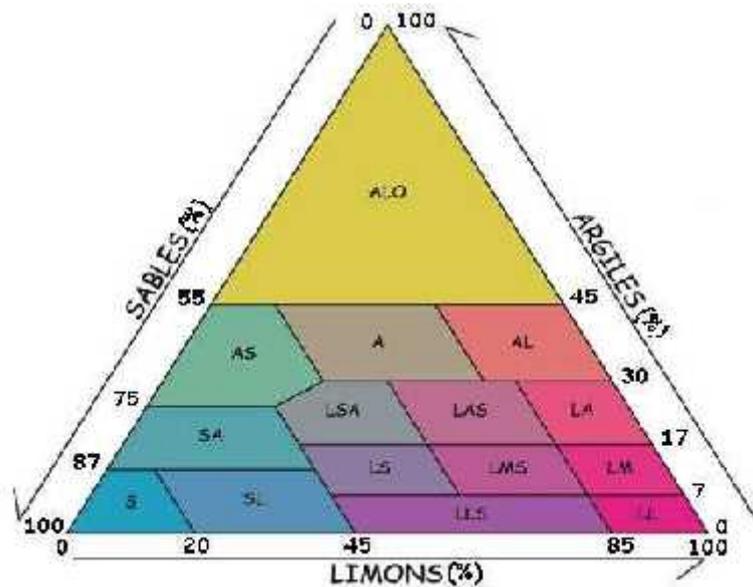


Fig. I.2 – Classification texturale des sols en fonction la granulométrie

Il existe de nombreux triangles de texture. Le plus utilisé est le triangle textural selon l'USDA.

Il est possible de regrouper les textures en quatre classes fondamentales, qui permettent de définir les principales propriétés du sol :

- **texture sableuse** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.
- **texture limoneuse** : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et calcium.
- **texture argileuse** : sol chimiquement riche, mais à piètres propriétés physiques; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (à l'état humide), ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables.
- **texture équilibrée** : elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

Exemple de granulométrie favorable à la culture : 20 à 25 % d'argile, 30 à 35 % de limons, 40 à 50 % de sables.

I.3.1.B Structure du sol

La structure du sol découle essentiellement de la distribution granulométrique de ses éléments solides et de l'existence de forces de nature électrostatique dues aux sites chargés des minéraux argileux et de l'humus (**Musy & Soutter, 1991**).

A-Importance de la structure du sol

La structure du sol est définie comme le mode d'organisation des différentes particules de sable, de limon et d'argile entre elles. Les particules isolées, une fois assemblées, apparaissent comme des particules plus grosses. C'est ce qu'on appelle des grumeaux. Ces grumeaux s'organisent en agrégats.

Les particules et les grumeaux peuvent s'agréger de différentes façons, ce qui donne diverses structures de sol. De la structure dépend en grande partie la circulation de l'eau dans le sol. La structure du sol joue un rôle primordial dans le développement des racines et dans la circulation de l'eau dans le sol.

B-Degrés de structure du sol

Par définition, le degré de structure est l'intensité d'agrégation, qui exprime la plus ou moins grande cohésion d'assemblage des particules à l'intérieur des grumeaux et l'adhérence entre les grumeaux dans les agrégats. Comme ces propriétés varient avec la teneur du sol en eau, il faut établir le degré de structure alors que le sol n'est ni exceptionnellement humide, ni exceptionnellement sec. Il y a quatre principaux degrés de structure, classés de 0 à 3, comme suit (**Calvet, 2003**):

0. Sans structure. Il n'y a aucun agrégat, ni organisation visible des lignes naturelles de faiblesse, comme dans:

- une structure massive (sol cohérent), où l'horizon entier paraît cimenté en une seule masse;
- une structure à grains isolés (sol non cohérent), où les particules ne montrent aucune tendance à s'agréger, comme dans le cas du sable pur.

1. Structure faible. On y observe à peine, par endroits, des agrégats indistincts. Quand on le détache du profil, le matériau de sol se brise en un mélange comprenant un très petit nombre d'agrégats entiers, de nombreux agrégats brisés et quelques éléments hétérogènes.

2. Structure modérée. Le sol est bien constitué d'agrégats distincts, moyennement durables et visibles, mais non distincts dans un sol intact.

3. Structure forte. Le sol est bien constitué d'agrégats distincts, durables et très visibles dans un sol intact. Quand on le détache du profil, le matériau consiste en grandes parties d'agrégats entiers et comprend un petit nombre d'agrégats brisés et peu ou pas d'autres éléments non agrégés.

C-Classes et types de structure des sols

Par définition, la classe de structure décrit la taille moyenne des agrégats individuels. On distingue généralement cinq classes, en fonction du type de structure du sol dont les agrégats proviennent. Ce sont les structures:

- Très fine ou très mince
- Fine ou mince
- Moyenne
- Grossière ou épaisse
- Très grossière ou très épaisse.

Par définition, le type de structure décrit la forme des agrégats individuels. Les Principales structures des sols sont résumées comme suit :

1. Structure granulaire et grumeleuse. Les particules individuelles de sable, limon et argile s'agrègent en petits grains presque sphériques. L'eau circule très facilement dans ces sols. On les trouve couramment dans l'horizon A des profils pédologiques.

2. Structure anguleuse et sub-anguleuse. Les particules s'agrègent en blocs presque cubiques ou polyédriques, dont les angles sont plus ou moins tranchants. Des blocs relativement gros indiquent que le sol résiste à la pénétration et au mouvement de l'eau. On les trouve couramment dans l'horizon B où l'argile s'est accumulée.

3. Structures prismatique et en colonne. Les particules ont formé des colonnes ou piliers verticaux, séparés par des fentes verticales minuscules mais bien visibles. L'eau circule avec beaucoup de difficulté et le drainage est médiocre. On les trouve couramment dans l'horizon B où s'est accumulée l'argile.

4. Structure lamellaire. Les particules s'agrègent en fines plaquettes ou lamelles superposées horizontalement. Les plaquettes se chevauchent souvent, gênant considérablement la

circulation de l'eau. On les trouve fréquemment dans les sols forestiers, dans une partie de l'horizon A.

I.4 L'eau dans le sol

Comme cela a été défini dans le paragraphe précédent, les espaces poreux existants entre les particules solides sont occupés par de l'eau et de l'air.

La réserve en eau du sol se définit comme le volume d'eau contenu dans le sol à un instant donné. Ce volume, ou stock d'eau, est généralement exprimé en épaisseur de lame d'eau (en mm), pour être facilement comparé aux pluies et à l'évapotranspiration. C'est une grandeur dynamique qui évolue au cours du temps, sous l'action conjointe des précipitations et de l'évapotranspiration. Cependant toute l'eau du sol n'est pas utilisable par la végétation, soit parce que les racines ne colonisent pas tout le volume de sol, soit parce que l'eau est trop fortement retenue par le sol pour être extraite par les racines (**Brédan et al, 2007**).

La teneur en eau du sol ou humidité volumique, notée θ , est le volume d'eau, V_e , par volume de sol, V_s , et s'exprime en $m^3 \cdot m^{-3}$ selon l'équation suivante :

$$\theta = V_e / V_s$$

θ varie entre la saturation et l'humidité résiduelle (**Buckingham 1907**) définies dans les sections suivantes.

La teneur en eau du sol résulte des apports et des mouvements d'eau dans le sol. Cette mobilité est conditionnée par les différents états énergétiques présents dans le sol, exprimés par le potentiel hydrique h . Ce dernier traduit la quantité d'énergie totale à laquelle est soumise une molécule d'eau. h résulte de la somme de plusieurs composantes (**Hillel 1988**) :

$$h = g + m + o + p$$

où :

g est le potentiel gravitaire qui correspond à la force d'attraction terrestre, conditionnée par la distance verticale de chaque molécule de sol au niveau de référence, généralement piézométrique.

m est le potentiel matriciel. Il s'agit d'un potentiel de pression (ou pression hydrostatique) négative, la pression de l'eau étant inférieure à celle de l'air. Le potentiel matriciel est une combinaison de deux forces, dites de capillarité et d'adsorption, qui lient l'eau aux particules de sol.

Le terme de succion s , est la valeur absolue de la charge de pression ($s = -k_m k$).

Les termes de tension ou succion matricielle peuvent également être rencontrés. Il est possible que le potentiel de pression soit positif, lorsque la pression de l'eau du sol est supérieure à celle de la pression atmosphérique. Cela se produit lorsqu'on se trouve sous une surface d'eau libre, on parle alors de potentiel de submersion.

π correspond au potentiel osmotique. La pression osmotique d'une solution correspond à l'attraction exercée par la solution sur les molécules d'eau. Plus une solution est chargée en sels, plus la pression osmotique augmente, engendrant l'attraction de molécules d'eau dans la solution.

p représente le potentiel pneumatique. Il exprime la pression que la phase gazeuse, l'air, exerce dans le sol sur la phase liquide, l'eau.

Les deux derniers termes sont généralement négligés pour les études de transferts sol-végétation-atmosphère.

Les mouvements de l'eau dans le sol, régis par le potentiel hydrique, ont lieu selon une vitesse d'infiltration d'exterminée notamment par la conductivité hydraulique du sol et gouvernée par la loi de Darcy établie à partir de mesures en condition de sols saturés (**Darcy 1856**). La conductivité hydraulique d'un sol est maximale lorsqu'il est saturé car d'une part la force gravitaire est importante et la force de rétention faible, d'autre part la tortuosité est minimale en condition de sol saturé. L'écoulement de l'eau s'effectue jusqu'à rejoindre la zone de saturation permanente appelée nappe. Les mouvements de l'eau se font alors par percolation.

I.4.1 Humidité à saturation

L'humidité du sol à saturation, s_s , indique le volume d'eau maximum qu'un volume. Lorsqu'un sol est saturé tous les de sol peut contenir espaces poreux sont occupés par d l'eau, l'air y est inexistant (Figure I.3).

Lorsque l'apport en eau en surface est supérieur à la capacité d'infiltration du sol, celui-ci ne peut plus infiltrer d'eau, une accumulation d'eau en surface se crée alors. En cas de pente, un écoulement latéral appelé ruissellement peut se former.

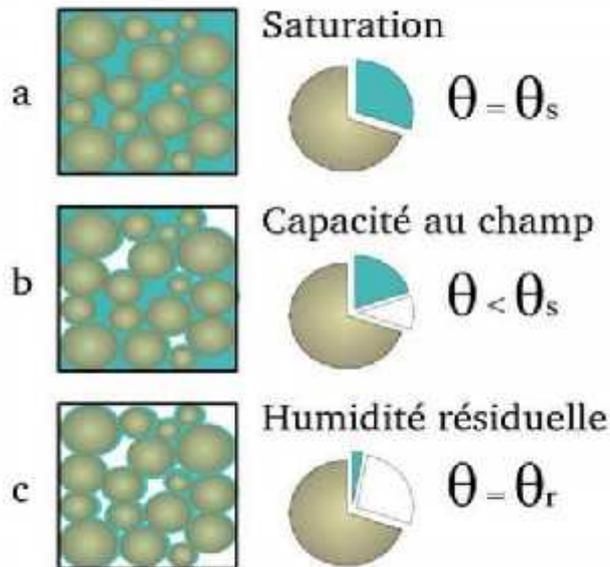


Fig. I.3 – Représentation schématique des différentes teneurs en eau du sol

I.4.2 Humidité à la capacité au champ

Dans un sol saturé les molécules d'eau s'infiltrent sous l'influence des forces gravitaires, jusqu' à ce que la capacité au champ c , soit atteinte. Également appelée capacité de rétention, elle correspond à la quantité d'eau que les particules solides du sol peuvent retenir grâce aux forces de capillarité et d'adsorption. Il s'agit du contenu en eau obtenu après que le sol se soit drainé sous l'influence des forces gravitaires. Les molécules d'eau retenues par le sol subissent une influence des forces matricielles équivalente à celles de gravité.

I.4.3. Le point de flétrissement

Le point de flétrissement, f , est le taux d'humidité du sol en dessous duquel une plante ne peut plus extraire l'eau du sol. Cela se produit lorsque la force de succion des racines de la plante est inférieure à celle des particules solides du sol. La quantité d'énergie nécessaire pour extraire les molécules d'eau des forces d'attraction des particules est devenue trop importante pour la plante.

Le point de flétrissement dépend des forces de succion qu'une plante peut mettre en œuvre. Il est propre à chaque plante sur un sol donné.

Il est possible de différencier deux points de flétrissement : permanent et temporaire. Le premier fait référence à un flétrissement irréversible de la plante. Dans le second cas, le flétrissement moins intense sera réversible, la plante est en situation de stress hydrique.

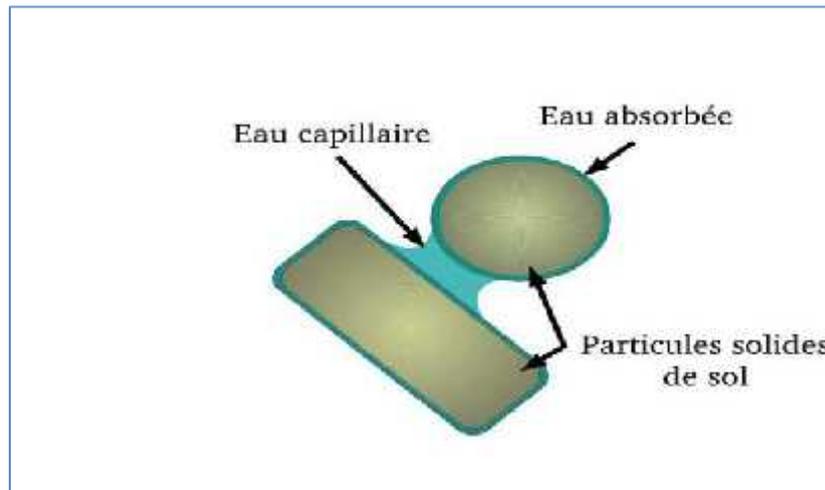


Fig. I.4 – Représentation schématique de l'eau absorbée et liée aux particules solides d'un sol (d'après Hillel 1988).

I.4.4 .L'humidité résiduelle

En dessous du point de flétrissement, la quantité d'eau dans le sol peut continuer de diminuer par évaporation. Ce changement d'état peut se faire soit au contact de l'atmosphère, les molécules d'eau remontant en surface par capillarité, soit au sein des pores du sol en passant de l'état liquide à l'état gazeux.

Lorsque l'eau présente dans les deux phases du sol, liquide et gazeuse, est en équilibre, le taux d'humidité résiduelle, w_r , ou point d'hygroscopicité, est atteint (**Musy & Soutter 1991**). Même après une longue période de sécheresse, un sol contient toujours une fraction d'eau liée à la matrice du sol par adsorption. L'assèchement total d'un sol ne peut être obtenu que dans le cadre d'expérimentation en laboratoire (séchage au four à 105°C).

I.4.5 La réserve utile

Il est possible de considérer l'humidité du sol intégrée sur la verticale. L'humidité intégrée s'exprime en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (équivalent à des mm d'eau) et est souvent utilisée pour

calculer des bilans d'eau de surface. Cette unité est également utilisée pour définir la réserve utile (RU) en eau pour la végétation. Pour être absorbée par les plantes, le taux d'humidité doit se situer entre la capacité au champ et le point de flétrissement. La réserve utile en eau du sol s'écrit :

$$RU = c - f$$

Où c : est l'humidité intégrée à la capacité au champ et f l'humidité intégrée au point de flétrissement.

I.5 Facteurs influençant l'humidité de l'eau dans le sol

Il existe plusieurs facteurs qui ont pour rôle d'influencer et de diminuer l'eau dans le sol.

I.5.1 L'évaporation de l'eau de sol

L'eau disponible dans le sol pouvant être évaporée directement du sol. Cette évaporation est conditionnée par le taux d'humidité présent en surface. Cette teneur en eau résulte des précipitations, des prélèvements par la végétation et de la capillarité. Le type de sol détermine la capacité de rétention et la capillarité qui entraîne la remontée en surface de l'humidité présente plus en profondeur, ce qui permet d'alimenter la surface évaporative.

L'albédo du sol a une incidence sur la quantité d'énergie qui sera absorbée. La nature du sol, sa rugosité ou encore sa couleur détermine la valeur de l'albédo. Plus il est élevé, plus la quantité d'énergie réfléchie est importante. La quantité d'énergie pouvant être utilisée (énergie absorbée) est égale à l'énergie incidente moins l'énergie réfléchie.

Enfin, la rugosité de surface facilite les échanges évaporatifs en augmentant la surface en contact avec l'atmosphère, mais elle induit, a contrario, une réduction de la vitesse du vent et ainsi de son efficacité.

I.5.2. La transpiration

La transpiration de la végétation est le processus d'évaporation dans l'atmosphère de molécules d'eau contenues par les végétaux. Les transferts d'eau entre les feuilles et l'atmosphère sont conditionnés par l'ouverture des stomates et alimentés par un flux de sève dans la plante. La perte en eau de la plante est compensée par les molécules d'eau extraites du sol essentiellement par les racines selon un différentiel de potentiel hydrique entre le sol et la plante (**Cruziat et al., 1995**).

Les mêmes facteurs météorologiques que pour l'évaporation vont influencer la transpiration, bien que leurs impacts sur les organismes vivants que sont les végétaux soient beaucoup plus complexes.

La surface foliaire est un facteur ayant une forte influence sur la capacité évaporatoire des végétaux. Elle définit la quantité d'eau qui peut être transpirée. Plus la surface foliaire n'est importante, plus la surface et le nombre de stomates en contact avec l'atmosphère sont importants. De plus, la rugosité de la canopée, la structure verticale et l'envergure de la plante déterminent l'influence du flux d'air à la surface foliaire. L'âge et l'espèce de la plante ont aussi une influence sur la force de succion qui peut être mise en œuvre, ce qui détermine son point flétrissement.

La profondeur du profil de sol atteint par les racines est également variable d'une espèce à une autre.

L'épaisseur de sol qui contribue à la majeure partie des interactions sol-végétation-atmosphère est appelée zone racinaire. Il s'agit de l'épaisseur de sol à partir de laquelle la végétation prélève de l'eau. Son épaisseur est très variable selon le type de couvert et les espèces et il est très délicat d'accéder à cette information à l'échelle globale. En modélisation des processus de surface, la zone racinaire est généralement fixée aux deux premiers mètres de sol, bien qu'il s'agisse d'une prise en compte très simplifiée.

Facteurs atmosphériques perturbant la transpiration

La quantité d'eau que les plantes dégagent varie fortement dans l'espace et dans le temps. Il existe de nombreux facteurs qui affectent les taux de transpiration :

-la température : le taux de transpiration augmente avec la température, particulièrement pendant la période de croissance, quand l'air est plus chaud.

-le degré hygrométrique : si le degré hygrométrique de l'air qui entoure la plante augmente, le taux de transpiration diminue. Il est plus facile pour l'eau de s'évaporer en air sec qu'en air saturé.

-le mouvement du vent et de l'air : l'augmentation des mouvements de l'air autour de la plante entraînera une plus grande transpiration.

-le type de plante : les taux de transpiration dépendent du type de plantes. Certaines plantes qui poussent dans des régions arides, tel que le cactus, conservent la précieuse eau en transpirant moins que d'autres plantes.

I.5.3 Pertes par interception

Lors d'une précipitation au-dessus d'un couvert végétal, une fraction de la pluie incidente est interceptée par le feuillage et la partie ligneuse. Ce stockage d'eau constitue un réservoir à part entière, bien qu'il ne soit pas pris en compte dans les bilans annuels en raison de sa très courte échelle temporelle. Lorsque ce réservoir est plein, les molécules d'eau vont rejoindre le sol par écoulement le long des feuilles et des branches. L'eau interceptée est ensuite évaporée sans transiter par un autre réservoir.

Il est difficile d'estimer la quantité d'eau perdue par interception. Elle est généralement approximé proportionnellement à la surface foliaire, puisque plus la surface foliaire est élevée, plus la quantité d'eau stockée est importante. Cette eau n'est pas exposée aux mêmes conditions climatiques selon la structure verticale de la plante et sa position au sein de la houpe. L'eau interceptée dans le bas de la houpe n'est pas exposée au même rayonnement qu'au sommet de celle-ci, qui par ailleurs, a une influence sur la résistance aérodynamique de la plante.

I.5.4 L'infiltration

L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines.

a- Définitions et paramètres descriptifs de l'infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion.

L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

-Le régime d'infiltration $i(t)$, nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.

-L'infiltration cumulative, notée $I(t)$, est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration, elle est donnée par la relation suivante :

$$I(t) = \int_{t=t_0}^t i(t) \cdot dt$$

Avec :

$I(t)$: infiltration cumulative au temps t [mm],

$i(t)$: régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h].

La conductivité hydraulique à saturation K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.

La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

La percolation désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines (**Musy & Soutter, 1991**).

I.6 Conclusion

Le sol est un réservoir essentiel du cycle hydrologique continental. L'eau contenue dans le sol est la source des transferts vers l'atmosphère par l'action des processus d'évapotranspiration. Il est primordial de quantifier l'humidité du sol afin d'améliorer notre connaissance des échanges sol-végétation-atmosphère et des flux énergétiques de notre planète, ainsi que les régimes de consommation en eau par les plantes, ce qui peut améliorer considérablement les conditions d'arrosages des cultures.

Chapitre II :
Humidité du sol

Chapitre II : Méthodes d'estimation de l'humidité du sol

II.1 Introduction :

L'humidité du sol est une mesure importante pour la détermination du potentiel de production d'une culture dans des pays souvent menacés de sécheresse. Elle est aussi importante dans la modélisation des bassins de drainage où l'humidité dans le sol reflète la quantité d'eau présente dans les deux premiers mètres du sol.

La végétation extrait l'eau du sol par les racines et l'émet dans l'atmosphère à travers ses stomates. La transpiration des plantes est donc déterminée par l'eau disponible pour la végétation sur l'ensemble de la zone racinaire. Par ailleurs, sur une grosse partie du globe, la disponibilité en eau est le facteur limitant pour la croissance des plantes et donc l'agriculture. Ainsi, la connaissance de l'humidité du sol est très précieuse pour détecter des périodes de stress hydrique (**Escorihuela, 2007**).

Cette humidité est toutefois susceptible de s'évaporer dans l'atmosphère. La détection rapide de conditions d'assèchement (qui peuvent nuire aux cultures ou qui peuvent indiquer le début d'une sécheresse) permet d'améliorer la production agricole et de faire des prévisions quant au volume et à la qualité des récoltes. La détection rapide de risques permet de prévenir les producteurs agricoles et aide à la planification de l'aide humanitaire. L'humidité du sol aide aussi dans la prédiction d'inondations, car un sol saturé ne peut pas absorber plus de pluie ou d'eau de ruissellement.

II.2 L'humidité du sol :

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, etc.). Elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveu ou numérique et s'exprime généralement en pourcentage.

Le terme humidité utilisé dans le langage de la construction correspond à une présence anormale d'eau dans un bâtiment. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau ou de remontée capillaire.

L'humidité du sol est un paramètre important dans le bilan hydrique du sol et en irrigation, c'est un facteur intervenant dans la modélisation du drainage, et peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Dans les régions de déforestation active, les évaluations de la teneur en humidité du sol aident à la prévision du volume de ruissellement, des taux d'évaporation et de l'érosion du sol.

L'humidité de surface du sol conditionne les échanges avec l'atmosphère par l'intermédiaire du bilan d'énergie à la surface du sol (très différent sur une surface séchée ou sur une surface humide), elle est importante en raison de son impact sur l'évaporation du sol et transpiration. Ce qui conditionne les transferts de masse et de chaleur entre la terre et l'atmosphère (Koster, 2004).

La connaissance de l'humidité du sol est donc très utile dans les modèles de prévision météorologiques via des modèles de circulation générale. Enfin, une surveillance continue de l'humidité du sol sur une grande échelle, et sur de longues périodes de temps, donne un aperçu des modifications éventuelles du climat.

Cependant, l'humidité du sol est un terme très vague et il est important de le définir. La définition la plus commune de ce terme est la quantité totale d'eau présente dans la zone insaturée.

Pour des raisons pratiques, cette humidité est souvent séparée en deux composantes, l'humidité du sol de surface, correspondant aux premiers centimètres (5cm en général), et l'humidité de la zone racinaire du sol (deuxième réservoir) (Hillel, 1988).

II.3 Les enjeux d'une connaissance de l'humidité du sol

L'humidité du sol joue un rôle majeur dans le cycle de l'eau. Elle est une variable fondamentale dans plusieurs disciplines des sciences de l'environnement, telles que l'agronomie, l'hydrologie, la météorologie et l'hydrogéologie.

La connaissance précise de l'humidité du sol et de son évolution spatio-temporelle constitue un élément clé :

-Pour surveiller la croissance de la végétation et prédire la production agricole, améliorer la gestion des ressources en eau et mieux comprendre les processus de transferts d'eau et de chaleur dans l'interaction entre surfaces continentales et l'atmosphère, et enfin d'améliorer les prévisions météorologiques.

-L'humidité du sol est un facteur important qui influence le processus de germination des semences, d'émergence ainsi que la croissance végétale.

-Elle est aussi un paramètre d'alerte dans la détection rapide d'états d'assèchement afin d'optimiser l'irrigation ce qui permet d'améliorer la production d'une culture, de faire compromettre les cultures, mais il peut indiquer le début des sécheresses de manière à détecter rapidement des risques et permettre de prévenir des producteurs agricoles ayant des planifications plus tôt pour contribuer à baisser les souffrances des récoltes.

Dans la zone racinaire, c'est l'interface entre la végétation et le système hydrologique qui joue un rôle prépondérant : la valeur de l'humidité de la zone racinaire conditionne l'assimilation de CO₂ à travers les stomates et les dégâts possibles de l'appareillage photosynthétique. ainsi, la détermination de l'humidité du sol dans la zone racinaire est un objectif important pour l'observation de la croissance des plantes, à court et moyen terme, ainsi que pour produire des indices de sécheresse des sols, et des cartes de rendement agricole en vue de contrôler, surveiller et faire des prévisions de production d'une culture.

- La connaissance précise de l'humidité de surface est aussi importante pour la reconstruction des champs de précipitation, de l'évaporation, des infiltrations et pouvoir améliorer la prévision de ruissellement et des risques d'inondation en effet, l'humidité du sol est un volume d'eau stocké dans le sol, que ce soit en surface (environs 5 cm) ou à des niveaux plus profonds. Elle peut contrôler la répartition des eaux de ruissellement et d'infiltration efficace des précipitations dont tout ou une partie peut contribuer à recharger les nappes aquifères. L'humidité du sol permet de faire la prévision d'inondation sur la base des sols saturés qui n'absorbent plus de pluie et d'eau de ruissellement, et toute précipitation se transforme en inondation.

-Les flux d'eau et d'énergie à l'interface terre /atmosphère sont fortement dépendants de l'humidité de surface. Elle affecte non seulement l'évapotranspiration mais aussi l'aptitude des sols à stocker la chaleur, leur conductivité thermique, et la partition de l'énergie entre flux de chaleur latent et sensible. C'est donc une variable clé, qui conditionne le transfert de l'eau et de la chaleur à l'interface sol/atmosphère.

-L'humidité du sol est enfin une variable clé pour les simulations numériques en météorologie ainsi que pour les modèles climatiques. On montre que la prédictibilité des précipitations sur les terres émergées augmente par la connaissance de l'humidité du sol et notamment en zones sensibles comme le sahel (**Escorihuela, 2006**).

L'utilisation de champs d'humidité obtenus par satellite améliore l'analyse et donne des résultats plus précis dans la prévision météorologique (**Kerr & Cabot 2009**).

II.4 Les différentes techniques de mesures de l'humidité du sol

L'humidité du sol (ou eau contenue dans le sol) détermine de façon essentielle la variation des caractéristiques de différents matériaux ou sols.

Le taux d'humidité d'un sol en particulier va déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques concernent aussi bien les intrants solides que liquides qui vont pénétrer dans le sol.

Il existe différentes techniques de mesure de l'humidité d'un sol (ou autres substrats équivalents), certaines sont analysées au laboratoire, d'autres donnent l'état du sol in situ.

II.4.1 Méthodes thermo-gravimétriques

C'est une méthode classique pour mesurer l'humidité d'un échantillon de sol, elle consiste à prélever de manière très minutieuse à l'aide d'une tarière un échantillon de sol dans un cylindre dont le volume et le poids sont connus. Le poids de l'échantillon est mesuré avant et après passage dans une étuve afin d'en déduire l'humidité massique de l'échantillon (maintenir l'échantillon à 105°C, jusqu'à ce que le poids soit constant, généralement autour de 48 heures).

La connaissance de la densité donne la teneur en eau volumique du système. C'est la méthode la plus précise de mesure de l'humidité du sol, elle est indispensable pour calibrer les autres méthodes de mesures, en particulier la méthode neutronique (**Hillel, 1988**).

Elle présente néanmoins de nombreux inconvénients :

- Longue à mettre en place, la méthode est très fastidieuse pour de grands périmètres ;
- Pour de nombreux échantillons, la méthode est souvent qualifiée de destructrice pour le sol, car elle exige bon nombre d'échantillons, surtout si l'on envisage de réaliser un profil d'humidité sur plusieurs centimètres de sol (**Walker et al, 2004**).
- Les résultats ne sont pas instantanés, et doivent être traités au laboratoire.

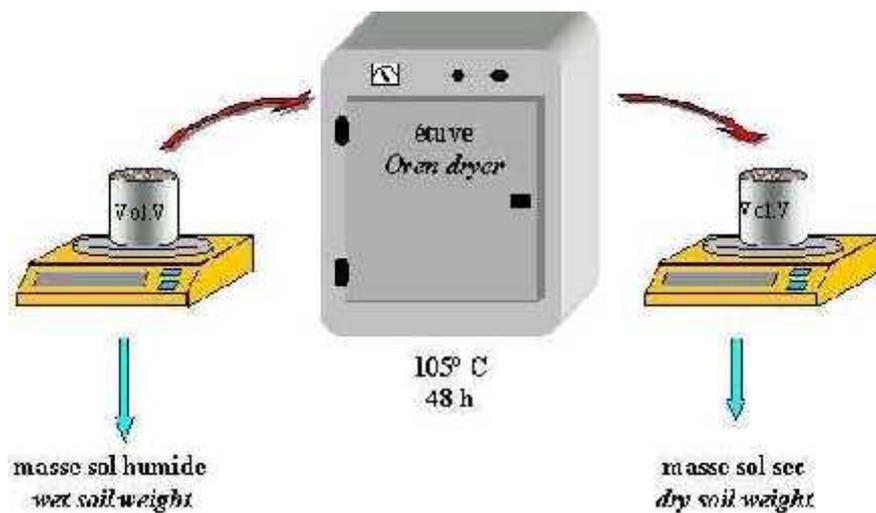


Figure II.1. : Schéma type de la méthode thermogravimétrique.

II.4.2 - Mesures par les sondes neutroniques

Cette méthode reste particulièrement efficace mais chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil) pour être utilisée simplement par un opérateur.

-Le principe de l'humidimètre neutronique s'appuie sur l'utilisation d'une faible source radioactive qui émet en continu des neutrons rapides. Ces neutrons perdent leur énergie lorsqu'ils percutent des atomes d'hydrogène, devenant lents. Ainsi, le nombre de neutrons lents retournant à la source est lié à la quantité d'atomes d'hydrogène entourant la source. Si l'on admet que la majeure partie de l'hydrogène appartient aux molécules d'eau, ce nombre estime la quantité d'eau autour de la source. Cette hypothèse constitue la base de la mesure d'humidité des sols avec la sonde à neutrons.

Lorsque la source est placée dans le sol selon le dispositif présenté sur la figure 2.1, celle-ci permet d'y estimer la quantité d'eau environnante. L'émission des neutrons étant sphérique, la sonde « explore » l'eau contenue dans le volume sphérique d'environ 40 cm de rayon (Daudet and Vachaud, 1977).

De façon pratique, la sonde à neutrons est posée sur un tube d'accès en aluminium placé dans le sol, à l'intérieur duquel la source est guidée. Ce tube, installé une fois pour toute sur un site donné.

Un détecteur placé près de la source compte le nombre N de neutrons lents qui reviennent à la source.

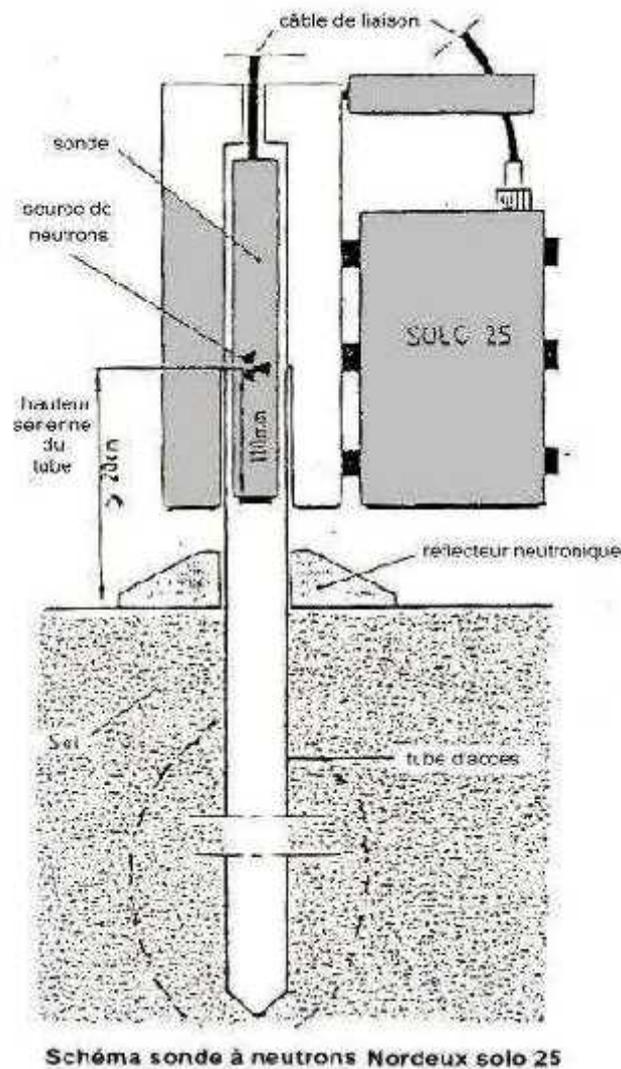


Figure II.2 : Schéma d'un dispositif d'humidimètre à neutrons

La difficulté majeure de cette méthode repose sur l'installation d'un tube d'accès neutronique de quelques centimètres jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres, rendue difficile à cause des hétérogénéités du sol. De plus pour obtenir la teneur en eau il est nécessaire de réaliser une calibration en fonction du type de sol étudié.

De plus elle présente un autre inconvénient d'ordre technique, puisque la méthode est très influencée par le rayonnement superficiel.

II.4.3 Méthode par Tensiométrie

La canne tensiométrique se présente comme un tube obturé à l'une de ses extrémités par un bouchon auto-cicatrisant. L'autre extrémité est constituée d'une céramique poreuse qui assure la circulation de l'eau et donc de la solution du sol à l'intérieur du tensiomètre et pour créer ainsi un équilibre physico-chimique entre l'eau du tube et celle du sol (Figure II.3).

Le tensiomètre, dont on a au préalable saturé la céramique poreuse, est placé sur le site à l'aide d'une tarière. Dans notre cas, chaque site est équipé de quatre tensiomètres qui nous indiqueront la tension aux profondeurs 25, 50, 75 et 100 cm.

Le tensiomètre doit être rempli d'eau jusqu'à 5 mm du bord supérieur du tube. Le tube est alors fermé à l'aide du bouchon autocicatrisant. Le déficit en eau du sol entraîne une diminution du niveau dans le tube et crée ainsi une tension qui sera mesurée à l'aide d'un tensimètre électronique à aiguille hypodermique de type « SMS 2500S ».

La mesure tensiométrique va nous permettre d'évaluer la succion que crée le déficit en eau du sol à l'intérieur des tubes. Les « Tensionics » ont également la propriété de posséder des capillaires qui permettent de collecter les échantillons d'eau contenus dans la céramique poreuse. En effet, après 8 à 10 jours, la diffusion des ions à travers la céramique permet d'obtenir un équilibre chimique entre la solution contenue dans la céramique et la solution du sol.

Bien que l'eau contenue dans la céramique soit en équilibre avec l'eau du sol, il n'en va pas de même avec l'eau contenue dans les capillaires ce qui entraîne une dilution des ions dans l'échantillon. Il faut donc appliquer une correction des concentrations mesurées dans ces échantillons.

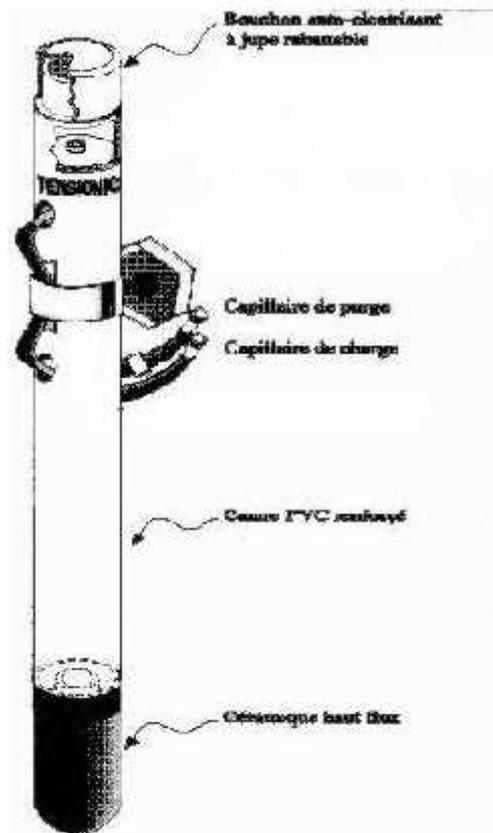


Figure II.3 : Schéma d'une canne tensiométrique

Enfin, l'utilisation de cet appareil présente des difficultés lorsque les conditions climatiques sont sèches. En effet, lorsque le déficit en eau du sol est trop important, la diminution du niveau dans le tube est telle que celui-ci fini par se vider. Il est alors impossible de mesurer la succion ou de prélever un échantillon.

II.4.4 Méthode capacimétrique:

Méthode électromagnétique (mesure de la permittivité diélectrique) économique, mais au volume d'influence limité (1 à 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, la température et la salinité.

Les humidimètres capacitifs gagnent en popularité maintenant qu'ils sont offerts sur le marché, car ils fournissent des lectures continues. Il reste qu'en raison de leur coût, ces appareils servent principalement dans des essais. Les sondes capacitives actuelles sont conçues pour être installées en un lieu fixe dans le champ, pour toute la saison de croissance.

Elles sont compatibles avec des niveaux élevés d'automatisation et/ou de télémétrie. Des contraintes de coût limitent souvent le nombre de sondes capacitives utilisées. L'emplacement de l'instrument est primordial pour assurer une information représentative du champ surveillé.

Pour son utilisation Dans l'estimation de l'humidité du sol, on installe une conduite d'accès imperméable à l'eau dans laquelle on insère la sonde (les conduites d'accès sont généralement installées en permanence et ne bougent pas d'une année à l'autre). De nombreux points de mesure d'humidité peuvent être fixés le long de la sonde pour obtenir des lectures à différentes profondeurs, selon la profondeur d'enracinement des cultures.

II.4.5 Méthode TDR

Née dans les années 1980, la méthode TDR (réflectométrie temporelle) se place comme une méthode incontournable tant par la qualité que par la convivialité de ses mesures.

Le principe de cette mesure est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique le long d'une électrode introduite dans le sol. Le temps de propagation de ce pulse dépend étroitement de l'humidité du sol (mesure de permittivité diélectrique).

Son volume d'influence est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol.

Cette technologie permet des mesures précises à un tarif maintenant abordable.

-les sondes TDR cherchent aussi à mesurer la permittivité relative du sol mais cette mesure s'effectue grâce à un générateur-enregistreur d'ondes électromagnétiques. Une onde est créée par la sonde et se propage le long d'un guide d'ondes (tige métallique parallèle) puis arrivant au bout de ce guide, se réfléchit et est enregistrée par la sonde (figure II.4).

Le temps d'aller-retour de l'onde permet de calculer sa vitesse (V) qui est liée aux parties réelles et imaginaires de la permittivité relative du sol.

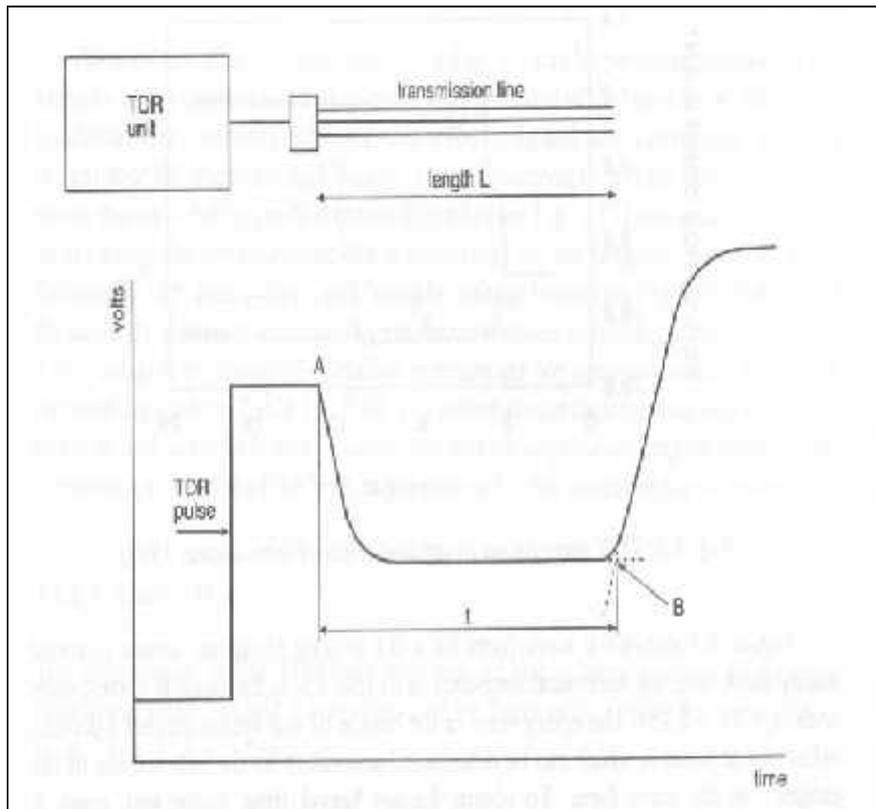


Figure II.4. : Schéma d'une sonde TDR et du signal théorique obtenu.

La partie imaginaire étant négligeable devant la partie réelle aux fréquences utilisées dans les sondes TDR, il est possible de simplifier la relation (2.1), vitesse de l'onde (v):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Avec C la célérité d'une onde électromagnétique dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s).

La relation de Topp (1980) est très souvent utilisée pour retrouver la teneur en eau :

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,9 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r + 4,6 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r$$

Néanmoins, cette relation peut être incertaine notamment dans le cas de sol très conducteur.

Les sondes TDR investiguent un volume légèrement plus important (dépendant principalement de la longueur du guide d'ondes) que les sondes capacitives mais leur mise en place est aussi délicat.

II.5 Modélisation de l'humidité du sol

La détermination de l'humidité du sol peut être approximé par des modèles conçus spécialement pour déterminer l'humidité du sol. Dans ce cas, il est nécessaire de passer successivement par quatre phases:

- la dynamique de l'eau dans le sol ;
- l'évaluation de la réserve en eau du sol ;
- la circulation de l'eau du sol dans son paysage :
- le bilan hydrique du sol.

A chaque phase, on peut établir un modèle partiel, dont les éléments sont constitués de questions auxquelles l'interprétation des images et des photographies permet presque toujours de répondre.

On passe successivement d'un modèle à l'autre afin d'intégrer successivement les aspects statiques et dynamiques de l'eau dans le sol, puis les aspects spatiaux et enfin et temporel (bilan hydrique).

Le modèle 1 : dynamique de l'eau dans le sol

Il faut suivre l'enchaînement des questions proposées. On a indiqué en italique les questions dont les réponses pouvaient être trouvées pour l'interprétation des images ou photographies.

Les chaînes de questions proposées se terminent soit par divers types de dynamiques qui seront réutilisés dans le modèle 3, soit par des renvois au modèle 2 ou au bilan hydrique.

Le modèle 2 : évaluation de la réserve en eau du sol

Ce modèle ne compte dans l'évaluation en eau du sol que certains des éléments nécessaires qui sont interprétables sur des documents de télédétection.

Les limites de profondeurs : 40-80-120 sont arbitraires. Ils correspondent à un classement qualitatif ordonné. A partir de ces éléments, on renvoie à des évaluations R+1, R-2, R+3, etc.....

Ceci permet de classer les réserves en eau des divers sols d'une région.

Il ne peut être question de donner des valeurs précises de la réserve avec ce modèle. Une fois le classement fait, on peut alors donner une valeur minimale et une valeur maximale de la réserve en eau des sols de la région étudiée, et ainsi, caler et déterminer les valeurs des réserves en eau de chaque sol.

Pour un sol déterminé, il est possible d'avoir plusieurs couches de sol dont les réserves soient différentes. Il faut donc pour le sol faire la somme des réserves et donc, effectuer plusieurs boucles sur le modèle.

Pour une même couche de sol, plusieurs aspects peuvent intervenir.

On obtient plusieurs évaluations qu'il faut sommer en S. par exemple, pour un sol de texture limoneuse, et battant, il faut faire :

$$(R-1)+(R-1) \dots S=R-2$$

Cette somme sera multipliée par un facteur de profondeur. On arrive ainsi au calcul de RE : réserve en eau du sol.

Le modèle 3 : humidité des sols

Ce modèle prend en compte la position topographique du sol étudié, afin d'évaluer les arrivées ou les départs d'eau au niveau du paysage.

Il nécessite la prise en compte des résultats des modèles 1 et 2. Il permet de déterminer l'humidité du sol en fonction des temps, la référence étant celle des états successifs d'humidité du sol calculés par la méthode classique du bilan hydrique (**Girard, 1973**).

A partir de ces modèles, on peut donner une appréciation :

- sur la valeur de la réserve en eau du sol.
- sur la durée des périodes : d'engorgement du sol, d'assèchement du sol, de sécheresse du sol, de reconstitution du stock en eau du sol
- sur la dynamique de l'eau dans sol.

Avec l'interprétation des images et photographies, on peut établir la répartition spatiale de l'humidité des sols. Si l'on peut disposer de documents pris à diverses dates, on peut alors ajuster le modèle et espérer une prévision des divers états d'humidité des sols.

II.6 Conclusion

L'humidité du sol est la source d'eau importante de la surface continentale dans le maintien la vie sur la terre. Une connaissance précise de l'humidité du sol et son évolution spatio-temporelle est un élément clé pour surveiller la croissance de la végétation, pour pronostiquer la production agricole, pour améliorer la gestion des ressources en eau ainsi que les prévisions météorologiques et notamment pour mieux comprendre les processus de transfert d'eau et de chaleur dans l'interaction entre surfaces continentales et l'atmosphère.

Chapitre III :

Cartographie

Chapitre III : Analyse des méthodes de cartographie

III.1 Introduction

L'humidité du sol constitue un important paramètre dans de nombreuses applications en matière de ressources naturelles, comme l'irrigation et le drainage, la modélisation hydrologique, ainsi que les prévisions des débits et des inondations. L'étude de l'humidité du sol est largement utilisée pour lutter contre la dégradation du sol.

Dans ce chapitre, on détaille la cartographie et ses principales composantes et techniques. Une attention particulière est dédiée aux types de cartographie en particulier satellitaire, qui représente une nouvelle technique.

III.2 La Cartographie

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes géographiques et géologiques. Elle est très dépendante de la géodésie, science qui s'efforce de décrire, mesurer et rendre compte de la forme et des dimensions de la Terre. Le principe majeur de la cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace généralement tenu pour réel (**Brabant, 2010**).

La création de carte débute avec la définition du projet cartographique. La collecte d'informations est en deux parties :

1. le relevé des contours et de l'espace support à représenter (fond de carte) ;
2. le relevé des données statistiques à représenter sur cet espace. Vient ensuite un travail de sélection des informations, de conception graphique (icônes, styles), puis d'assemblage (création de la carte), et de renseignement de la carte (légende, échelle, rose des vents).

Cette carte utilise des données satellites pour définir l'espace et la topographie, y sont ajoutés des données routières et humaines sélectionnées.

La création cartographique est également étudiée, ses méthodes commentées. Des analyses mathématiques comparent par exemple les distorsions des projections cartographiques, tandis que les théories de l'information graphique donnent des conseils quant au style nécessaire à un message graphique clair. Étant le fruit de sélections humaines, la carte

peut omettre, nier, tromper. L'étude comparative des cartes est ici intéressante, puisqu'elle révèle les biais. Les acteurs principaux de la cartographie étaient traditionnellement les explorateurs et les cartographes, afin de définir l'espace des États, et les espaces des territoires explorés. Aujourd'hui, la cartographie moderne est transdisciplinaire et s'applique à quantité de sciences: la géologie pour les géologues, la biologie pour les biologistes, l'urbanisme pour les architectes, la sociologie pour les sociologues, et nécessitent une collaboration entre cartographes, experts, et analystes de données. Les données numériques et satellitaires font de l'informatique et de l'informaticien de nouveaux partenaires-clefs.

L'utilisation des principaux types de sols comme support cartographique souffre d'une certaine homogénéisation de la réserve en eau du fait de l'absence de prise en compte des contextes pédologiques subrégionaux. Les techniques d'inférence spatiale (krigeage) constituent dès lors des solutions potentielles en apportant davantage de finesse à la carte produite. En effet, ces techniques cherchent à prédire la valeur d'un point non échantillonné en utilisant généralement une combinaison linéaire de données ponctuelles inscrites dans un voisinage donné autour de ce point (**Baillargeon, 2005**). C'est cette restriction à un certain voisinage qui permet une meilleure adaptation aux situations locales.

III.2.1 But de cartographie

La cartographie a pour but la représentation de la terre ou d'une autre planète sous une forme géométrique et graphique grâce à la conception, la préparation et la réalisation de cartes. La cartographie est à la fois une science, un art et une technique.

C'est une science, car ses bases sont mathématiques, notamment en ce qui concerne la détermination de la forme et des dimensions de la terre puis le report de la surface courbe de la terre sur un plan (la carte) grâce au système des projections et enfin l'établissement d'un canevas planimétrique et altimétrique. L'enjeu est la précision et la fiabilité de la carte.

C'est un art, car en tant que mode d'expression graphique, la carte doit présenter des qualités de forme (esthétique et didactique grâce à ses capacités visuelles du lecteur. Cela exige de la part du concepteur et du réalisateur des choix dans la représentation.

C'est enfin une technique, car elle nécessite d'amont en aval, l'emploi d'instruments dont les progrès ont bouleversé toute la filière cartographique (photographies aériennes, satellites, ordinateurs, impression et diffusion, etc.).

III.2.2 Unité cartographique

L'unité cartographique de sols est l'unité de base d'une carte. Dans les cartes à petite échelle, les unités cartographiques de sols sont rarement occupées par un seul sol, mais contiennent généralement un sol dominant combiné à des sols associés mineurs. Lorsque les différents sols formant une unité cartographique composent une mosaïque géographique clairement identifiable, ils constituent alors une association de sols. Si cette mosaïque n'est pas évidente, ils forment un complexe de sols.

Chaque type de sol rencontré dans chaque unité cartographique de sols se caractérise par ses propriétés et qualités de terre, qui elles-mêmes sont liées aux besoins édaphiques des plantes ou à l'aménagement et la conservation requis pour son exploitation.

III.3 Les techniques de cartographie

Les techniques précèdent les méthodes et engendrent une cartographie d'amont ou une cartographie «mathématique » ou «topographique ».sachant que ces qualificatifs sont peu satisfaisants. Cette cartographie a pour finalité majeure d'établir les fonds de carte*nécessaires à l'élaboration de toute carte. C'est là où se situent les fondements mathématiques et géométriques de la cartographie.

III.4 Etapes de conception d'une cartographie

Cet aspect devrait être constamment dans l'esprit des concepteurs, réalisateurs et lecteurs de cartes, s'il en était besoin, les uns y gagneraient en rigueur et en modestie, les autres en prudence et en lucidité.

C'est lors de la conception et de la réalisation que se décide une très grande part de l'effet final du document cartographique.

- La cartographe doit d'abord appréhender la réalité du terrain afin de répertorier et d'organiser les objets géographiques, c'est le cartographe qui décide quelles sont les données à conserver ou à escamoter. Cette sélection est souvent indispensable, car elle garantit la lisibilité du document final. A ce choix des données (pourvu que celles-ci soient fiables et homogènes) s'ajoutent généralement un traitement de celles-ci. Par exemple, parmi les méthodes de découpage en classes des séries statistiques, il faut savoir choisir, sachant que chaque méthode possède ses propriétés et débouchent sur un résultat cartographique exclusif.

- L'informatique au service d'une nouvelle cartographie : l'apparition de l'informatique dans le domaine de la cartographie est déjà ancienne puisque les premières cartes par ordinateur

datent du début des années 60. Néanmoins, à cette époque, la technologie encore balbutiante et surtout les obstacles financiers empêchaient l'expansion de la cartographie par ordinateur qui ne concernait qu'un noyau de spécialistes. Cette révolution a bouleversé toute la filière cartographique, d'amont en aval. Pour le cartographe néophyte, la cartographie par ordinateur soulève un flot de questions, car celle-ci possède son jargon, ses méthodes et ses spécialistes.

- Le décodage de la carte induit une absence de spontanéité de la part du lecteur. Tout lecteur a un vécu, une culture, une aisance et une formation qui font que le message sera reçu différemment et plus ou moins fidèlement. En conclusion ; le cartographe ,en sélectionnant, le fond de carte adapté, en rassemblant et en traitant les données et en choisissant la manière dont il les représente graphiquement est un auteur. Au-delà des biais que peut entraîner une telle intervention du cartographe, l'avantage réside dans le fait que la carte est un outil au service du lecteur. Ce dernier n'a qu'à en disposer pour agir .en recevant le message cartographique, le lecteur interprété lui aussi la structure du message originel .il appartient donc d'une part au cartographe d'apporter un maximum de rigueur afin d'atténuer les irrégularités inhérentes à toute démarche de communication et d'autre part au lecteur d'être conscient que la carte n'est pas un calque du monde.
- La prévision : le terme « prévision » recouvre à la fois l'objet(le résultat), la méthode (l'ensemble des techniques cherchant à réduire l'incertitude liée à la non connaissance du futur)et l'action(le fait de faire la prévision).ces différentes significations ont fréquemment utilisées sans distinction.

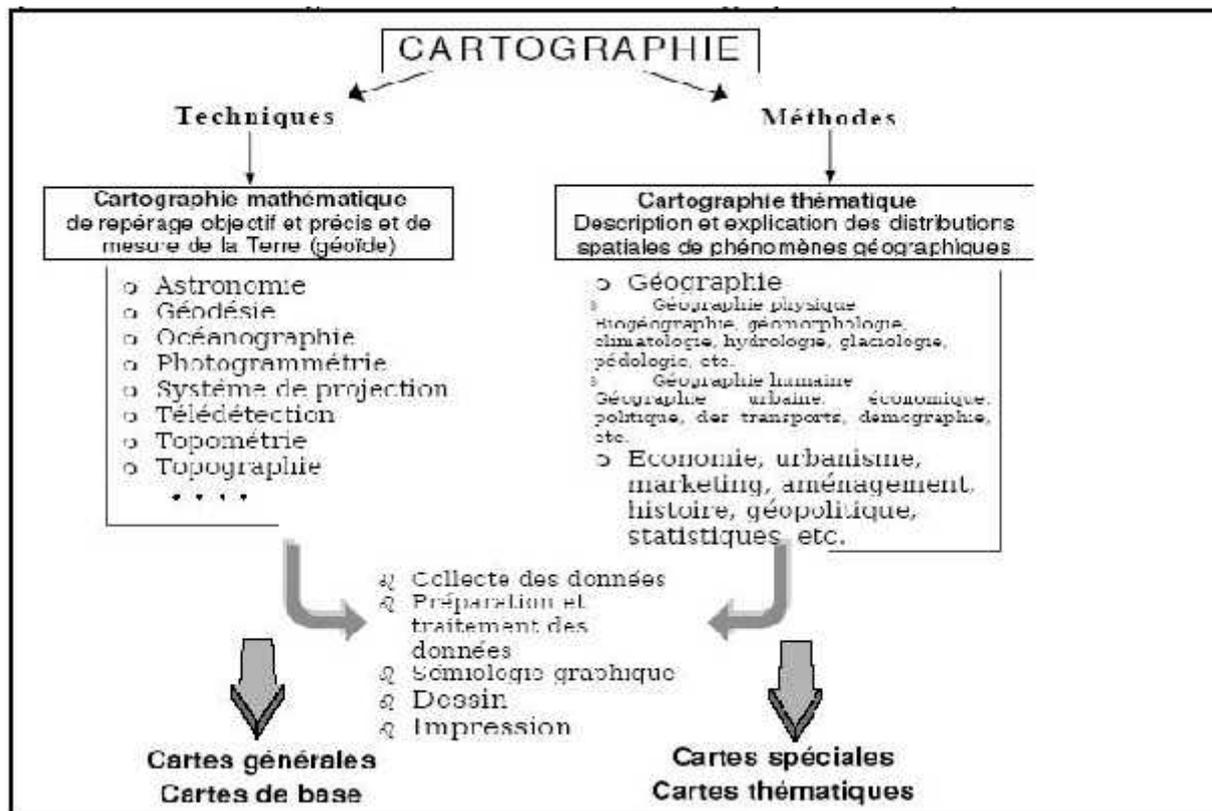


Fig.III.1 : représente les techniques et les méthodes de cartographie.

III.5 Les méthodes cartographie

Les méthodes de la cartographie se sont développées ces dernières années avec le développement de l'outil informatique et l'avenue du satellite. Ainsi on peut classer les méthodes de cartographie en deux grandes catégories : les méthodes numériques, et les méthodes dites aéroportées, qui englobent les techniques récentes telles que le Radar et l'imagerie satellitaire.

III.5.1 Méthodes numériques

Le principe général de la cartographie numérique des sols est résumé Fig. (III-2). Il s'agit de prédire des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant d'une part les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier et, d'autre part, les données spatiales représentant des éléments du paysage en relation (de causalité ou non) avec les sols, appelées dans la suite « covariables du sol ».

Dans ce cas, on rajoute une dimension spatiale supplémentaire, la notion d'incertitude ou de variabilité « non prédictible », ainsi que le recours possible à des données spatiales

numériques (Modèles Numériques d'Altitude, images de télédétection, données de capteurs de propriétés de sol) qui sont devenues disponibles pour les cartographes.

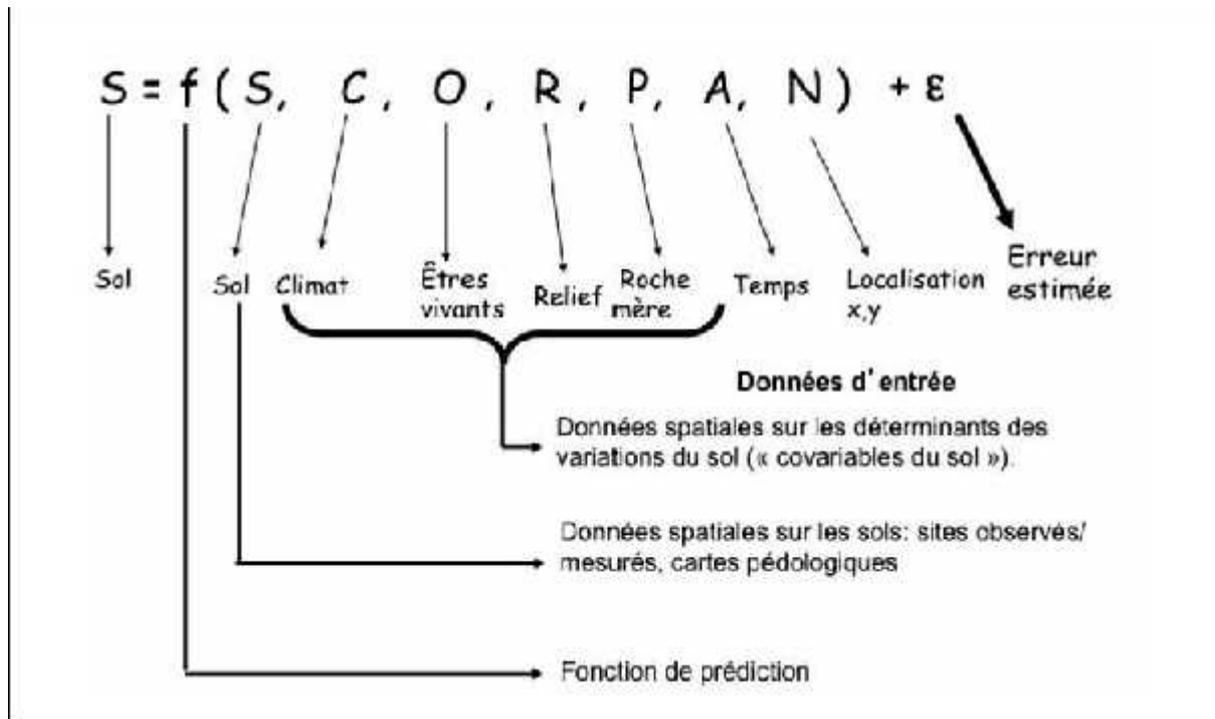


Fig. III .2 : Principe général de la cartographie numérique des sols

La figure (III.3) illustre un exemple pour la cartographie par satellite :

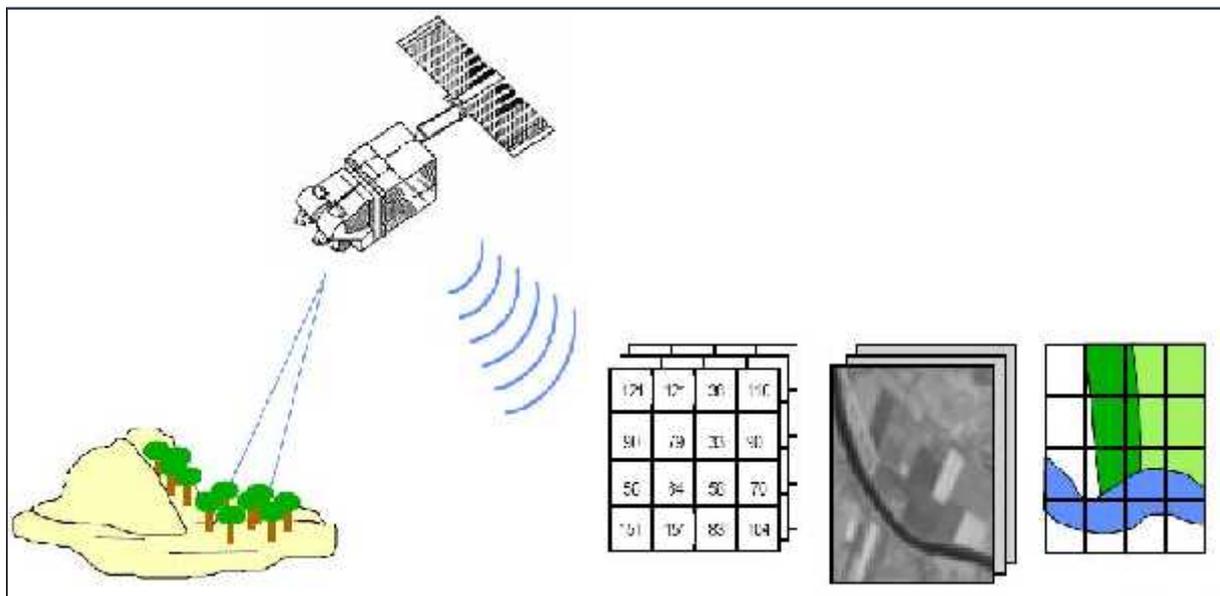


Fig.III.3 : Principe de l'image numérique

III.5.2 Méthodes satellitaires

III.5.2.1 Les système d'information géographique

Un SIG est un ensemble de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques, et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement.

Un SIG est de ce fait un outil complet de connaissance, d'aide à la décision et de communication. Il ne peut être réduit à sa seule dimension de logiciel, même si dans le langage courant, c'est assez souvent le cas. Enfin, un SIG ne saurait être réduit à la fonctionnalité de cartographie automatique même s'il permet de produire des cartes qui restent un outil privilégié de réflexion et d'information. Les sciences de l'information géographique ou " géomatique " constituent ainsi un réel savoir-faire que l'on ne saurait limiter à la seule connaissance et maîtrise d'un logiciel informatique.

Dans tous les cas, le SIG permet la collecte et le stockage, la visualisation, la superposition, l'interrogation et l'analyse des données géo-référencées. Sa logique systémique en constitue le principal atout dans l'identification et l'évaluation des questions de tous ordres. Dans le champ de la santé, il permet l'étude des dynamiques spatiales pour la compréhension de certains phénomènes naturels ou socio-économiques.

Dans le champ plus spécifique de la santé environnementale, les SIG sont notamment utilisés dans le processus d'évaluation de l'exposition des personnes. Ils permettent de préciser la délimitation spatiale de la population étudiée (à l'aide des données d'occupation du sol, par exemple), d'identifier des sources et des voies d'exposition potentielles (industries polluantes, principales infrastructures routières, etc.), d'intégrer à l'analyse les niveaux de certains polluants dans l'environnement pour finalement estimer l'exposition des populations. (Nuckols 2004).

III.5.2.2 Méthode satellitaire par télédétection

La télédétection se rapporte à l'ensemble des techniques liées à l'analyse et à l'exploitation des données obtenues par des satellites d'observation des ressources terrestres et environnementales et par photographie aérienne.

L'objectif principal de la télédétection est de cartographier les ressources terrestres et d'en effectuer le suivi. Par rapport aux techniques de levée classiques, la télédétection par satellite est précise et rentable, et permet d'obtenir des données en temps utile.

Un satellite de télédétection est un satellite artificiel qui effectue des observations à distance par réception d'ondes électromagnétiques l'aide de capteurs passifs ou actifs.

Ceux-ci peuvent être des caméras ou des spectromètres (instruments passifs), des radars (instruments actifs), Le satellite de télédétection s'oppose au satellite qui effectue des observations en utilisant des instruments effectuant des mesures in situ par exemple pour étudier le champ magnétique, les champs électriques, la composition de l'exosphère, le plasma, la poussière interplanétaire.

La télédétection par satellite est principalement utilisée en météorologie (atmosphère), climatologie (atmosphère, terres émergées, océans) et en végétation. Les longueurs d'ondes et les résolutions spatiales sont variables. Cette approche permet de suivre de manière régulière et continue l'évolution de la végétation, de la couverture neigeuse, des aérosols en suspension dans l'atmosphère, de certaines pollutions et sert de base à une nouvelle méthode de cartographie numérique.

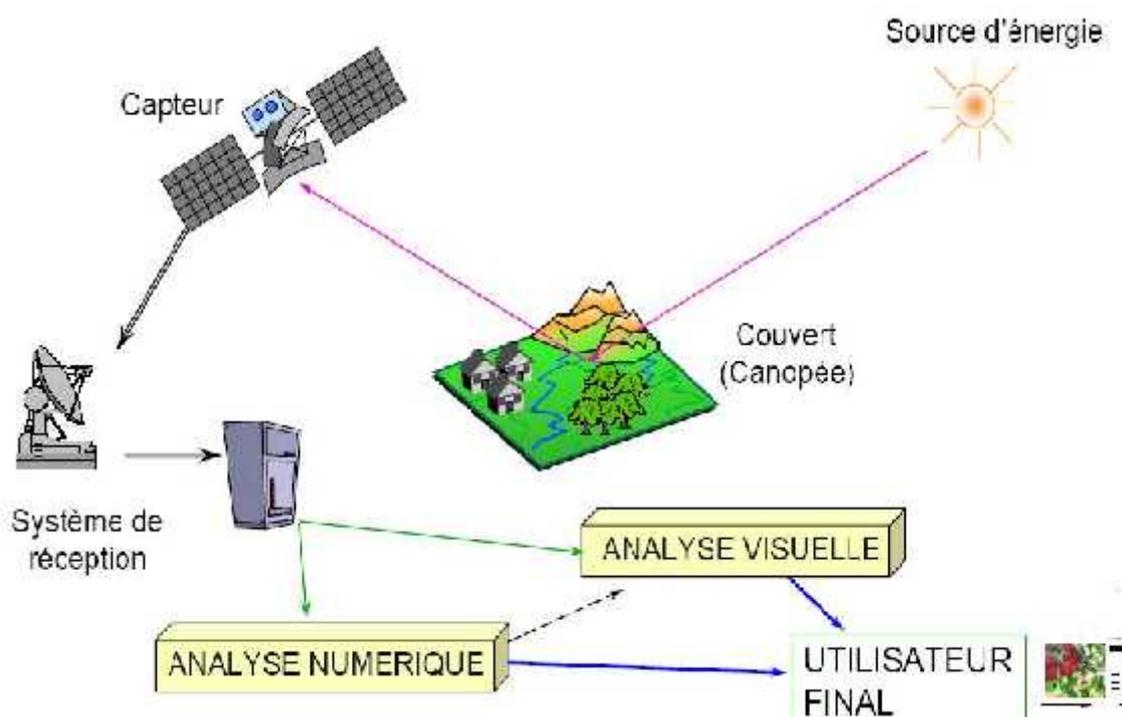


Fig.III.4: système de télédétection

III.5.2.3 Méthode satellitaire par radar

Un radar est essentiellement un instrument mesurant des distances. Il consiste en un émetteur, un récepteur, une antenne et un système électronique pour traiter et enregistrer les données. L'émetteur génère de courtes impulsions d'hyperfréquences (A) à intervalle régulier qui sont concentrées en un faisceau (B) par l'antenne. Le faisceau radar illumine latéralement

la surface à angle droit par rapport au déplacement de la plate-forme. L'antenne reçoit une partie de l'énergie réfléchi (rétrodiffusée) par différents objets illuminés par le faisceau (C). En mesurant le délai entre la transmission et la réception de l'impulsion rétrodiffusée par les différentes cibles que les radars illuminent, on peut déterminer leur distance au radar, donc leur position. À mesure que le capteur se déplace, l'enregistrement et le traitement du signal rétrodiffusé construisent une image en deux dimensions de la surface illuminée par les hyperfréquences.

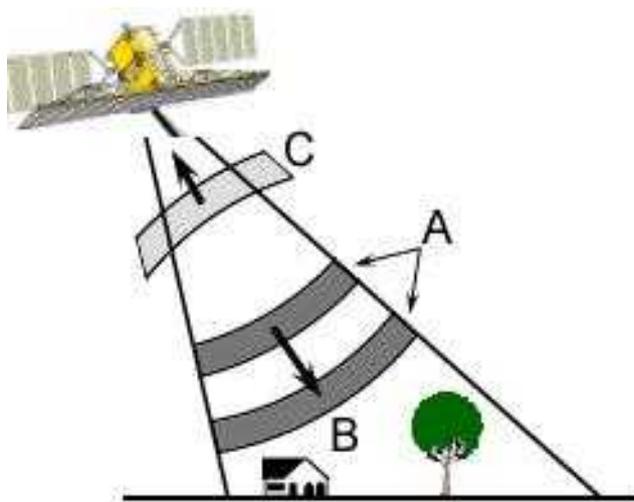


Fig.III.5: Principe du radar

III.6 Méthodes d'interpolation spatiales

Les techniques d'interpolation spatiale des données sont nombreuses. La plus utilisée est celle basée sur la géostatistique, qui contrairement aux précédentes ne nécessite pas l'utilisation de l'imagerie satellitaire.

III.6.1 Cartographie géostatistique

Les méthodes géostatistiques sont souvent utilisées pour les problèmes impliquant des transformations non linéaires des variables mesurées. En hydrogéologie, les problèmes inverses sont traités par ces méthodes. Le paramètre inconnu peut être le coefficient de perméabilité, transmissivité, coefficient de dispersion, les conditions aux limites peuvent être identifiées.

III.7 Principe de la géostatistique

Dans les années 50, des ingénieurs des mines sud-africains faisaient des calculs pour évaluer les ressources en minerai d'un gisement à partir d'un petit nombre de sondages prélevés en des sites irrégulièrement repartis dans le domaine d'étude. Dans ce contexte, la quantité d'intérêt (la réserve totale disponible) était inconnue et traitée comme une variable aléatoire (**Gratton, 2002**).

La géostatistique avec ses méthodes de simulations conditionnelles offre un cadre idéal pour relier les différentes informations, comprendre et modéliser leur structure statistique, élaborer des outils de prévision. (**Brochu, 2002**)

Les méthodes géostatistiques sont souvent utilisées pour les problèmes impliquant des transformations non linéaires des variables mesurées. En hydrogéologie, les problèmes inverses sont traités par ces méthodes. Le paramètre inconnu peut être le coefficient de perméabilité, transmissivité, coefficient de dispersion, les conditions aux limites peuvent être identifiées.

Les paramètres sont considérés comme étant des variables aléatoires à cause de la nature hétérogène du milieu, en examinant la distribution spatiale des valeurs ponctuelles à l'intérieur du domaine donné et en calculant quelques éléments statistiques de l'estimation (la moyenne, la variance,...), on pourra juger la qualité de la simulation (**Davis, 1986 ; Kitanidis, 1997**).

La méthode de krigeage offre l'avantage d'avoir la variance d'estimation minimale (**Laborde, 2000**), ce problème de simulation peut être résolu en deux étapes :

- 1- La moyenne et la fonction de variance sont estimées par les observations (données brutes).
- 2- L'estimation du champ (piézométrie ou concentration) est conditionnée par les observations pour obtenir les meilleures réalisations.

III.8 Le krigeage

Le krigeage est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. C'est le meilleur estimateur linéaire non-biaisé ; il se fonde sur une méthode objective¹. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux.

III.8.1 Principe d'un krigeage

Une cartographie par krigeage nécessite plusieurs actions :

- recueil et prétraitement de la donnée : il s'agit de nettoyer la variable régionalisée z de ses valeurs aberrantes, valeurs mal codées... Il peut être utile de transformer la donnée (par bijection) en un paramètre qui sera estimé à sa place, avant transformation réciproque.
- décision de l'estimation attendue : généralement, il est cherché une estimation en chaque point d'une grille, parfois en chaque volume élémentaire.
- choix d'un modèle : un modèle de fonction aléatoire Z associée à z est proposé, selon les hypothèses faites sur sa stationnarité, sa valeur moyenne, les éventuels paramètres auxiliaires.
- calage d'un variogramme : sur la considération du variogramme expérimental, un modèle de variogramme est choisi, respectant les conditions découlant du choix du modèle.
- krigeage proprement dit : le type de krigeage dépend du choix du modèle, et du type de résultat attendu. Il varie selon le choix du voisinage.
- post-traitement : une éventuelle transformation réciproque est appliquée ; le résultat est commenté.

Le calcul fournit également une variance de krigeage κ^2 , qui dépend du variogramme et de la position des points de données, mais pas des valeurs de celles-ci.

III.8.2 Propriétés du krigeage

- C'est un interpolateur exact : si le point d'estimation est un point de donnée, le krigeage renvoie la donnée en ce point ; par contre, si le variogramme comporte un effet pépité, la continuité n'est pas garantie au voisinage des points de données, et l'estimation donne l'impression de ne pas passer par la donnée.
- C'est une opération linéaire : le krigeage d'une combinaison linéaire est la combinaison linéaire des krigeages, à condition d'utiliser le même jeu de données (théorème de superposition des figures de krigeage).
 - Le krigeage sur deux domaines disjoints est la somme des krigeages sur ces domaines.
 - La moyenne estimée sur un domaine est la moyenne des krigeages ponctuels sur ce domaine.
 - Le krigeage d'une convoluée est la convoluée des krigeages ponctuels

$$\left[\int p(dx) Z(X) \right]^* = \int p(dx) Z^*(x)$$
 - le krigeage d'une dérivée est la dérivée du krigeage.
- effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants (cas d'un variogramme croissant).

III.9 Conclusion

La cartographie est un axe de recherche et d'application qui s'est modernisé avec l'avenue de nouveaux outils tels que le radar et la télédétection. Ainsi plusieurs méthodes ont été développées pour permettre une analyse et une estimation spatiale de certains paramètres agro-climatiques tels que l'humidité du sol. Cette estimation devient nécessaire dans le cas de grandes étendues en particulier dans les zones arides et semi-arides. L'objectif final est d'avoir une cartographie représentative de certains coefficients d'usage courant pour l'estimation de l'humidité du sol et de les exploiter dans des disciplines telles que l'irrigation et le drainage.

Chapitre IV :
Humidité par télédétection

Chapitre IV : Caractérisation de l'humidité du sol par la télédétection

IV.1 Introduction

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'image, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct, avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

La technologie de la télédétection a évolué progressivement vers l'intérêt scientifique après la seconde guerre mondiale. Le début de son développement a été conduit principalement par des usages militaires. Plus tard, les données de télédétection sont devenues largement utilisées pour des applications civiles. La gamme des applications de télédétection comprend l'archéologie, l'agriculture, la cartographie, génie civil, la météorologie et de la climatologie, des études côtières, la foresterie, la géologie, les systèmes d'information géographique, les risques, l'utilisation des terres et du couvert végétal, les catastrophes naturelles l'océanographie et les ressources en eau (**Bannari et al. 1995**).

D'un point de vue application, et surtout pour l'observation de la terre, la télédétection est un outil de collecte des données raster ou des images. Les images de télédétection représentent un enregistrement objectif du spectre qui concerne les propriétés physiques et la composition chimique des matériaux de la surface de la terre (**Liu et Philippa, 2009**).

Le traitement d'image devient ainsi un outil indispensable pour l'extraction des informations thématiques et/ou quantitatives de l'image. Pour une analyse plus complète, les images doivent être analysées en conjonction avec d'autres données complémentaires, telles que les thématiques existants : les cartes de la topographie, la géomorphologie, la géologie et l'utilisation des terres, ou avec géochimiques et géophysique, données d'enquête ou de données «réalité de terrain », logistiques et des outils d'information, là ou un système d'information géographique(SIG) entre en jeu. Les SIG contient des outils très sophistiqués pour la gestion, l'affichage et l'analyse de tous les types d'information à référence spatiale (**longley et al. 2009**)

Pour les études globales d'environnement, les mesures par satellites sont en effet les seules qui puissent à la fois réaliser une couverture spatiale suffisante, particulièrement dans des régions dépourvues de systèmes d'observation, et à des pas de temps acceptables pour des études dynamiques et sur des périodes continues. La connaissance de ces phénomènes est indispensable pour multiples applications (**Dagorne, 1990**).

IV.2 Principe de la Télédétection

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

Le principe de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme, elle est le résultat d'interaction de trois éléments fondamentaux :

1-La cible qui est l'élément ou la portion de la surface terrestre observée par le satellite.
2-La source d'énergie qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique. Trois sources d'énergie sont utilisées en télédétection. La partie du rayonnement réfléchi par la surface de la terre est alors captée et enregistrée par le capteur satellitaire. Ce processus illustre la télédétection optique, dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Mais la source d'énergie n'est pas forcément le rayonnement solaire. La surface terrestre se comporte également comme source d'énergie en émettant un rayonnement qui peut être capté et enregistré par les capteurs satellitaires. Enfin, le capteur satellite peut lui-même être source d'énergie en émettant grâce à une antenne, un rayonnement vers la surface terrestre, puis en enregistrant la partie du rayonnement rétrodiffusé. Ce processus est celui de la télédétection active dans le domaine des hyperfréquences.

3-Le capteur ou plateforme de télédétection mesure l'énergie réfléchi par la cible.

Lorsque le satellite ne fait que capter le signal réfléchi, on parle de la télédétection passive et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et enregistre l'écho, on parle de la télédétection active. Ces plates-formes peuvent être situées près de la surface terrestre, comme par exemple au sol, dans un avion ou un ballon ou à l'extérieur de l'atmosphère terrestre.

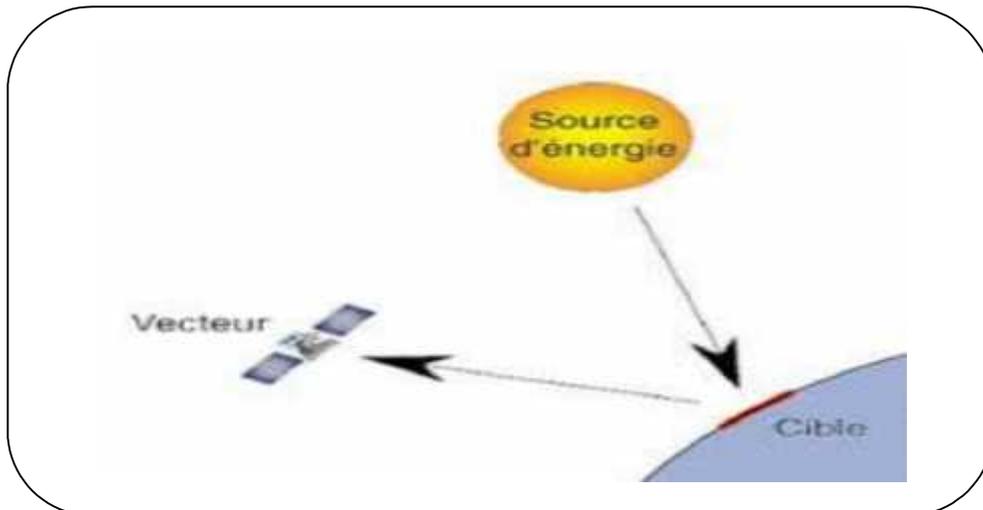


Figure IV.1 : Principe de la télédétection.

IV.2.1 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétique en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie

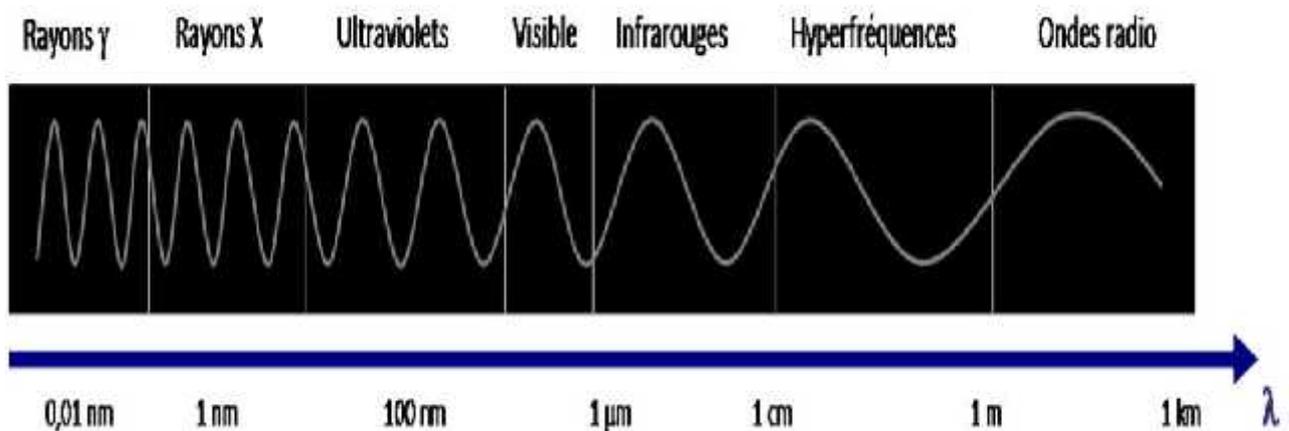


Figure IV.2 : Spectre électromagnétique source

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-onde et ondes radio).

Deux fenêtres spectrales sont principalement utilisées dans notre étude.

-le domaine du visible : la fenêtre du visible qui s'étend entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,7\mu\text{m}$ est la seule fenêtre du spectre électromagnétique qui est perceptible par l'œil humain.

-le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique).

Le domaine des infrarouges est relativement étendu puisqu'il couvre les longueurs d'onde de $0,7\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$.

-Le proche infrarouge

Le proche infrarouge ($0,7\mu\text{m}$ à $1,6\mu\text{m}$) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

-L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen ($1,6\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique.

-L'infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral ($4\mu\text{m}$ à $15\mu\text{m}$), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.

IV.2.2 Interactions du rayonnement avec l'atmosphère

Lors de son trajet depuis la source (le soleil) vers la cible (surface terrestre), puis de la cible vers le capteur, le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les molécules gazeuses et les particules (aérosols, gouttelettes d'eau, poussières) présentes dans l'atmosphère. Deux phénomènes essentiels se produisent : l'absorption et la diffusion atmosphériques. Les molécules gazeuses et particules présentes dans l'atmosphère vont provoquer un blocage et/ou une déviation du rayonnement, diminuant ainsi l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la terre lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber l'énergie, la transmettre ou réfléchir l'énergie incidente. En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet.

IV.2.3 Interactions du rayonnement avec la cible

Lorsque le soleil éclaire la surface terrestre, des interactions se produisent entre le rayonnement et la cible illuminée. En fonction des propriétés et des caractéristiques de la cible, une partie du rayonnement est réfléchie vers le capteur satellitaire. Chaque objet ou chaque surface possède ainsi une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée. L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale d'une surface. Chaque type de surface peut ainsi être caractérisé et identifié sur une image.

IV.2.4 Signatures spectrales principales surfaces naturelles

La signature spectrale d'un objet correspond à l'expression de la réflectance (rapport, exprimé en %, de la luminance mesurée par le satellite sur le rayonnement incident) de l'objet en fonction de la longueur d'onde. Chaque domaine spectral apporte une information bien particulière sur la nature du corps observé (**Maurel, 2002**).

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés. Chaque surface possède ainsi une signature spectre-quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde-qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. la figure N° présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles.

IV.2.4.1 La végétation

La structure anatomique des feuilles joue un rôle très important dans la signature spectrale de la végétation. Si les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, ils sont en revanche totalement transparents au

rayonnement de plus grande longueur d'onde. La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge.

Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille.

Le comportement spectral varie non seulement en fonction des types de végétaux, mais également selon l'état de santé d'une plante. La teneur en eau des feuilles est aussi un facteur qui va fortement influencer la signature spectrale de la végétation, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen.

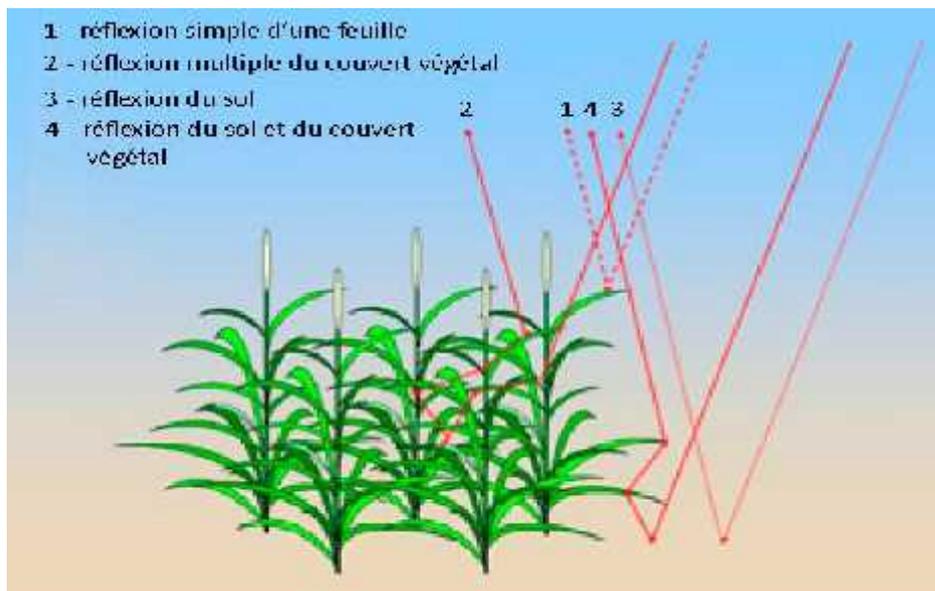


Figure IV.3 : Comportement spectral de la végétation dans le domaine du visible et l'infrarouge.

Plus la teneur en eau est forte, plus la réflectance de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce Domain de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique (**Sanderson, 2011**).

IV.2.4.2 Le sol

En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui

contient à la fois des matières minérales et organique, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement.

IV.2.4.3 L'eau

L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleu. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques, les sédiments ou les substances jaunes.

Plus l'eau est turbide, plus elle contient des matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde est notamment pour les ondes les plus longues.

IV.3 Télédétection multi spectrale

Les images de télédétection sont acquises par le capteur à bord des avions et des satellites, tels que les satellites d'observation de la terre. Les systèmes optiques multi-spectrale sont des capteurs passifs qui utilisent le rayonnement solaire comme la principale source d'éclairage pour l'imagerie.

L'utilisation de plusieurs bandes spectrales vise à exploiter des « vues » différentes de la cible pour en faciliter l'identification. Plusieurs études ont été faites pour identifier les meilleures bandes spectrales pour l'identification et l'analyse de cibles spécifiques.

En mesurant l'énergie réfléchi ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir ou regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

IV.4 Image satellite

Une image satellite représente une photo d'une partie de la Terre, prise de l'espace. Cette image est prise par un satellite placé en orbite autour de la planète. A la différence des images

obtenues d'un appareil photo, ou dessinées sur du papier, une image satellite est une image numérique, traité informatiquement, et celle-ci est mise en place à partir d'ondes transmises par le satellite à l'équipement au sol.

L'image numérique est fabriquée par un assemble de pixels, représentés par une série de "bits", ayant chacun comme caractéristique un niveau de couleur ou de gris prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle, cet emplacement étant défini par ses coordonnées cartésiennes dans un plan d'ordonné y, d'abscisse x et de centre O.

Grâce à leur altitude, les satellites fournissent des images de grande taille. Dans le jargon, l'image prise est appelée « scène ». Effectivement, une image satellite représente en moyenne une « scène » de 60 km de côté. La résolution des images joue un rôle important : la précision d'un pixel peut aller de 20 à 30 mètres en couleur et jusqu'à 1 ou 2 mètres en noir et blanc. Ceci dépend des capacités et de l'altitude du satellite. Grâce à la technologie qui s'améliore de jour en jour, les satellites les plus récents fournissent des images comparables à des photos aériennes.

IV.4.1 Image numérique de télédétection

Une image de photographie est toute forme de représentation en deux dimensions. L'image numérique est divisée en petits morceaux de taille et de forme égale, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique (CN). L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité.

L'objectif est de représenter une portion de l'espace géographique. Dans son principe, l'élément de l'image numérique exprime une grandeur physique, la luminance exprimant l'énergie réfléchie ou émise. L'image ne contient qu'une mesure relative de luminance exprimée en ton de gris (un nombre compris entre 1et 255) a ce contenu de luminance s'ajoute celui de son positionnement dans la dimension spatiale.

IV.5 La place des techniques de télédétection

IV.5.1 Caractéristiques principales de ces techniques

Le facteur superficie et la variabilité spatiale de l'humidité du sol est l'enjeu principal de la télédétection : Celle du suivi dans le temps et dans l'espace de phénomènes essentiellement dynamiques, l'urgence qu'il y a à intervenir, la difficulté à obtenir des séries d'information faibles privilégient les techniques de télédétection dans l'éventail des instruments dont on dispose.

Les techniques de télédétection satellitaire permettent en effet une vue d'ensemble de certains phénomènes terrestres ainsi que de ses ressources naturelles. En outre, la répétitivité de ces informations donne une vision dynamique des phénomènes observés.

IV.5.2 Les aspects positifs de l'utilisation des techniques de télédétection

En simplifiant à l'extrême, avec tous les risques que toute simplification entraîne, l'on peut dire que les notions fondamentales du contrôle de la désertification sont :

- l'information directe et instantanée
- les grands espaces géographiques.

Les techniques de télédétection répondent parfaitement à ces deux notions. Elles peuvent en effet analyser des phénomènes sur de longues périodes et ce, sans se soucier de frontières administratives ou humaines. Mais ces notions de durée et d'espace sont consommatrices d'énergie et d'argent.

Par ailleurs, les techniques de télédétection permettent aussi un gain de temps très important, et donc finalement d'argent. Par rapport aux techniques classiques permettant d'inventorier et de suivre les connaissances indispensables telles que l'évolution de la superficie du couvert arboré dans l'espace et le temps. De plus, elles rendent possibles ce qui, sans elles, seraient dans le contexte actuel, humainement et financièrement parlant impossible, tel qu'inventories, classer, cartographier les bassins versants élémentaires ou encore estimer l'humidité d'un sol pour des périmètres de grands envergures (supérieurs à 5000 hectares).

Leurs interventions majeures semblent se situer principalement au niveau des études préparatoires à un projet de développement agricole, plutôt qu'au niveau de l'exécution du projet.

IV.5.3 Contraintes et risques de l'utilisation des techniques de télédétection

Toutefois, les techniques de télédétection, même insérées dans un éventail d'autres techniques, chacune épaulant l'autre, ont besoin pour faire épanouir toutes leurs possibilités. D'une véritable chaîne technologique allant des satellites de support des capteurs, à l'utilisateur final qui doit pouvoir « lire » les informations tirées des images satellitaires pour un terroir donné, comme support de ses interventions dans l'estimation de l'information à grandes échelles.

Or, le risque est très grand, devant l'évolution rapide des techniques et la recherche de performances accrues, au niveau de la résolution par exemple. Ou sous la pression de « clients » plus exigeants dans les pays économiquement avancés. De voir cette chaîne-pourtant déjà bien légère-se distendre chaque jour davantage, creusant ainsi le fossé déjà très large entre les potentialités offertes par la télédétection et l'usage trop limité que l'on en fait pratiquement.

IV.6 Les apports de la télédétection

Selon les longueurs d'onde utilisées, les informations obtenues permettent d'obtenir des renseignements variables selon la profondeur.

Avec les micro-ondes, il est possible d'avoir des informations sur des épaisseurs variant de quelques centimètres au mètre. Les recherches sont actuellement en cours. Mais les résultats obtenus sur le terrain, ne permettent pas encore de tirer des conclusions certaines, les réponses ne dépendant pas uniquement de l'humidité du sol.

Avec l'infra-rouge thermique, on obtient une estimation de la conductivité thermique de la surface du sol. La conductivité thermique du sol est faible lorsqu'il est sec et plus forte lorsqu'il est humide. La conductivité varie aussi avec la porosité du sol. Pour être interprétées correctement, il est nécessaire de comparer les mesures dans diverses longueurs d'ondes, ou en fonction du temps (réponses de jour, de nuit, etc.)

Des travaux effectués sur le terrain ont montré (**bialousz, Girard 1978**) que :

-si le taux en matière organique est fort (supérieur à 3-5%) et entraîne une faible clarté de la couleur (clarté 4 pour le code Mansell), l'état de rugosité du sol et son humidité n'interviennent pratiquement pas sur la réflectance, celle-ci ne dépassent pas 20% dans le visible ou le proche infra-rouge (800-1100nm).

-Dans le cas où le taux en matière organique est moyen, ou faible :

-Pour un même sol, ayant la même rugosité, s'il est humide, la réflectance est plus faible que s'il est sec.

En fait sur le terrain, les quatre facteurs structuraux du sol, texture, porosité, et humidité sont liés. Pour différencier l'effet humidité de l'effet texture, il faudrait obtenir des données de réflectance dans les bandes d'absorption de l'eau : 1450nm et 2400 nm. Or, ces deux bandes ne sont pas accessibles du fait de l'absorption atmosphérique. la seule solution restante semble être celle concernant les bandes à 950 nm et 1150 nm.

Pour comprendre comment intervient la structure du sol et sa porosité, il est nécessaire de comparer les réponses du même sol en fonction des diverses périodes hydriques du sol dans l'année. Une telle étude permettrait de séparer ce qui est dû à l'humidité propre du sol et à ses composantes structurales, texturales et porales.

Il serait ainsi possible de déterminer quelle est la répartition de l'eau en profondeur, par l'évolution dans le temps des réponses dans les diverses bandes spectrales.

IV.7 Mesure de l'humidité du sol par télédétection

La télédétection est une approche particulièrement adaptée pour acquérir des informations concernant l'humidité du sol à l'échelle globale. De nombreuses études ont montré que la télédétection micro-ondes était la méthode de mesure la plus appropriée (**Njoku & Entekhabi 1996, Jones et al.2004**).

La télédétection permet d'enregistrer une information relative au milieu observé. Il s'agit toujours d'une mesure intégrée spatialement dont la surface varie en fonction du capteur utilisé. Comme cela est présenté dans les paragraphes précédents, il est complexe de disposer de mesures d'humidité du sol de terrain intégrées spatialement. La comparaison des données satellites aux données du terrain doit tenir compte de la différence d'échelle spatiale d'observation.

L'observation de la zone d'intérêt par un capteur se fait lorsque l'orbite du satellite passe au-dessus ou à proximité de celle-ci. Le satellite peut se trouver sur une orbite montante ou descendante.

En fonction de la distance de la trace de la zone d'étude, le capteur enregistrera des informations selon un angle d'observation plus ou moins élevé selon l'orbite et l'angle, la surface au sol observée sera semblable mais non identique.

Ainsi, la contribution des différents types d'occupation du sol de la zone d'intérêt sera légèrement différente d'un enregistrement à un autre. De ce fait la valeur enregistrée peut varier sans que les conditions de surface n'aient changé.

L'enregistrement d'une information intégrée spatialement prend en compte la contribution de l'humidité du sol quelle que soit la localisation géographique de l'événement pluvieux.

Une augmentation de l'humidité du sol peut être traduite par le capteur sans qu'aucune station n'enregistre de variation si elles ne se situent pas sous le passage de l'évènement

pluvieux. Il est très délicat de palier à ce problème sans avoir à disposition un réseau de stations dont la maille est inférieure à la taille des événements pluvieux. L'utilisation d'informations complémentaires telles que des produits satellites de précipitations peut permettre de limiter l'incertitude (ces produits présentant également une marge d'erreur).

Les capteurs enregistrent une information sur l'humidité du sol des premiers centimètres du sol qui varie selon l'humidité et les caractéristiques du capteur.

Les sondes sont implantées à une profondeur fixe de 5 centimètres. Les profils temporels enregistrés par les capteurs et les sondes sont donc légèrement divergents.

IV.7.1 Autres facteurs influant la mesure de l'humidité du sol

Deux principaux facteurs interviennent dans l'estimation et l'humidité du sol :

1- La morphologie et la surface du sol

L'étude de la surface du sol, par exemple : battance, rugosité, types de ruissellement, aménagements du modèle par l'homme, couvertures végétales, pierrosité, etc. L'étude des pentes, des formes morphologiques et leurs dynamiques, permet de cerner la dynamique de l'eau externe au sol, et aussi parfois, la dynamique interne.

2- La végétation

La végétation par l'alimentation de ses racines et par son mode de développement, est capable de lire ce qui se passe dans la profondeur du sol, jusqu'au niveau de son enracinement. On peut, de cette façon, obtenir des renseignements concernant la profondeur du sol, la texture, la porosité, la perméabilité, le calcaire, le PH, la végétation donne aussi des indications sur l'extension spatiale des phénomènes

IV.8 Les méthodes de mesure l'humidité du sol par télédétection

IV.8.1 L'infrarouge thermique

Les objets qui ont une température supérieure au zéro absolu (0K) émettent une énergie électromagnétique dans toutes les longueurs d'ondes. Par conséquent, toutes les composantes du paysage (la végétation, le sol, l'eau,...) émettent un rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge thermique dans la partie de 3.0 à 14µ m du spectre (**Jensen, 2006**). Le potentiel de l'estimation de l'humidité du sol est basé sur la capacité d'émission thermique excellente de la surface de la terre.

La variation du taux d'humidité dans un sol modifie les propriétés thermiques de ce sol, dont la capacité calorifique, la conductivité thermique et l'inertie thermique. Par conséquent,

en détectant les propriétés thermiques du sol, une estimation de l'humidité du sol peut être obtenue. Parce que le rayonnement détectable émis par la surface de la terre dépend non seulement de la température de surface, mais aussi de l'émissivité de la surface du sol, l'émissivité doit être supposée ou déterminée empiriquement pour l'application des modèles.

IV.8.2 La télédétection à micro-onde active

La télédétection micro-onde peut être catégorisée en deux types en fonction de leur source d'énergie qui est réfléchi et rétrodiffusé à partir de son origine. Le capteur émet un signal, une onde électromagnétique, dans une fréquence et une polarisation connues en direction d'une cible, telle que la surface terrestre. Le récepteur enregistre la quantité d'énergie réfléchi par la surface de la cible ainsi que sa polarisation et le temps de parcours de l'onde.

La quantité d'énergie perçue par le capteur est déterminée par la quantité d'énergie absorbée par la surface et la façon dont l'onde est réfléchi par celle-ci. La fraction du signal absorbée sera principalement déterminée par la constante diélectrique variant selon les conditions de surface et tout particulièrement selon le contenu en eau du sol. La rugosité de surface va conditionner la réflexion de l'onde, qui sera spéculaire si la surface est parfaitement lisse, ou affectée par une importante dispersion en cas de forte rugosité de surface.

La quantité d'information que l'on peut extraire du signal radar est limitée car les systèmes actifs sont classiquement limités à une seule polarisation et une seule fréquence. Par ailleurs, les systèmes passifs ont une dynamique plus forte en fonction de l'humidité du sol.

IV.8.3 La télédétection à micro-onde passive

Les micro-ondes passives utilisent un radiomètre micro-ondes(ou capteur) qui mesure l'énergie rayonnée (par émission thermique) ou réfléchi (depuis le soleil ou les radiations rayonnantes d'autres objets) par la surface de la terre ou l'atmosphère (**Woodhouse 2005**).

La base de la télédétection à micro-ondes passives repose sur le fait que l'émissivité(e) aux micro-ondes est fonction de la constante diélectrique du mélange sol-eau et de l'humidité du sol. Elle est affectée par un certain nombre de facteurs (**Walker, 1999**) : comme la texture du sol, la rugosité de surface et la couverture végétale. La texture affecte la pente de la relation entre l'émissivité et l'humidité du sol, mais pas l'amplitude de la variation. la rugosité

de la surface du sol augmente l'émissivité du sol et diminue la sensibilité à l'humidité du sol, réduisant ainsi l'amplitude de température de brillance entre des sols humides et des sols secs (Vandegriend and Engman 1985).

IV.9 La sensibilité des différentes émissions micro-ondes

Toutes les longueurs d'ondes ne présentent pas une sensibilité identique avec les différents paramètres. Alors ; les études la sensibilité l'émission micro-ondes au différent paramètre de surface constituent très importantes afin de choisir des micro-ondes adaptés à un but de travail.

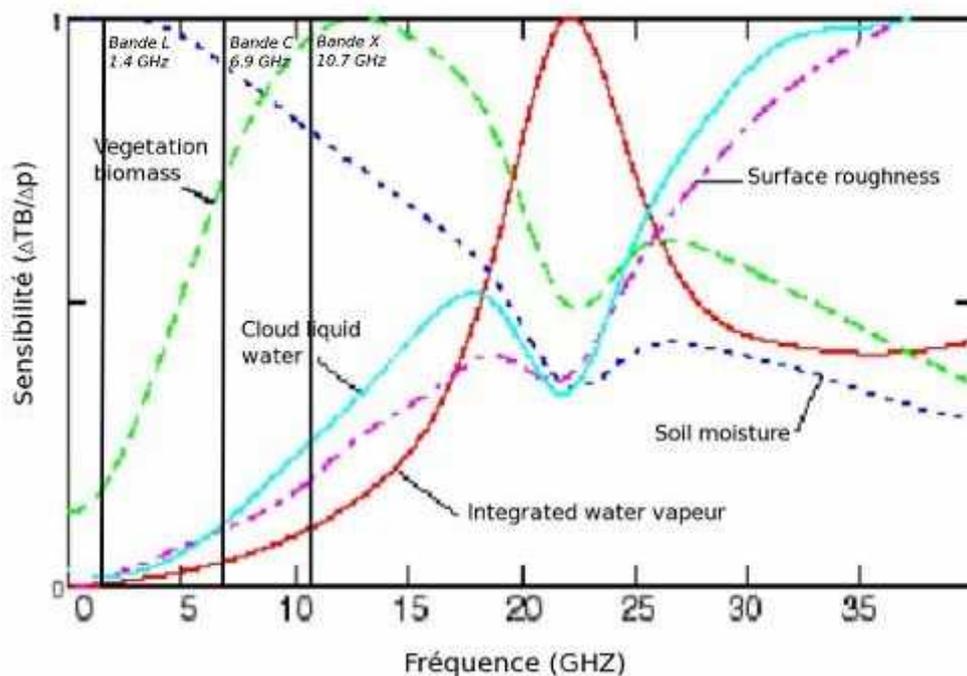


Figure IV.4 : sensibilité de l'émission micro-ondes aux différents paramètres de surface (Kerr 1996).

La figure N°4 présente la sensibilité de l'émission micro-ondes aux différentes conditions de surface et atmosphériques (l'humidité du sol, la vapeur d'eau, la rugosité de surface, le contenu en eau de la végétation ; l'eau liquide présente dans les nuages) selon des fréquences de 0 à 40 GHz (Kerr 1996). Elle montre que les basses fréquences micro-ondes présentant un maximum de sensibilité à l'humidité de surface et une sensibilité minimale aux paramètres tels que la biomasse, la rugosité de surface, ou les composantes de l'atmosphère.

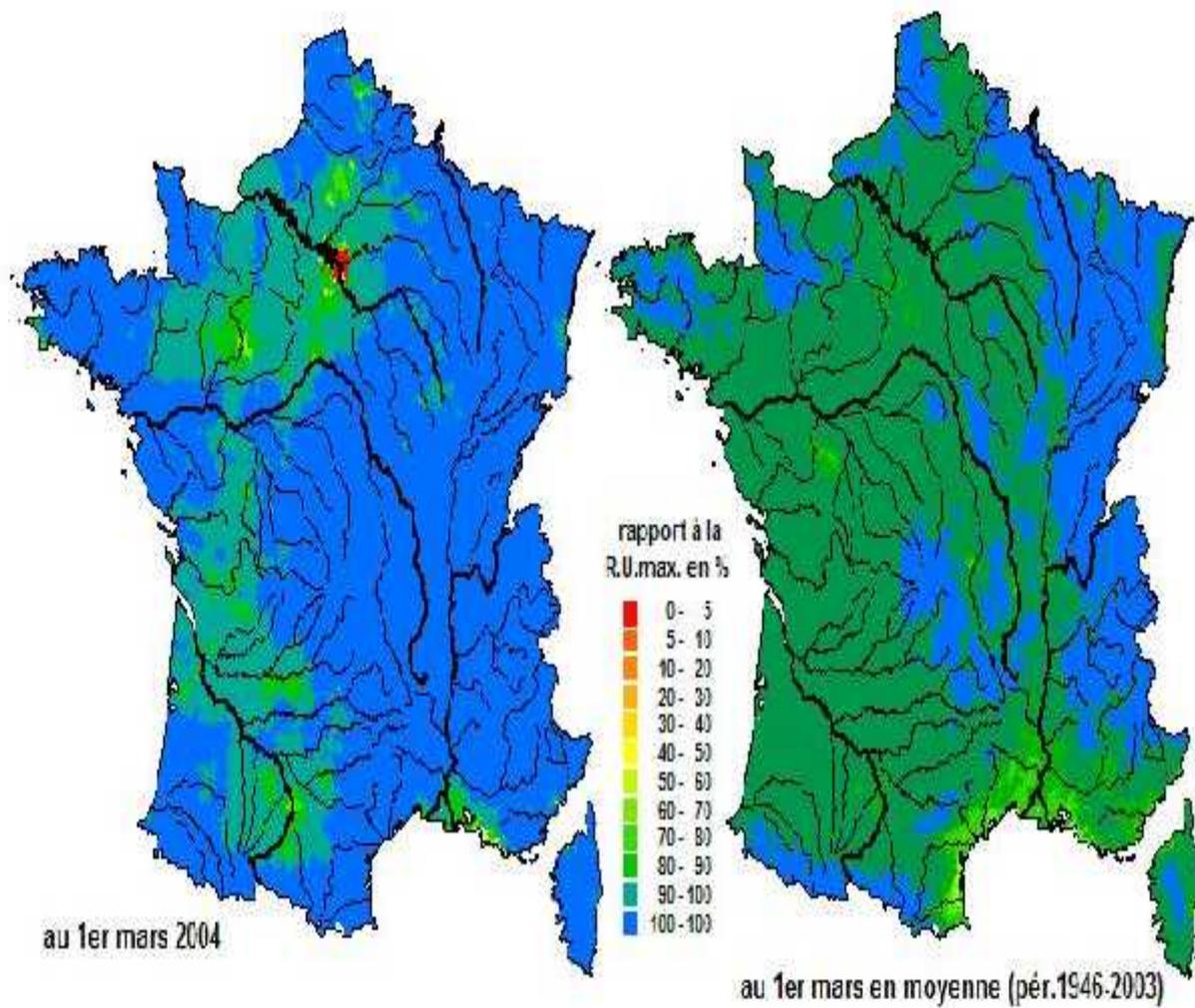


Figure IV.5 : Exemple de cartographie de l'humidité du sol en France

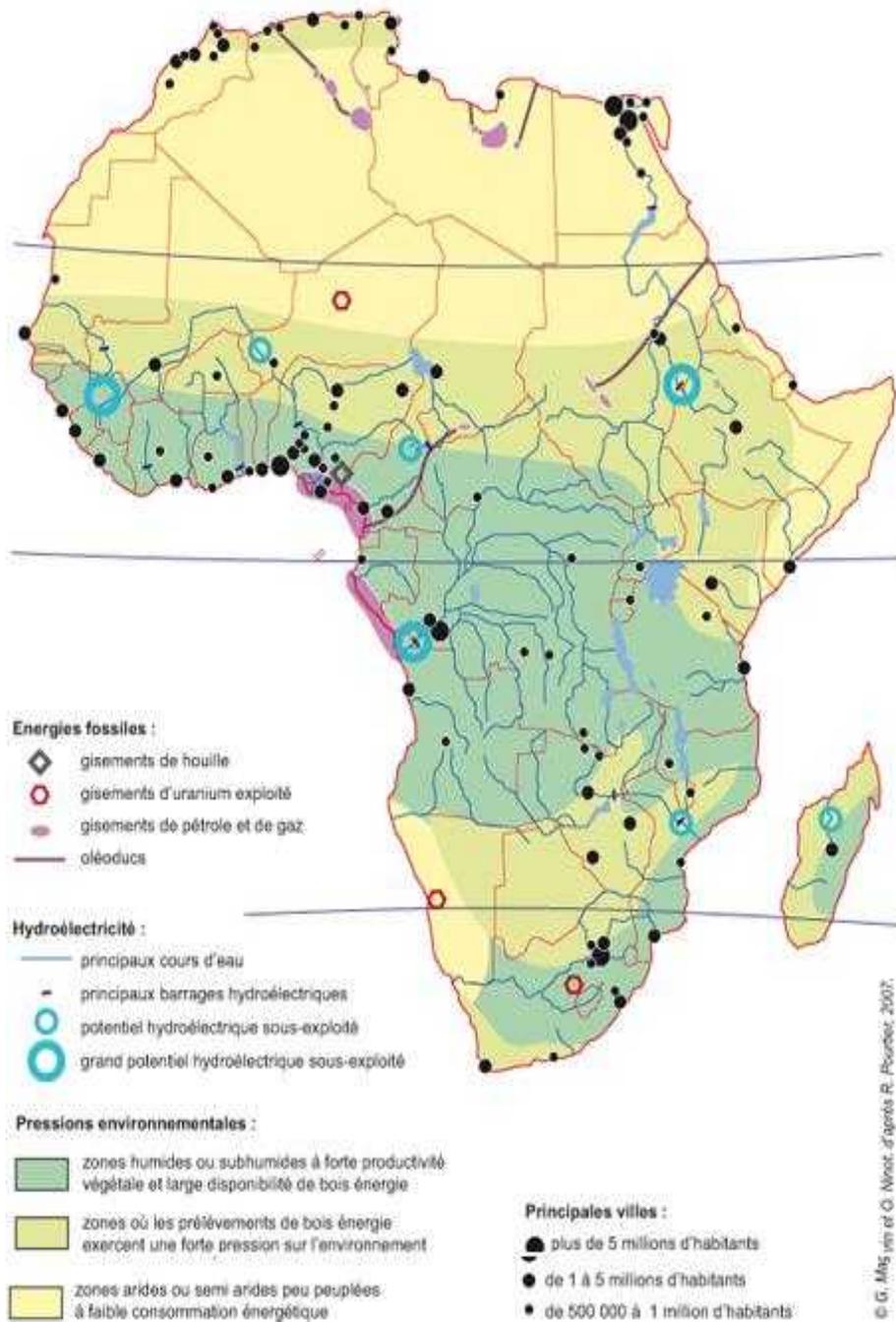


Figure IV.6 : Exemple de cartographie de l'humidité du sol en Afrique

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'estimation et la cartographie de l'humidité du sol par une approche satellitaire basée sur la détection.

La télédétection est la technique la plus adaptée pour estimer l'évolution d'humidité du sol à l'échelle régionale et globale et cela pour de grandes étendues. De nombreuses études ont été menées pour déterminer l'état hydrique des sols à partir des données de télédétection spatiales.

La qualité des estimations d'humidité du sol dépend autant du choix des mesures satellites existantes (dans le domaine de l'infrarouge, des micro-ondes passives, actives) que du choix des algorithmes utilisés.

L'application de cette technique dans l'estimation de l'état hydrique du sol peut contribuer à améliorer la gestion des ressources en eau et le suivi agricole, en particulier pour les zones arides.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'humidité du sol joue un rôle important dans l'étude du cycle de l'eau. C'est une variable fondamentale dans l'organisme du cycle d'eau telle que l'agronomie, la climatologie ou l'hydrologie. Estimer l'humidité du sol et ses variations spatiales et temporelles aux différentes échelles permettraient des avancées significatives à la fois dans la compréhension des processus physiques tels que les interactions entre le sol et l'atmosphère, et dans des applications potentielles pour les sociétés (alerte précoce de sécheresse, stress hydrique des cultures, prévision de rendements agricoles).

Les échanges sol-végétation-atmosphère, qui conditionnent le fonctionnement du cycle de l'eau ont été présentés dans cette étude, ainsi que ses interactions avec l'humidité du sol. De nombreuses études ont été menées dans le domaine de la télédétection pour déterminer les paramètres hydriques des sols par des mesures satellites.

Le principal objectif de ce mémoire a été de contribuer à une meilleure étude et compréhension de l'estimation de l'humidité du sol ainsi qu'à sa mesure. Les différentes approches pour accéder à ces valeurs, à partir de données sur le terrain et par différentes approches, ont été abordées au cours de cette étude.

Les études se sont focalisées sur l'acquisition des données d'information par télédétection spatiale qui permet de généraliser les informations à l'échelle globale telle que l'humidité du sol.

L'application de la télédétection dans les pilotages d'irrigation et le suivi agricole de grandes parcelles, sera l'objectif final de notre étude, qui nous espérons sera vulgarisé en Algérie, pour un développement durable de l'agriculture.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1-Buckingham, E.**, 1907: Studies on the movement of soil moisture. U.S. Dept. Agric.Bur.Soils.
- 2-Bannari,A.D.,Mouin,F.,Bonn,A.R,Huete,1995**,A review of vegetation indices, remote sensing reviews,vol .13,95-120.
- 3-Bialousz S et Girard M-C.,1978** :W spotczunsuki odbicia spektrajnego gleb w pasmach pracy satelity londsat /les coefficients de réflectance spectrale des sols dans les bandes de travail du satellite londsat,(IN)fotointerpretacja w geografii,t, III(13),p.118-129.
- 4-Calvet, J.-C.**, J. Noilhan, and P. Bessemoulin, 1998 : Retrying the root-zone soilmoisture from surface soil moisture or temperature estimates : à feasibility study based on field measurements. J. Appl. Meteorol., 37(4) ,371–386.
- 5-Darcy, H.**, 1856 : Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont Paris.
- 6-De Marsily, G.**, 1995 : L'eau. Dominos, Flammarion.
- 7-Davis, J.C, 1986**, statistics and data analysis in Geology 2nd ed,John Wiley & Sons, New york,289 P.
- 8-Dagorne, D., 1990.**outils du changement d'échelles en télédétection aspect radiométriques et spatiaux.seminfor IV.P 51-61.
- 9-Dandet and Vachaud 1977**, la mesure neutronique du stock d'eau du sol et ses variation application à la détermination du bilan hydrique.Ann.Agron.28(5).pp.503-519.
- 10-Escorihuela, M.-J.**, Y. Kerr, P. de Rosnay, J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, and F. Lemaître, 2006 : A simple model of the bare soil microwave emission at l-band. IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 45(7) ,1978–1987.
- 11-Gratton, Y.**, L,Prieur,R.G.Ingram,et C.lafleur,2002,les courants en mer d'alhoram EST pendant la campagne Almofrant-I, rapport interne ,INRS-ETE.
- 12-Gruhler, C.**, C. Cabot, Y. Kerr, and P. de Rosnay, Cape Town, South Africa, 12-17 July2010 : Access to soil moisture values over a sahelian area : Modeling, remote sensing, and ground measurements. IGARSS.
- 13-Girard M-C 1970** : interprétation de quelques facteurs pédologiques, à partir de photographies aériennes, en relation avec différents saisons et différents émulsion.
- 14-Hillel, A.**, 1988 : L'Eau et le Sol Principes et processus Physiques. pedasup-Université catholique de Louvain.

15-Jones, A., T. Vukićević, and T. Vonder Haar, 2004 : A microwave satellite observational operator for variational data assimilation of soil moisture. *J. Hydrometeo*, 5(1),213–229.

16-Koster, R. D., P. Dirmeyer, Z. Guo, G. Bonan, P. Cox, C. Gordon, S. Kanae, E. Kowalczyk, D. Lawrence, P. Liu, C. Lu, S. Malyshev, B. McAvaney, K. Mitchell, D. Mocko, T. Oki, K. Oleson, A. Pitman, Y. Sud, C. Taylor, D. Verseghy, R. Vasic, Y. Xue, and T. Yamada, 2004 : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Sciences*, 305(5687),1138–1140.

17-Kerr, Y., 1996 : Optimal choice for miras frequencies scientific requirements. CESBIO, p.Report.

18-Kerr and Cabot 2009, la mission SMOS et son impact sur les prévisions des changements planétaires in l.é. SMOS(Ed).

19-Liu,J.G.,et J.M,Philippa , 2009.Essential image processing and GTS for remote sensing.Johm Wiley & Sons LTD publication .www.wiley.com/wiley-blackwell.

20-Longley,P.A,M.F.Goodchild,D.J. ,Maguire,D.W., Rhind, 2009 Geographical information systemes and science 2 nd Edition.

John Wiley & Sons LTD publication www.wiley.com/wiley.blackwell.

21-Laborde J.P, 2010 éléments d'hydrologie de surface école polytechnique de l'université de nice,sophia antipolis,France.

22-Maurel, P.2002.initation à la télédétection –UMR 3S cemagref/Engref-p4/53 ;

23-Musy, A., and M. Soutter, 1991 : Physique du sol. Collection Gérer l'Environnement, Press Polytechniques et Universitaires Romandes.

24-Maynard, K., and J. Royer, 2004 : Sensitivity of a general circulation model to land surface parameters in african tropical deforestation experiments. *Climate Dynamics*, 22,555–572.

25-Muñoz Sabater, J., L. Jarlan, J.-C. Calvet, F. Bouyssel, and P. De Rosnay, 2007 : From near-surface to root-zone soil moisture using different assimilation techniques. *J. Hydrometeorol.*, 8(2),194–206.

26-Maidment, D. R., 1992 : Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, INC.

27- Njoku, E., and D. Entekhabi, 1996 : Passive microwave remote sensing of soil moisture.*J. Hydrol.*, 184,101–129.

28-Sanderson,R.,2011.introduction to remote sensing .live,38 pages.III eme symposium international de photo-interprétation,pp.925-947,septembre.

29-Walker et al 2004.j.p, willgoose G,R,et Kalm ,JD :one-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations a comparaison of retrieval algorithms advances in water ressources,24.631-650.

30-Van de Griend, A., and J.-P. Wigneron, 1985 : The b-factor as a function of frequency and canopy type at h-polarization. IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 42(4), 786–794.