

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

El Harrach, Alger



Mémoire de Master en Génie Minier

Réalisé par : Kamila DJELLOULI

**Apport technologique de la télédétection
et les éventuels liens entre les paramètres exigés
par la norme ISO 13503-2 :2006**

Sous la direction de Dr.Rezki AKKAL, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique

Soutenu devant le jury :

Dr.Karima DERAMCHI	Professeur, ENP	Présidente
Mme. Samira BOUTRIA	Professeur, ENP	Examinatrice
Dr. Mohamed KHODJA	Directeur de Recherche, DTD	Invité
Dr. Rezki AKKAL	Professeur, ENP	Promoteur

Promotion : 2015

Remerciements

Dans cette suite du travail du projet de fin d'étude intitulé : " Caractérisation physico-chimique des proppant et rhéologie des fluides de fracturation ", il m'est particulièrement agréable d'exprimer les plus sincères remerciements à notre promoteur Dr.R.AKKAL qui a accepté de nous introduire, mon binôme et moi même, dans le monde merveilleux de la recherche.

Aucun mot, aucune expression ne suffiront pour traduire notre immense gratitude à M.Mohamed KHODJA pour son aide, ses conseils et sa disponibilité à la réalisation de ce travail, ainsi qu'à M.Sofiane KHADRAOUI pour l'accueil qu'ils nous ont réservés dans l'équipe de recherche durant notre stage d'une durée de deux mois et demi.

Que les membres de cette équipe veuillent accepter nos remerciements les plus sincères.

Que toutes les équipes travaillant dans les laboratoires de la Division Technologies & Développement trouvent l'expression de notre gratitude.

Nous remercions les membres du jury : Dr.Mohamed Aguid BACHAR ASSED, Dr.Malek OULD HAMOU et Mme. Samira BOUTRIA de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail, ainsi que Dr.Karima DERAMCHI qui a présidé le jury de ce présent mémoire.

Nous tenons également à remercier très chaleureusement nos professeurs au niveau du département du Génie Minier pour leurs efforts et leurs conseils qui nous ont permis de progresser sans cesse durant nos années d'études au sein de l'École Nationale Polytechnique.

Nous profitons de cette occasion solennelle pour adresser nos chaleureux remerciements à nos parents respectifs qui nous ont soutenus durant toute notre existence et encourager pour exceller des années durant et tous les membres de la famille toujours présents pour leur appui.

ملخص

هذه المذكرة متواضعة هي مساهمة إضافية للمشروع نهلية الدراسة بعنوان "تسخيص الخواص الفيزيائية و الكيمائية للبرويكت و الريولوجيا لسوائل التصنيع". و بدء من بين أمور أخرى، الاستعارة عن بعد في الهدف من استخدام صور الأقمار الصناعية لتحديد خصائص الرمال الطبيعية الجزئية.

الكلمات المفتاحية : صور الأقمار الصناعية, تسخيص الرمال الطبيعية الجزئية.

Résumé

Ce modeste mémoire constitue une contribution complémentaire au projet de fin d'étude intitulé: "Caractérisation physico-chimique des proppants et rhéologie des fluides de fracturation". Une initiation entre autres, à la télédétection dans l'objectif d'utiliser des images satellites pour caractériser les sables naturels algériens.

Mot clé: Images satellites, caractérisation du sable algérien, proppants.

Abstract

This modest memory is an additional contribution to the project of end of study entitled "Physico-chemical characterization of proppants and fluid rheology fracturing". An initiation among others, remote sensing in the objective of using satellite images to characterize the Algerian natural sands.

Key words: Satellite images, characterization of the Algerian sand proppants.

Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	III
Liste des tableaux	IV
I Introduction générale	1
1 Problématique et objectifs	2
2 Le cadre de l'étude : Contexte régional	3
II Partie théorique	4
3 Télédétection des sols arides : principe et applications	5
3.1 Processus de télédétection	5
3.1.1 Détection passive et active	7
3.2 Caractéristiques d'un satellite	8
3.2.1 Les différentes orbites satellitaires	9
3.2.2 La fauchée d'un satellite	10
3.2.3 Le cycle de passage d'un satellite	11
3.3 Caractéristiques d'une image satellite	12
3.3.1 Notion de pixel	12
3.3.2 les données des spectres	13
3.3.3 L'utilisation des images satellites	14

4	Aperçu sur la caractérisation de la surface	15
4.1	Propriétés spectrales de quelques matériaux	15
4.1.1	le spectrophotomètre	17
4.1.2	Les propriétés spectrales des sols	18
4.1.3	Exemples de spectres de matériaux de surface	20
4.2	Relations entre la couleur et la réflectance	22
III	Partie expérimentale	23
5	Rappel sur les résultats de la caractérisation selon la norme ISO 13503-2 :2006	24
5.1	Résultats synthétisés	25
5.2	Première Analyse	26
5.3	Travaux de certains auteurs	27
5.3.1	la forme d'une particule	27
5.3.2	Rigidité des particules	29
5.3.3	les interactions physiques entre les particules	30
6	Résultats et interprétation	31
6.1	Les différents graphiques liants les paramètres	31
IV	Conclusion et perspectives	38
	Bibliographie	40

Table des figures

3.1	Processus simplifié de télédétection	6
4.1	Schéma d'un spectrophotomètre	17
4.2	Courbes de réflectance de quelques minéraux fréquents dans les sols [1] . . .	19
4.3	Réflectance spectrale de trois types de matériaux de surface (mesures en laboratoire) [1]	20
6.1	La résistance à l'écrasement en fonction de la solubilité des proppants dans les acides	32
6.2	La résistance à l'écrasement en fonction de la sphéricité et la rondeur . . .	33
6.3	La turbidité en fonction de la résistance à l'écrasement	34
6.4	La turbidité en fonction de la teneur en SiO_2	35
6.5	La solubilité dans les acides en fonction de la turbidité	36
6.6	La résistance à l'écrasement en fonction du diamètre	37

Liste des tableaux

5.1	Les résultats obtenus suivant la norme ISO 13503-2 :2006 pour des échantillon de sable algérien	25
5.2	Les propriétés élastiques des géomatériaux à température ambiante [2] . . .	29

Première partie

Introduction générale

Chapitre 1

Problématique et objectifs

Dans le cadre de l'enrichissement du projet de fin d'étude réalisé en cette dernière année de la formation d'ingénieur polytechnicien, qui s'intitule : "Caractérisation physico-chimique des proppants et rhéologie des fluides de fracturation", il était intéressant d'exploiter en partie les méthodes actuelles de caractérisation de sables naturels utilisés dans les fluides de fracturation.

Parmi ces dernières, la télédétection, une technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection 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.

Afin de pouvoir procéder par l'analyse d'images satellites, il est tout fois intéressant de chercher les liens entre les différentes propriétés étudiées lors du projets de fin d'étude et de les corrélérer entre eux, dans ce présent document, une approche utilisant MatLab, plus spécifiquement l'outil "Curve Fitting", pour retrouver des relations entre les propriétés physico-chimiques des sables algériens.

Chapitre 2

Le cadre de l'étude : Contexte régional

Le Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides déclare que le phénomène d'ensablement constitue l'une des manifestations les plus spectaculaires du phénomène de la désertification. Actuellement, il touche une superficie près de 1 333 775 km² (estimation par l'image satellite) soit 56% de la superficie totale de l'Algérie.

Une autre manière d'affirmer que le Sahara algérien est couvert d'impressionnants et gigantesques dépôts de sables du Grand Erg Occidental à l'ouest et du Grand Erg Oriental à l'est. Ces dépôts de sable d'origines variées constituent une richesse inestimable jusqu'au jour d'aujourd'hui.

La complexité de cette étude réside essentiellement dans l'étendue de la variation des caractéristiques de ce matériau, la grande surface dans ce cas ne peut être négligée. Et un réseau d'échantillonnage plus dense serait peu profitable tenant compte du facteur temps et des coûts indispensables à la réalisation des travaux. Néanmoins, une maîtrise des techniques de traitement des images satellites connues à ce jour, permettent de relever le défi et de cibler initialement les zones économiquement rentable en identifiant les différentes propriétés du sable de dunes algérien.

Deuxième partie

Partie théorique

Chapitre 3

Téledétection des sols arides : principe et applications

Dans le contexte de notre étude, l'acquisition de l'image étant prévue pour une date ultérieure, ce présent document aura pour objet l'initiation à l'utilisation de ces techniques à fin de caractériser le sable de dunes d'une région de sud algérien.

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection (voir figure 3.1) au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

3.1 Processus de télédétection

Ces étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin [3] :

1. **Source d'énergie ou d'illumination 'A'** : c'est un paramètre nécessaire permettant d'illuminer l'objet.
2. **Rayonnement et atmosphère 'B'** : il existe une interaction entre le rayonnement de la source d'énergie vers la cible et l'atmosphère, un autre interaction durant le trajet entre la cible et le capteur.

-
3. **Interaction avec la cible 'C'** : Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.
 4. **Enregistrement de l'énergie par le capteur 'D'** : l'énergie diffusée ou émise par la cible doit capter à distance pour enfin être enregistrée.
 5. **Transmission, réception et traitement 'E'** : L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
 6. **Interprétation et analyse 'F'** : L'extraction de l'information nécessite une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée.
 7. **Application 'G'** : En dernier lieu, l'utilisation de l'information extraite de l'image permet de découvrir de nouveaux aspects ou de résoudre un problème particulier.

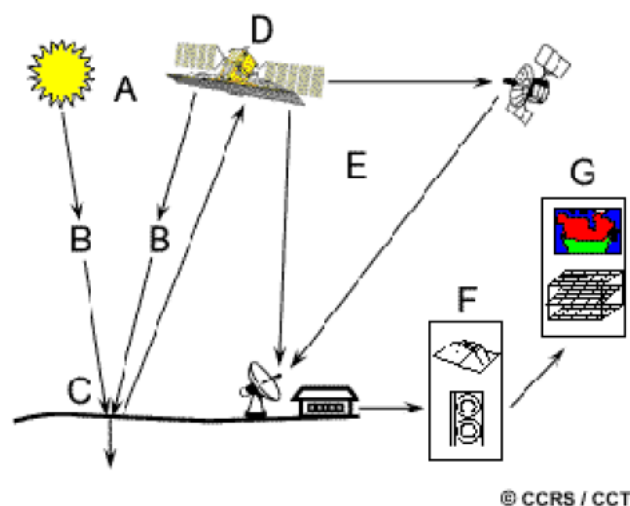


FIGURE 3.1 – Processus simplifié de télédétection

3.1.1 Détection passive et active

le Soleil est une source d'énergie ou de rayonnement pratique pour la télédétection. L'énergie du Soleil est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. [4]

Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchi lorsque le Soleil illumine la Terre. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchi le soir, tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.

Un capteur actif produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs utilisent les longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le Soleil telles que les hyperfréquences ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est illuminée. Par contre, les capteurs actifs doivent produire une énorme quantité d'énergie pour bien illuminer une cible. Le laser fluoromètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

3.2 Caractéristiques d'un satellite

Les trois principales composantes du processus de la télédétection : la source d'énergie, l'interaction entre l'énergie et l'atmosphère et l'interaction entre l'énergie et la surface. Lorsque nous avons discuté de la différence entre les capteurs passifs et les capteurs actifs ainsi que des caractéristiques des images, nous avons introduit brièvement une quatrième composante de la télédétection : l'enregistrement de cette énergie par un capteur. Dans le présent chapitre, nous allons regarder de plus près cette dernière composante en examinant plus en détail les caractéristiques de la plate-forme de télédétection,

les capteurs peuvent être placés sur différentes plates-formes. Bien que les plates-formes terrestres ou aéroportées soient utilisées, ce sont les satellites qui fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection de nos jours. Certaines caractéristiques propres aux satellites en font des instruments particulièrement utiles pour l'acquisition d'information sur la surface de la Terre.[4]

3.2.1 Les différentes orbites satellitaires

La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission.

Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. [3]

Les satellites géostationnaires

Certains satellites ont une altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la Terre, ils ont une orbite **géostationnaire**. Ces satellites géostationnaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires.

Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre. [3]

Les satellites héliosynchrone

D'autres plates-formes spatiales suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (ouest-est), fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé **orbite quasi polaire** à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaires ont aussi une orbite **héliosynchrone** ; de cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même.

Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes,

puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire. [3]

De nos jours, la plupart des plates-formes satellitaires sont placées sur orbite quasi-polaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la Terre, et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite. Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement orbite ascendante et orbite descendante. Si l'orbite est aussi héliosynchrone, l'orbite ascendante du satellite se fait du côté ombragé de la Terre, tandis que l'orbite descendante se fait du côté éclairé par le Soleil.

Les capteurs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchiée par la Terre ne recueillent donc de l'information qu'au cours leur orbite descendante, lorsque le Soleil illumine la Terre. Les capteurs actifs qui possèdent leur propre source d'illumination ou les capteurs passifs qui enregistrent l'énergie émise par la planète (l'énergie infrarouge thermique par exemple) peuvent amasser des données autant lors des orbites ascendantes que descendantes de leurs satellites.

3.2.2 La fauchée d'un satellite

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de couloir-couvert ou fauchée. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasipolaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nordsud.

Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une composante vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une nouvelle région à chacun des passages consécutifs du satellite.

L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet. [4]

3.2.3 Le cycle de passage d'un satellite

Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points nadir. On définit le cycle de passage du satellite comme étant la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard. Le satellite aura alors effectué un cycle orbital complet. La période de temps nécessaire pour compléter un cycle orbital complet varie d'un satellite à l'autre. La durée du cycle orbital ne doit pas être confondue avec la période de revisite. Avec les capteurs orientables, les instruments peuvent observer une surface avant et après les passages de l'orbite au-dessus de la cible, ce qui permet une période de revisite beaucoup plus courte que le cycle orbital. La période de passage au nadir est un facteur important pour plusieurs applications de la télédétection, spécialement lorsque des images fréquentes sont nécessaires (par exemple : pour surveiller la dispersion lors d'un déversement d'hydrocarbures ou pour mesurer l'ampleur d'une inondation). Les satellites à orbite quasipolaire ont une couverture plus fréquente des régions de latitude élevée par rapport à la couverture des zones équatoriales. Cette plus grande couverture est due à l'élargissement, vers les pôles, de la zone de chevauchement entre deux fauchées adjacentes. [4]

3.3 Caractéristiques d'une image satellite

L'énergie électromagnétique peut être perçue de façon photographique ou de façon électronique. Le processus photographique utilise une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière pour capter et enregistrer les variations d'énergie. Il est important, en télédétection, de distinguer les termes "image" et "photographie". Une image est une représentation graphique, quels que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui ont été utilisés pour capter et enregistrer l'énergie électromagnétique. [5]

Une photographie désigne spécifiquement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique. Les photographies enregistrent habituellement les longueurs d'onde entre 0,3 et 0,9 mm (les portions visible et infrarouge réfléchi).

Avec ces définitions, nous constatons que toute photographie est une image, mais que les images ne sont pas toutes des photographies. À moins de parler d'images enregistrées par un procédé photographique, nous utilisons donc le terme image.

3.3.1 Notion de pixel

Une photographie peut être présentée et affichée en format numérique en divisant l'image en petits morceaux de taille et de forme égales, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique. C'est exactement ce qui a été fait à la photographie de gauche. En effet, en appliquant les définitions présentées plus haut, nous déduisons que l'image est vraiment une image numérique de la photographie originale ! Cette photographie a été numérisée et subdivisée en pixels. Chaque pixel a été doté d'une valeur représentant les différents niveaux de luminosité. L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité. Les capteurs enregistrent alors électroniquement l'énergie en format numérique (en rangées de chiffres).[5]

Ces deux différentes façons de représenter et d'afficher les données de télédétection, par des moyens photographiques ou numériques, sont interchangeables car elles représentent la même information (mais chaque conversion peut engendrer une perte de précision).

3.3.2 les données des spectres

Dans la section précédente, nous avons décrit la portion visible du spectre et le concept de couleur. Nous percevons les couleurs parce que nos yeux captent la gamme entière des longueurs d'onde visibles et notre cerveau transforme cette information en couleurs distinctes.

L'information d'une gamme étroite de longueur d'onde est captée et emmagasinée sous forme numérique dans un fichier représentant la bande de longueurs d'onde. Il est ensuite possible de combiner et d'afficher de ces bandes d'information numérique en utilisant les trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu). Les données de chaque bande sont représentées comme une couleur primaire et, selon la luminosité relative (c.-à-d. valeur numérique) de chaque pixel dans chaque bande, les couleurs se combineront en proportions différentes pour produire des couleurs distinctes.

Lorsque nous utilisons cette méthode pour afficher une seule bande ou gamme de longueurs d'onde, nous affichons réellement cette bande avec les trois couleurs primaires. Parce que la luminosité de chaque pixel est la même pour chaque couleur primaire, les couleurs se combinent et produisent une image en noir et blanc. L'image est donc affichée avec ses différentes teintes de gris, de noir à blanc. Lorsque nous affichons plus d'une bande, chaque bande ayant une couleur primaire différente, le niveau de luminosité peut être différent pour chaque combinaison de bandes ou de couleurs primaires, et les couleurs se combinent pour former un composé couleurs.[5]

3.3.3 L'utilisation des images satellites

Les images utilisées dans les applications de la télédétection à la cartographie thématique (en particulier des ensembles sols-végétation) sont le plus souvent celles que fournissent les satellites à haute résolution spatiale (Landsat, Spot).[6] [7] [8]

Ces images sont des ensembles de mesures du rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre, ordonnées sous une forme matricielle, et couvrant un domaine spectral s'étendant de 400 à 2200 nm, soit du visible à l'infrarouge moyen.

Pour interpréter l'aspect multispectral de ces images il faut analyser l'interaction du rayonnement solaire avec les composants de la surface de la Terre. Les effets atmosphériques, qui ont fait l'objet d'études détaillées par les physiciens, ne sont pas discutés ici (voir DESCHAMPS et al., 1985). [5] [9] [10] [1]

Dans le présent ouvrage, CERVELLE (1989) rappelle les bases physiques de la réflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux. Par rapport à ce cas général des minéraux et des roches, celui des sols est relativement simplifié :

- les sols sont la partie la plus superficielle de la croûte terrestre. Ils sont donc plus facilement observés par les satellites que les roches, car ils affleurent souvent, que ce soit pour des raisons climatiques (végétation peu couvrante des régions sèches), ou culturelles (défrichements, labours) ;
- les sols sont formés à partir des produits, relativement peu nombreux de l'altération des roches ; à noter que, plus les sols sont altérés, moins leurs constituants sont nombreux ;
- les sols sont ainsi constitués de particules de minéraux argileux, de quartz, d'oxydes et hydroxydes de fer, de matières organiques, de carbonates, de feldspaths etc.. Ces particules sont assemblées en agrégats de taille très variable. Mais, dans tous les cas, les sols sont des composants "rugueux" pour la lumière solaire, selon le critère de Rayleigh - à l'exception peut-être des sols engorgés (voir CERVELLE, 1989).

Chapitre 4

Aperçu sur la caractérisation de la surface

Les données satellitaires utilisées, provenant des capteurs MSS et TM de Landsat, couvrent un domaine spectral s'étendant de 400 à 2400 nm, soit du visible à l'infrarouge moyen. Dans ce domaine et au moment du passage du satellite, l'émission du sol est très largement inférieure au rayonnement solaire réfléchi (FRASER et CURRAN, 1976).

Lors de l'étude de l'interaction rayonnement-sol l'émission a été négligée par rapport à l'absorption et à la réflexion.

4.1 Propriétés spectrales de quelques matériaux

les principaux composants des surfaces terrestres observées par les satellites de télédétection sont les sols et la végétation qui les couvre. [11]

Leurs propriétés spectrales sont mesurées de façon précise au laboratoire. Elles dépendent principalement de la teneur, en argiles, en carbonates, en matières organiques, et en eau. Tous ces composants ont également une influence nette sur la couleur observée à l'oeil nu. Celle-ci peut être reliée aux mesures de réflectance dans le domaine visible par des lois simples. Par contre, la dominante minéralogique s'exprime surtout dans l'infrarouge moyen.

La réflectance est une caractéristique intrinsèque du matériau qui décrit le rapport du flux réémis par le matériau sur le flux incident.

La réflectance d'une surface naturelle de sol, mesurée sur le terrain, dépend en plus de la configuration soleil-capteur-cible et de la rugosité de la surface. Différents modèles permettent de rendre compte de ces effets. La réflectance au niveau d'un pixel est alors une moyenne pondérée des propriétés spectrales élémentaires.

4.1.1 le spectrophotomètre

La réflectance est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente et est le rapport de l'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente en fonction de la longueur d'onde. Sa mesure précise se fait au laboratoire avec un spectrophotomètre sur de petits échantillons, de l'ordre de 1 cm. Ce rapport peut varier en fonction des angles d'illumination et de visée.

Un spectrophotomètre est un appareil qui permet de mesurer l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée ou sur une région donnée du spectre, voir figure 4.2. Selon la loi de Beer-Lambert, l'absorbance d'une solution est proportionnelle à la concentration des substances en solution, à condition de se placer à la longueur d'onde à laquelle la substance absorbe les rayons lumineux.

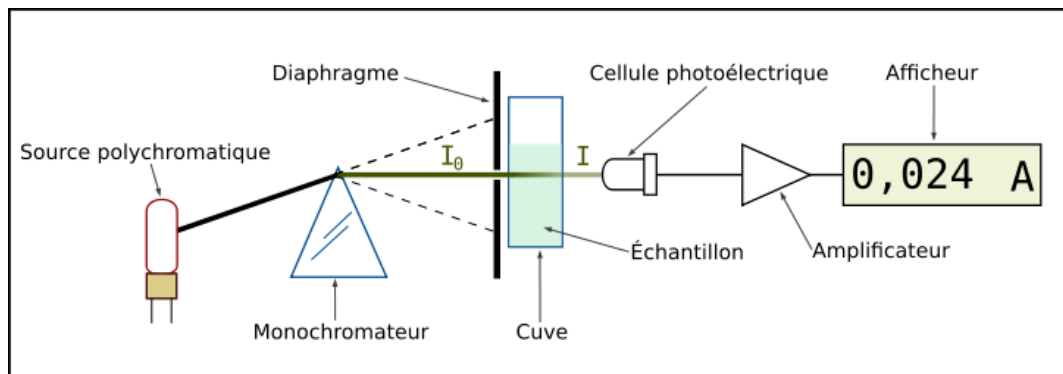


FIGURE 4.1 – Schéma d'un spectrophotomètre

4.1.2 Les propriétés spectrales des sols

Les propriétés spectrales des sols ont été beaucoup étudiées en laboratoire sur des poudres minérales et en milieu naturel sur des roches ou des sols variés. L'indice de réfraction complexe des constituants du sol explique la variation spectrale de la réflectance. De plus, les constituants du sol ayant des indices de réfraction réels du même ordre de grandeur, ces discontinuités sont surtout créées aux interfaces particules du sol/ air. Elles expliquent la diminution de la réflectance quand la taille des particules augmente (GROVE et al., 1992) ou bien l'assombrissement d'un sol dont la teneur en eau volumique augmente (IDSO et al., 1975; TWOMEY et al., 1986).

Au niveau microscopique, l'absorption est liée à des transitions électroniques dans le visible, à des vibrations et des rotations de molécules dans le proche et moyen infrarouge. Ainsi les transitions électroniques du fer expliqueraient en grande partie la diminution de la réflectance dans le bleu (HUNT, 1980).

Au niveau macroscopique, les sols ont été étudiés de façon assez empirique : par exemple la réflectance spectrale d'un sol décroît sur tout le domaine visible lorsque la teneur en matière organique augmente (KASUMOV et al., 1992). BAUMGARDNER et al. (1985), IRONS et al. (1989) ont recensé les principaux constituants du sol affectant la réflectance : les minéraux (argiles, oxydes et hydroxydes de fer, carbonates, sulfates...), la matière organique (humus et substances non humiques), l'eau et l'air forment des milieux extrêmement variés dont les propriétés optiques sont en conséquence presque infinies.

STONER et BAUMGARDNER (1981) ont néanmoins défini cinq classes de spectres caractéristiques de la plupart des sols des États-Unis. Ces travaux se contentent souvent de cataloguer des spectres acquis dans une configuration de mesure précise. De telles études sont, bien entendu, utiles dans une optique de cartographie ou de classification.

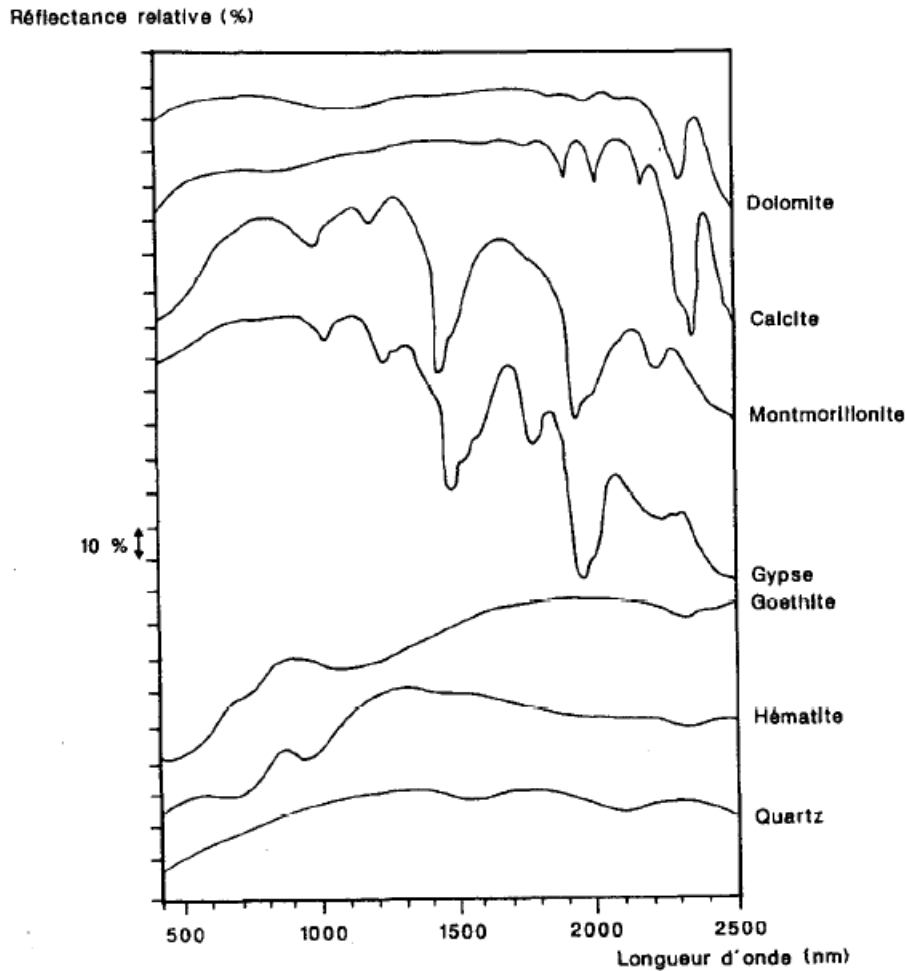


FIGURE 4.2 – Courbes de réflectance de quelques minéraux fréquents dans les sols [1]

Les éléments les plus courants dans les minéraux et les sols, à savoir le silicium, l'oxygène et l'aluminium ne présentent pas de niveaux énergétiques susceptibles de produire des caractéristiques remarquables dans les spectres visibles et infrarouge.

A l'exception de la silice pure, les minéraux formés à partir de ces éléments présentent pourtant des spectres particuliers. La structure cristalline surimpose ses effets, déplaçant les niveaux de transitions électroniques des ions individuels. Cet effet est très net dans le cas des minéraux contenant du fer et du manganèse.

De fait, les bandes d'absorption observées dans le domaine visible et proche infrarouge des spectres des roches et des sols sont dues principalement à la présence de fer, d'eau, de groupements hydroxyles ou de carbonates.

4.1.3 Exemples de spectres de matériaux de surface

La figure 4.3 illustre trois exemples de spectres de matériaux de surface, mesurés au laboratoire ; les mesures de terrain sont similaires mais entachées de fluctuations dans les longueurs d'onde d'absorption de la vapeur d'eau. [1]

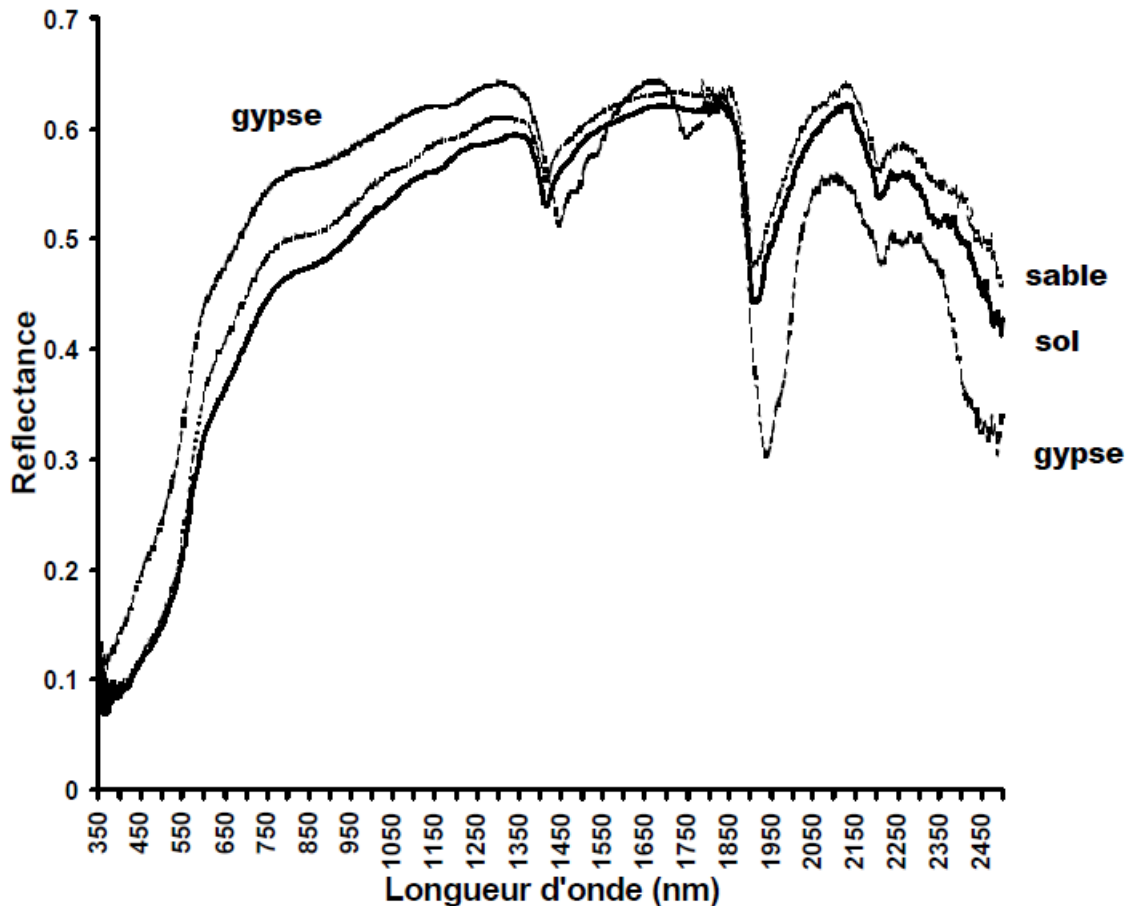


FIGURE 4.3 – Réflectance spectrale de trois types de matériaux de surface (mesures en laboratoire) [1]

Les spectres de sols varient de façon importante en amplitude, mais on observe que les variations de forme concernent surtout les longueurs d'ondes les plus courtes (domaine du bleu) et les plus longues (Moyen Infra Rouge, MIR). Dans ce dernier domaine ce sont les sols gypseux qui présentent les absorptions les plus fortes, liées à la présence d'eau de constitution dans les cristaux. Au contraire dans le domaine 400-500 nm, c'est le sable qui présente l'absorption la plus marquée, liée à la présence d'oxydes de fer lui donnant une couleur rougeâtre. En résumé, le sable qui s'est révélé à l'analyse microscopique essentiellement composé de grains de quartz maculés de dépôts d'hématite en surface, a une

réflectance faible dans le bleu puis très rapidement croissante pour atteindre des valeurs élevées dans tous les autres domaines du rouge à l'infrarouge moyen (MIR). Le gypse a un comportement spectral pratiquement opposé (valeurs élevées dans le visible et faible dans le MIR); les autres matériaux, sol et roche, présentent des situations intermédiaires.[9]

4.2 Relations entre la couleur et la réflectance

La couleur est une donnée de sol très utilisée, aussi bien dans les travaux de terrain que dans les systèmes de classifications. Son étude se développe actuellement en relation avec les propriétés spectrales des sols et de leurs constituants, observées au laboratoire ou par télédétection. [11]

Globalement, les effets des principaux constituants sur la couleur des sols ont été résumé par TAILOR (1982). Des divers travaux publiés sur le sujet on peut retenir les points suivants [11] :

- la présence de matières organiques en quantité notable (plus de 2 %) se traduit par une couleur foncée (clarté Munsell faible), correspondant à une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde (SHIELDS et al., 1968 ; LEGER et al., 1979 ; KRISHNAN et al., 1980).
- des taches de couleur noirâtres (oxydes de manganèse), verdâtres ou bleuâtres (carbonates et sulfates d'hydroxydes ferreux) sont rencontrées dans certains sols, mais rarement à leur surface ;
- les carbonates et aluminosilicates ont une couleur claire, liée à une réflectance élevée dans le domaine visible, qui varie sensiblement avec la taille des particules (LEU, 1977). Cette couleur est souvent masquée par celle des autres composés ;
- les différentes formes d'oxydes de fer (voir SCHWERTMANN et TAYLOR, 1977) sont responsables de la couleur des sols jaunes, orangés et rouges.

L'influence de la texture sur la couleur et la réflectance a été étudiée sur des mélanges de proportions variées de sable et d'argile. GERBERMANN et NEHER (1979) ont montré que plus l'échantillon est sableux, plus la couleur est claire.

Troisième partie

Partie expérimentale

Chapitre 5

Rappel sur les résultats de la caractérisation selon la norme ISO 13503-2 :2006

Ces études ont été menées dans le but de répondre à une problématique bien définie, qui est d'essayer de remplacer les billes céramiques utilisées dans les fluides de fracturation hydraulique et qui sont des produits importés, par des sables naturels algériens vu les réserves inestimables qui sont présentes sur le territoire national. Dans le but de réduire les coûts d'importation et d'encourager l'activité minière dans ce domaine qui est pour le moment en stagnation, avec seulement 8 exploitations du sable siliceux et 24 exploitations minières de sable concassé pour 786 employés à travers tout le pays, ce qui est un nombre infime devant toutes les réserves disponibles notamment dans le sud du pays.

Un agent de soutènement doit répondre à plusieurs exigences de la norme ISO 13503 pour qu'il soit validé pour son utilisation dans les fluides de fracturation hydraulique. Les essais établis durant tout le projet et dans les différents laboratoires, que ce soit au niveau de l'Ecole Nationale Polytechnique ou à la Division Technologies & Développement de SONATRACH avaient pour but d'évaluer les caractéristiques de dix (10) échantillons de sable, dont cinq (5) sont d'origine éolienne et cinq (5) issus de carrières. [12]

5.1 Résultats synthétisés

Le tableau 5.1 représente les différents valeurs obtenues suite aux essais exigés par la norme ISO 13503-2 :2006. [12]

TABLE 5.1 – Les résultats obtenus suivant la norme ISO 13503-2 :2006 pour des échantillon de sable algérien

Echantillon N°	Solubilité dans les acides	Résistance à l'écrasement	Sphéricité	Rondeur	Turbidité	Teneur SiO2	Diamètre*
1	3.862	11.355	0.900	0.800	496.000	98.480	300.000
2	2.745	10.310	0.900	0.800	831.000	98.420	300.000
3	2.961	24.385	0.900	0.800	-	97.720	850.000
4	2.414	2.285	0.900	0.700	2247.000	98.950	300.000
5	1.720	14.680	0.200	0.500	324.000	99.310	425.000
6	12.091	22.170	0.800	0.400	1126.000	95.070	400.000
7	7.401	7.900	0.800	0.900	54.800	96.440	400.000
8	8.063	6.435	0.900	0.800	42.500	97.740	250.000
9	3.843	9.185	0.700	0.500	23.200	98.670	250.000
10	5.711	10.335	0.800	0.800	24.400	98.090	400.000
11	4.040	-	0.600	0.700	826.000	98.500	425.000
12	7.074	-	0.500	0.600	300.000	96.340	300.000
13	7.400	-	0.300	0.400	355.000	96.830	212.000
14	2.741	-	0.400	0.900	-	98.160	850.000
15	2.224	-	0.500	0.200	990.000	98.970	1000.000
16	6.026	-	0.900	0.900	2422.000	95.750	300.000
17	3.405	-	0.700	0.400	2027.000	98.610	300.000
18	2.885	-	0.600	0.200	1880.000	98.320	300.000
19	6.824	-	0.600	0.500	54.500	99.000	229.000
20	7.469	-	0.600	0.600	46.500	96.840	394.000
21	6.643	-	0.500	0.400	27.700	97.610	451.551
22	6.721	-	0.800	0.900	44.700	97.020	592.387
23	7.640	-	0.600	0.800	66.000	97.150	344.206
24	6.805	-	0.600	0.600	63.300	97.950	451.556
25	7.666	-	0.800	0.800	522.000	94.870	451.556

5.2 Première Analyse

Suite à l'analyse des interprétations faites après l'obtention des résultats, la possibilité d'établir des liens entre les différentes propriétés physiques et chimiques du sable algérien est parue utile pour enrichir les données initiales à fournir pour le traitement des images satellites. [12]

Les liens qui s'établissent à première vue entre les valeurs du tableau 5.1) sont cités ci-dessus :

- Des valeurs élevées du diamètre de tamis ayant le plus grand pourcentage de passants sont accompagnées d'une résistance à l'écrasement relativement faible.
- Les bonnes sphéricités sont accompagnées de résistances à l'écrasement appréciable.
- Une augmentation de la valeur de la silice est suivie d'une diminution de la valeur de la valeur de la solubilité dans les acides.

Ces remarques renvoient vers un éventail de questionnements ... Existe-t-il des relations liant ces propriétés ? Quelles sont les lois qui régissent ces phénomènes, au niveau granulaire ?

La partie expérimentale dans ce cas contiendra un recueil des différents résultats obtenus de part différents auteurs à travers le monde dans ce sens.

5.3 Travaux de certains auteurs

La taille et la forme des particules du sol reflète l'historique de la formation des grains. À son tour, le comportement macroscopique des résultats de la masse du sol à partir des interactions de niveau de particules qui sont touchés par la forme des particules.[2] Sphéricité, rondeur et finesse caractérisent différentes échelles associées à la forme des particules.

De nouvelles données expérimentales et des données provenant d'études publiées antérieurement sont rassemblés dans deux bases de données pour explorer les effets de la forme des particules sur l'emballage ainsi que des propriétés de petite et grande déformation des sols sableux.

L'analyse des données montre que l'augmentation de l'irrégularité de particules (angularité et / ou excentricité de signe E) conduit à : une augmentation de E_{max} et E_{min} , une diminution de la rigidité mais avec une sensibilité accrue à l'état de stress, une augmentation de la compressibilité sous zéro latérale sous chargement, et une augmentation de l'OCS angle de friction de l'État critique et intercepter une avec un faible effet sur ϕ de la pente.

Par conséquent, la forme des particules émerge comme une propriété de l'indice du sol important qui doit être correctement caractérisé et documenté, en particulier dans les sables et graviers propres. L'évaluation systématique de la forme des particules conduira à une meilleure compréhension du comportement de sable. [13] [14]

5.3.1 la forme d'une particule

La sphéricité et la rondeur peuvent être caractérisés de manière efficace par comparaison visuelle avec des graphiques (Folk 1955, Barrett 1980). Analyse d'image numérique facilite l'évaluation des descripteurs mathématiques de la forme des particules, y compris l'analyse de Fourier, analyse fractale et d'autres techniques hybrides (par exemple, Meloy 1977, Clark 1987, Hyslip et Vallejo 1997, Bowman et al., 2001, Sukumaran et Ashmawy 2001). [2]

La mesure directe de la rugosité est lourde : la nature fractale de surfaces rugueuses

implique qu'il n'y a pas d'échelle caractéristique sur la surface elle-même. Par conséquent, la durée d'observation pertinente de la rugosité devient la zone de contact entre particules.

Enfin, les paramètres de forme peuvent être déduites de comportement macro-échelle de la masse de sol. Par exemple, la forme des particules affecte le flux granulaire sur les plans inclinés, temps de séjour sur des tamis, et le temps de sédimentation dans une colonne de fluide. Toutefois, il est impossible de séparer les contributions relatives de la rugosité, la sphéricité et la rondeur de ces mesures individuelles. [2]

La régularité ρ est calculé comme la moyenne entre rondeur et la sphéricité,

$$\rho = (R + S) / 2.$$

La plupart des sables concassés présentent des formes similaires : rondeur près de $R = 0,2$ à $0,3$ et la sphéricité autour $S = 0,7$ à $0,8$. La forme varie en fonction de la taille des particules et des particules plus petites sont plus plane et avec des coins plus nets. Les sables concassés contiennent entre 1% et 25% de particules lamellaires de mica. Sables naturels présentent un large éventail de formes ; typiquement : rondeur $R = 0,3$ à $0,9$ et la sphéricité $S = 0,5$ à $0,9$. Les sables de la rivière a une texture très lisse sables contiennent un pourcentage important de lamellaires écrasé. [2] [14]

TABLE 5.2 – Les propriétés élastiques des géomatériaux à température ambiante [2]

matériau	Module de Young(GPa)	Module de cisaillement(GPa)	Coefficient de Poisson
Quartz	76	29	0,31
Calcaire	2-97	1,6-38	0,01-0,32
Basalte	25-183	3-27	0,09-0,35
Granite	10-86	7-70	0,00-0,30
Hématite	67-200	27-78	–
Magnétite	31	19	–
Schiste	0,4-68	5-30	0,01-0,34

5.3.2 Rigidité des particules

La déformation d'une masse de sol à très petits échantillons représentatifs provient des déformations élastiques dans les points de contact entre les particules.

La mécanique du contact montre que les propriétés élastiques des particules de contrôler les déformations de contacts de particules (Johnson, 1985), et ces déformations à leur tour influent sur la rigidité des assemblages de particules. Propriétés élastiques des différents minéraux et des roches sont listés dans la figure 5.2. [2]

Le module d'un seul grain, qui détermine la raideur de contact des particules, est au moins un ordre de grandeur supérieur à celui de l'ensemble des particules.[14]

5.3.3 les interactions physiques entre les particules

La mécanique des milieux continus suppose que les forces appliquées sont transmises uniformément à travers un système granulaire homogénéisé. En réalité, cependant, les distributions de forces interparticulaires sont fortement inhomogène, et la charge appliquée est transféré à travers un réseau de chaînes de forces interparticulaires. Le trouble générique de particules, les fluctuations spatiales locales de nombre de coordination, et les positions des particules voisines produire contraintes d’emballage et le trouble. Ce trouble géométrique des particules conduit à structurées hétérogènes, mais les distributions de force au sein du système granulaire. Déformation est associée à flambage de ces chaînes de forces et de l’énergie est dissipée par glissement aux amas de particules entre les chaînes de force. [2]

La simulations discrètes de particules numériques, tels que le (distincte) méthode discrète de l’élément (Cundall et Strack, 1979) et la méthode de dynamique des contacts (Moreau, 1994), offrent un aperçu physiques dans les interactions des particules et des transferts de charge qui sont difficiles à déduire des expériences physiques. Les entrées typiques pour les simulations sont particules conditions d’emballage et les caractéristiques de contact interparticulaire tels que l’angle de friction interparticulaire. Les détails complets de ces méthodes numériques sont au-delà de la portée de ce livre ; renseignements supplémentaires peuvent être trouvés dans Oda et Iwashita (1999).

Cependant, quelques-unes des principales conclusions sont utiles pour développer une meilleure compréhension de la façon dont les contraintes sont effectuées par le biais des systèmes de particules discrètes telles que les sols et comment ces distributions influencent les propriétés de déformation et de résistance.

Chapitre 6

Résultats et interprétation

6.1 Les différents graphiques liants les paramètres

Les figures qui suivent représentent certains paramètres en fonction d'autres, selon l'importance qui a été mentionnée lors de la première analyse. Cette étape permet la visualisation de certains liens éventuels. Schématiquement un nombre supérieur d'échantillons aurait permis d'avoir une meilleure appréciation des liens et l'établissement des corrélations probables, vu que théoriquement les propriétés physico-chimiques d'un matériau définissent en premier lieu son comportement et son rôle dans quelque soit le domaine où il est destiné. Pour rappel dans notre cas, les sables dans les fluides de fracturation jouent le rôle d'agents de soutènement maintenant la fracture ouverte le plus longtemps possible, assurant une résistance beaucoup plus faible à l'écoulement du fluide que la roche réservoir afin d'assurer la production du gaz ou de l'huile contenu dans le réservoir.

Dans cette partie, des graphiques ont été élaborés liant les différents paramètres deux à deux, jugés les plus intéressants à étudier. Voir les figures 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6.

Note : La résistance à l'écrasement unité : MPa, la solubilité à l'acide : sans unité, la turbidité : NTU, sphéricité et rondeur : sans unité, la teneur en SiO₂ en %, le diamètre : μm .

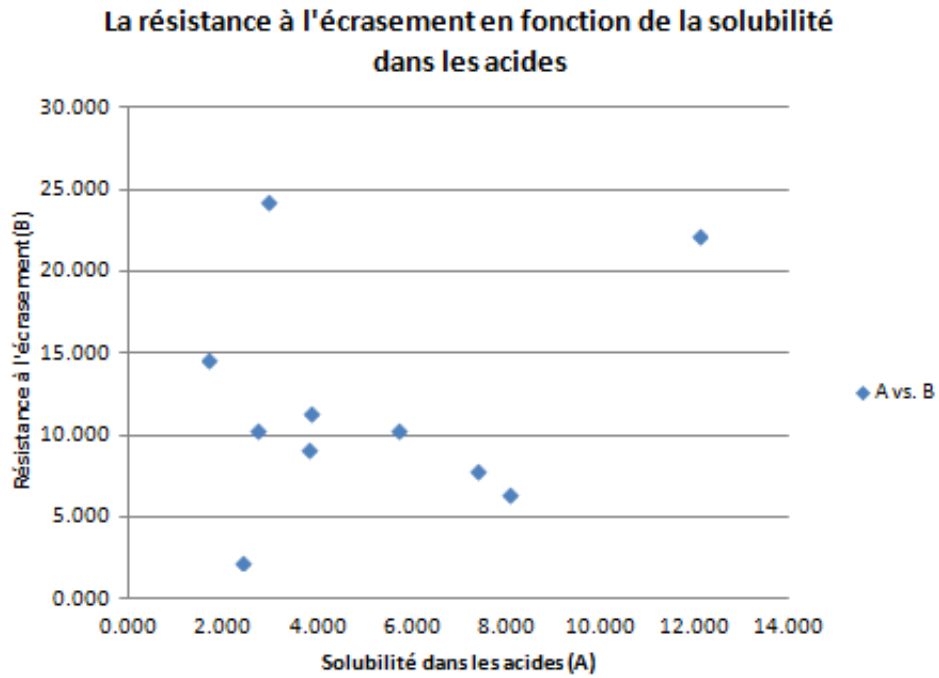


FIGURE 6.1 – La résistance à l'écrasement en fonction de la solubilité des proppants dans les acides

Commentaires : Dans ce cas de figure, les matières solubles dans l'acide sont les carbonates, les feldspaths, les oxydes de fer, les argiles, etc. Elles influent de façon directe sur la résistance à l'écrasement, on remarque que plus la valeur de la solubilité augmente plus la résistance à l'écrasement diminue.

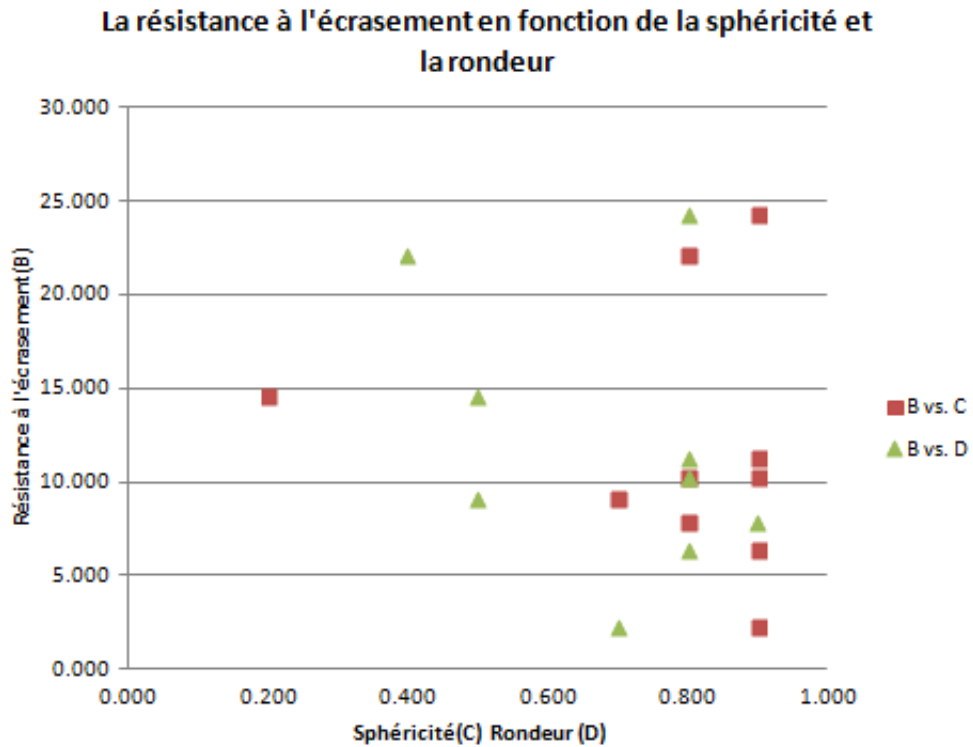


FIGURE 6.2 – La résistance à l'écrasement en fonction de la sphéricité et la rondeur

Commentaires : Il a remarqué qu'aucun lien direct n'apparaît, ce ci s'explique par le fait qu'il existe d'autres paramètres dont le grain dépend et pouvant influençant la résistance à l'écrasement dont la composition de la particule ce qui la rend plus au moins fragile aux contraintes appliquées.

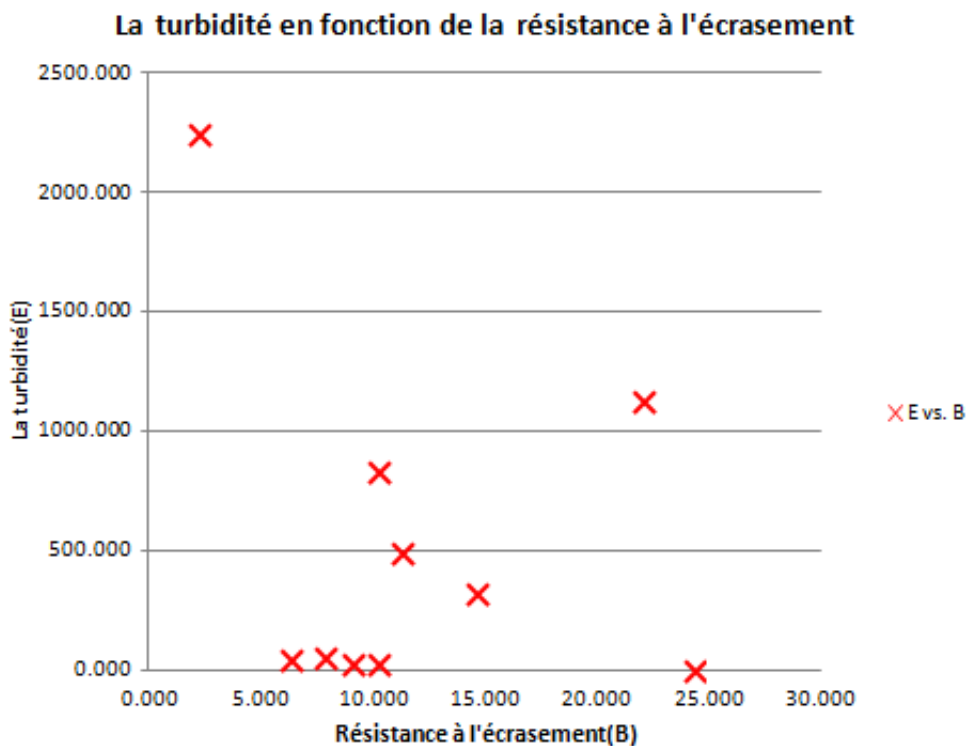


FIGURE 6.3 – La turbidité en fonction de la résistance à l'écrasement

Commentaires : Dans ce cas aussi, le lien direct n'apparaît pas, sauf qu'on peut remarquer que plus la turbidité augmente plus la résistance diminue pour quelques points, ceci est dû principalement à la nature des particules en suspension, et bien sûr à la composition du grain, il est nécessaire de se pencher sur les liens entre la turbidité et la composition du grain.

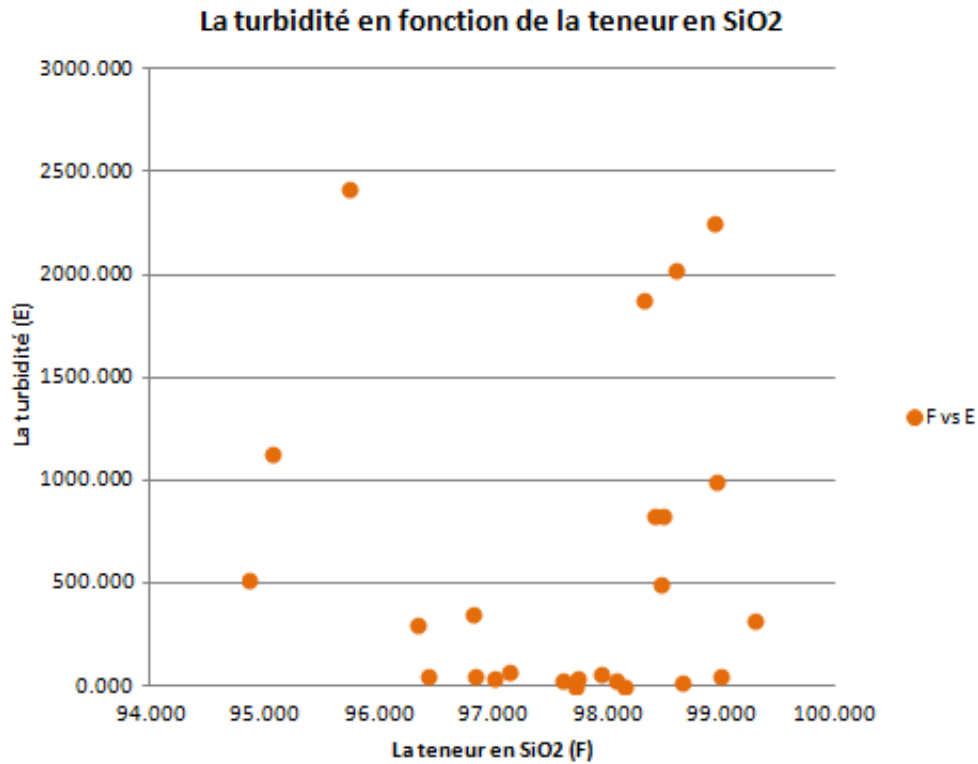


FIGURE 6.4 – La turbidité en fonction de la teneur en SiO₂

Commentaires : Sur cette figure se distingue deux population si on peut dire, inférieur à 98.5% de teneur en silice, la turbidité correspondante est très faible, pour la teneur supérieur à 98.5% la valeur de la turbidité est plus importante. Les explications sont très délicates, car ceci aussi revient aux conditions de dépôt des grains, et aux conditions climatiques principalement.

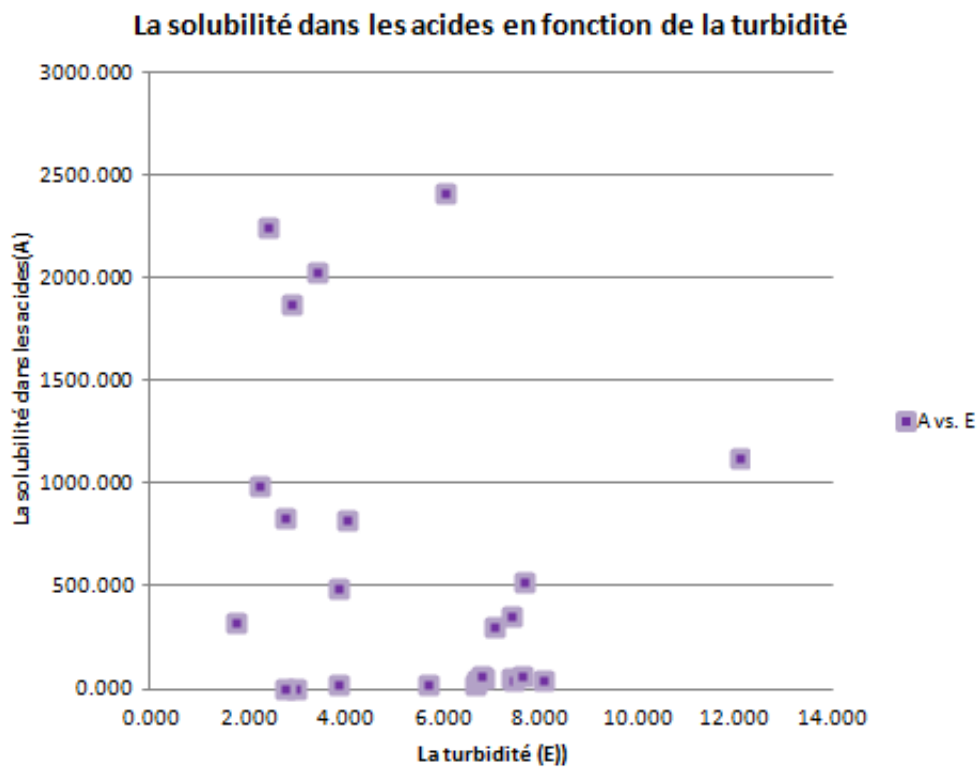


FIGURE 6.5 – La solubilité dans les acides en fonction de la turbidité

Commentaires : Aucun commentaire ne peut être attribué à cette figure pour l'instant.

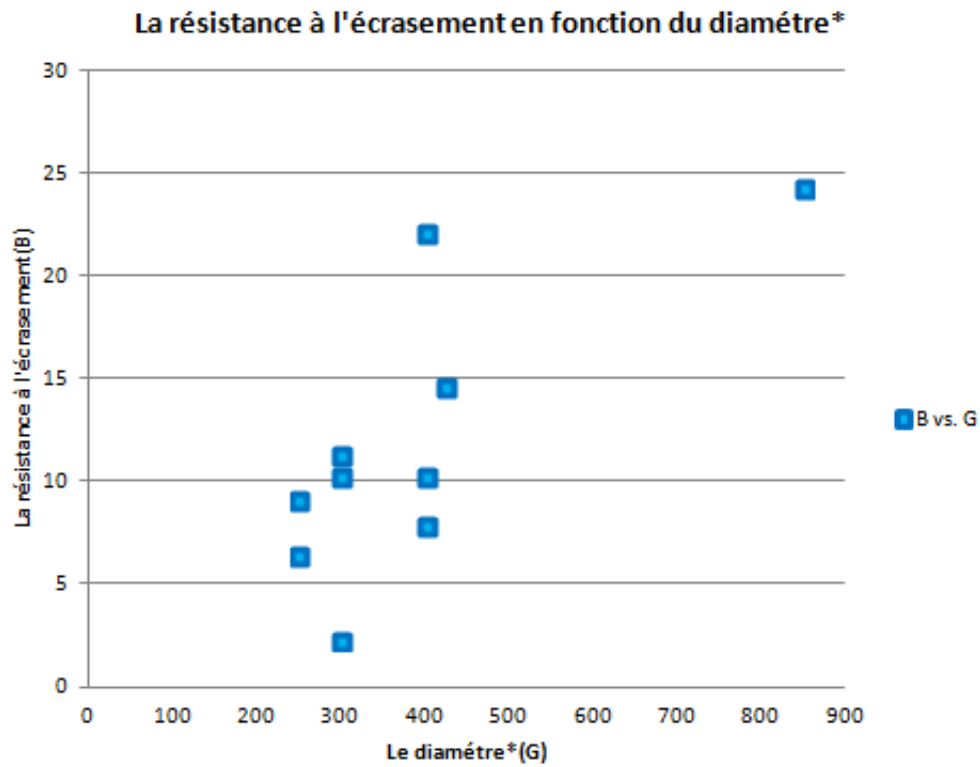


FIGURE 6.6 – La résistance à l'écrasement en fonction du diamètre

Commentaires : On remarque pour un même diamètre il peut exister différentes valeurs de résistance à l'écrasement, aucun lien directe ne peut être établi, ce qui est normal, vu que les grains n'ont ni la même nature ni la même composition.

Quatrième partie

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives La curiosité et l'envie d'apprendre davantage sur les techniques de caractérisation du sable naturel algérien pour des utilisations variées a été la force motrice de l'élaboration de ce mémoire.

La télédétection parmi les techniques modernes d'identification et de reconnaissance de terrains permet d'avoir des résultats intéressants quant aux matériaux de surface selon la littérature disponible.

Dans notre cas, il serait intéressant de convoiter les méthodes de télédétection par l'utilisation d'images satellites à grandes résolution.

Les liens établies entre les différentes propriétés physico-chimiques du sable naturel algérien aide à mieux comprendre ce matériau et à mieux apprécier son rôle dans les fluides de fracturation hydraulique.

Afin d'engager une étude rigoureuse plus dans le détail, la collection d'échantillon représentatif ainsi que des images satellites des superficies ciblées.

Les points qui suivent résumant le fin fond de la visée de cette étude :

- Fixer une zone d'étude, spécifier la région à étudier et collecter des échantillons représentatifs ;
- collecter plus de données sur les propriétés physico-chimiques des échantillons en question, ceci permettra de booster l'interprétation des images en question à l'aide de la télédétection ;
- exploiter les logiciels de simulation pour une visualisation optimale des liens éventuels entre les propriétés à vérifier selon les normes ISO et API pour ce qui est des cas de l'utilisation des proppants.

Bibliographie

- [1] S.Bernard Strasbourg France R.Escadafal, W.Mehl. Potentialités de l'instrument vegetation pour le suivi de la désertification : simulation de la détection des mouvements de sables en afrique du nord. *ORSTOM*, 1995.
- [2] Kenichi Soga. Microscopic characterisation of soils.
- [3] *Notions fondamentales de télédétection*. Ressources naturelles Canada.
- [4] *Notions fondamentales de télédétection*, chapter Capteurs. Ressources naturelles Canada.
- [5] *Notions fondamentales de télédétection*, chapter Analyse d'image. Ressources naturelles Canada.
- [6] Elizabeth C.I. Paisley, Nicholas Lancaster, Lisa R. Gaddis, and Ronald Greeley. Discrimination of active and inactive sand from remote sensing : Kelso dunes, mojave desert, california. *Remote Sensing of Environment*, 37(3) :153 – 166, 1991.
- [7] Mohammed A. Al-Masrahy and Nigel P. Mountney. Remote sensing of spatial variability in aeolian dune and interdune morphology in the rubâ al-khali, saudi arabia. *Aeolian Research*, 11(0) :155 – 170, 2013.
- [8] F.M. Howari, A. Baghdady, and P.C. Goodell. Mineralogical and geomorphological characterization of sand dunes in the eastern part of united arab emirates using orbital remote sensing integrated with field investigations. *Geomorphology*, 83(1–2) :67 – 81, 2007.
- [9] Richard Escadafal. *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection*. ORSTOM, 1989.
- [10] Patrick P Pease, Gregory D Bierly, Vatche P Tchakerian, and Neil W Tindale. Mineralogical characterization and transport pathways of dune sand using landsat tm data, wahiba sand sea, sultanate of oman. *Geomorphology*, 29(3–4) :235 – 249, 1999.

-
- [11] Dominique Courault Richard Escadafal, Michel-Claude GIRARD. La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *ORSTOM*, 1988.
- [12] K.Djellouli H.A.Houhou. Caratérisation physico-chimique des proppants et rhéologie des fluides de fracturation. Master's thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
- [13] Sungwoo Ha Daehyeon Kim. Effects of particle size on the shear behavior of coarse grained soils reinforced with geogrid. *materials*, 2014.
- [14] Jake Dodds Gye-Chun Cho and J. Carlos Santamarina. Particle shape effects on packing density, stiffness and strength,natural and crushed sands.