

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département Automatique**

MEMOIRE DE MAGISTER

En Automatique

Option : Traitement d'Images et Reconnaissance des Formes

Présenté par

OUDIAI Fatiha
Ingénieur UMMTO

**Relevé des données d'un infiltromètre par un
système de vision**

Mémoire soutenu le :

Devant le jury d'examen composé de :

Président	BENFDILA Arezki	Professeur,	UMMTO
Rapporteur	HAMMOUCHE Kamal	Professeur,	UMMTO
Examineur	LAGHROUCHE Mourad	Professeur,	UMMTO
Examineur	DIRAMI Ahmed	Maitre de conférences B,	UMMTO
Examineur	SI SMAIL Ali	Maitre de conférences B,	UMMTO

Sujet de thèse de Magister proposé à

Melle OUDIAI Fatiha

Thème : **Relevé des données d'un infiltromètre par un système de vision**

Encadrant : Mr **HAMMOUCHE Kamal**, professeur à l'UMMTO

Cadre et objectif du travail

L'infiltromètre à disque est un instrument couramment utilisé aujourd'hui pour la mesure in situ ou au laboratoire de la conductivité hydraulique d'un sol non saturé, qui constitue une information très importante dans le domaine de l'agriculture, de l'urbanisme. Le principe de cet appareil repose sur la mesure du niveau d'eau infiltré dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque au cours du temps. Cette mesure s'effectue en général par un ou deux opérateurs à l'œil nu en fonction du temps à l'aide d'un chronomètre.

L'objectif de notre travail est de proposer une solution qui consiste à relever d'une manière automatique le taux d'infiltration mesuré par un infiltromètre à disque par l'intermédiaire d'un système de vision comprenant une caméra et un ordinateur.

Mots clés : infiltromètre , vision artificielle.

Avant propos

Le travail que nous présentons dans ce mémoire à été effectué au sein de laboratoire « Robotique et vision » du département automatique, faculté de Génie Electrique et Informatique, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

J'exprime mes remerciements et ma gratitude à mon directeur de mémoire, Mr HAOMMOUCHE Kamal, professeur à l'ummto, pour l'aide et le soutien et les conseils qu'il m'apporté tout au long de ce travail.

Nots vifs remerciement vont aussi à monsieur BENFDILA Arezki , professeur à l'ummto,pour avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire et l'intérêt qu'il a apporté à ce travail.

Nous tenons à remercier tous les membres du jury, Mr LAGHROUCHE Mourad , professeur à l'ummto, Mr DIRAMI Ahmed , Maitre de conférence B à l'ummto, Mr SI SMAIL Ali, Maitre de conférences B , à l'ummto.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Infiltromètre à disque et les différentes méthodes de mesure d'infiltration	
1.1. Introduction	3
1.2. Généralités.....	3
1.2.1. Propriétés physique du sol	3
1.2.2. Infiltration de l'eau dans le sol	4
1.3. Les différents appareils d'infiltrométries.....	6
1.3.1. Infiltromètre simple anneau	6
1.3.2. Infiltromètre double anneau	6
1.3.3. Infiltromètre double anneau automatisé.....	7
1.3.4. Infiltromètre de Guelph	8
1.3.5. Infiltromètre minidisque.....	9
1.3.6. Infiltromètre à double disque.....	10
1.3.7. Infiltromètre à disque	10
1.4. Théorie de l'infiltration axisymétrique	13
1.4.1. Méthode en régime permanent	14
1.4.2. Méthode basée sur le régime transitoire.	17
1.5. Infiltromètre simple anneau associé à un système de vision.....	18
1.6. Conclusion.....	20
Chapitre 2 : Techniques de mesure de niveau	
2.1. Introduction.....	21
2.2. Technique de mesure de niveau.....	21

2.2.1. Capteurs industriels.....	21
2.2.1.1. Méthodes hydrostatiques.....	22
2.2.1.2. Méthodes électriques.....	27
2.2.1.3. Méthodes de rayonnement.....	29
2.2.2 Capteurs optiques.....	31
2.2.3. Choix d'une méthode de mesure de niveau dans un infiltromètre	31
2.3. Systèmes de vision artificielle.....	32
2.3.1. Systèmes d'éclairage.....	33
2.3.2. Caméra.....	36
2.4. La morphologie mathématique	43
2.4.1. Notion d'élément structurant.....	43
2.4.2. Propriétés de bases des transformations morphologiques.....	44
2.4.3. Opérations morphologiques de bases appliquées aux images binaires.....	45
2.4.4 Morphologie mathématique fonctionnelle.....	48
2.4.5. Notions de transformations de voisinage	54
2.4.6. La squelettisation	56
2.5. Conclusion.....	58

Chapitre 3 : Mesure d'infiltration par un système de vision

3.1. Introduction.....	59
3.2. Système de mesure de niveau d'eau dans un infiltromètre à disque.....	59
3.2.1. Dispositif d'éclairage.....	59
3.2.2. Choix de la caméra.....	60
3.2.3. Méthodologie.....	61

3.3. Les différentes étapes de la méthode.....	64
3.4. Tests et résultats.....	73
3.5. Conclusion.....	79

Conclusion générale

Conclusion générale	81
---------------------------	----

Bibliographie

Annexe

Introduction générale

La connaissance des propriétés hydraulique d'un sol non saturé est indispensable pour décrire les caractéristiques du sol qui ont une grande importance pour leurs utilisation dans différents secteurs : urbain, agricole, industriel, etc.

Pour déterminer les caractéristiques hydrauliques du sol non saturé, plusieurs appareils d'infiltromètres ont été développés depuis 1905, parmi les plus courants on distingue les infiltromètres à disque (Clothier et White, 1981, Perroux et White 1988) . Le principe de ces appareils repose sur la mesure du niveau d'eau infiltré dans le réservoir principal au cours du temps (lame infiltrée). L'étude des phénomènes d'infiltration, relative à ces appareils reste difficile à aborder avec les moyens classiques notamment en relevant le niveau d'eau infiltré à l'œil nu au cours du temps en utilisant un chronomètre.

La mesure de niveau d'une manière automatique d'un produit solide, liquide ou gazeux, a fait l'objet d'études dans plusieurs domaines de l'industrie.

Les méthodes de mesure de niveau sont classées en deux classes. La première classe utilise des capteurs industriels. Ces capteurs de mesure peuvent être classifiés selon la méthode de mesure. Cette mesure peut être hydrostatique, c'est-à-dire basée sur les principes d'Archimède ou sur la pression hydrostatique due à la hauteur du liquide au dessus du capteur. Certains capteurs de niveau utilisent des principes électriques basés sur des variations d'impédances comme les sondes de niveau capacitives. D'autres capteurs de niveau utilisent des principes de rayonnement comme le capteur radar. Le choix l'une de ces méthodes de mesure doit prendre en compte plusieurs critères.

La deuxième classe utilise des capteurs optiques (caméras). La mesure est effectuée via un système de vision artificielle.

La vision artificielle (ou vision par ordinateur) constitue une des branches de l'intelligence artificielle. La vision artificielle consiste à reproduire les résultats obtenus par la vision humaine sur un ordinateur en utilisant des moyens informatiques en remplaçant l'œil par une caméra et le cerveau par un ordinateur.

Un système de vision artificielle utilise en entrée une ou plusieurs images numériques acquises à l'aide d'une caméra, ces images subissent un ensemble de traitements dans le but d'extraire un maximum d'informations relatives à l'objet à étudier.

La mesure de niveau par un système de vision artificielle passe par deux tâches successives. La première tâche est l'acquisition des images par une caméra. La deuxième tâche concerne les techniques de traitement d'images pour la détection du niveau d'un produit solide, liquide ou gazeux dans un réservoir.

Le but de notre travail consiste à concevoir un système qui permet de mesurer le niveau d'eau dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque d'une manière automatique par un système de vision artificielle.

L'acquisition de l'image repose sur la qualité de l'éclairage, capteur d'image, le positionnement de l'objet d'intérêt (réservoir principale) par rapport à la caméra.

Le traitement de l'image repose sur l'amélioration de la qualité de l'image, l'extraction des informations pertinentes en utilisant des outils de traitements d'image basés sur des concepts très divers comme la morphologie mathématique.

Dans ce cadre, nous avons partagé notre travail comme suit :

Le premier chapitre est consacré au domaine de l'infiltration. Il présente les différents appareils d'infiltration et les différentes méthodes théoriques d'infiltration.

Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes de mesure de niveau. Le choix d'un système de vision pour mesurer le niveau d'eau dans un infiltromètre à disque par rapport aux autres techniques y est justifié. Les différents éléments d'un système de vision (dispositif d'éclairage, caméra) ainsi que la théorie sur la morphologie mathématique sur laquelle s'appuie notre application sont présentés.

Le troisième chapitre décrit les étapes de la méthode adoptée pour la mesure du niveau d'eau dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque et les résultats obtenus par cette méthode.

Nous terminons notre travail par une conclusion général.

1.1. Introduction

L'infiltromètre à disque est un instrument couramment utilisé aujourd'hui pour la mesure sur le terrain ou au laboratoire des caractéristiques hydrauliques des sols. Le principe de cet appareil consiste à mesurer le flux d'infiltration axisymétrique de l'eau dans le sol à travers un disque.

Nous présentons dans ce chapitre, quelques généralités sur le sol, un état de l'art sur les différents appareils d'infiltrométries et les différentes méthodes théoriques de mesure d'infiltration.

1.2. Généralités

Le sol est un milieu poreux, complexe, constitué de trois phases :

- Une phase solide
- Une phase liquide
- Une phase gazeuse

La phase solide se représente comme l'accumulation d'un ensemble de grains, minéraux ou organique, de taille diverses qui laissent entre eux des vides qu'on appelle des pores. L'ensemble de ces pores représente la porosité.

La phase liquide se compose principalement d'eau incluant l'ensemble des substances qui y sont dissoutes.

La phase gazeuse correspond à l'air du sol. Son rôle est important car il participe à la respiration des végétaux.

1.2.1. Propriétés physiques du sol

Le volume et la masse des différentes phases du sol (Fig.1.1) permettent de définir les grandeurs suivantes [18]:

-La porosité : $\varepsilon = \frac{V_V}{V_t}$

V_V et V_t représentent respectivement le volume occupé par les vides et le volume total.

-La masse volumique de solide : $\rho_s = \frac{M_g}{V_g}$ (kg/m³)

M_g et V_g représentent respectivement la masse et le volume des grains.

-La teneur massique en eau : $w = \frac{M_w}{M_g}$

M_w représente la masse de l'eau.

-La teneur volumique en eau : $\theta = \frac{V_w}{V_t}$

V_w représente le volume occupé par l'eau.

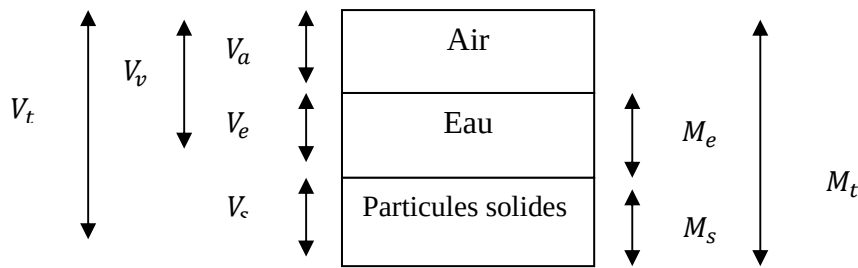


Fig.1.1 : Représentation schématique d'un volume de sol.

1.2.2. Infiltration de l'eau dans le sol

1.2.2.1. Infiltration

Infiltration appelée aussi lame infiltrée notée I représente le volume d'eau infiltré au cours du temps t . Pour effectuer sa mesure, on utilise généralement un réservoir cylindrique de diamètre égal à D rempli d'eau qu'on laisse couler sur le sol à travers une membrane circulaire perforée de diamètre d . Si l_0 est la hauteur d'eau au début de l'opération et l_t la hauteur d'eau lue au temps spécifique t , alors la hauteur d'eau infiltrée dans le sol au temps t est : $L = l_t - l_0$,

Le volume d'eau V infiltré est :

$$V = \frac{L * \pi * D^2}{4} \quad (1.1)$$

La lame d'eau infiltrée ou l'infiltration cumulée est donc :

$$I = \frac{V * 4}{\pi d^2} \quad (1.2)$$

Dans certains cas, le réservoir ne dispose pas de membrane. Dans ce cas la lame d'eau infiltrée correspond à L .

L'infiltration de l'eau dans le sol peut se faire dans une direction verticale, horizontale ou axisymétrique (dans toutes les directions) (Fig.1.2). Sur cette figure, G désigne la zone du sol où les flux sont dominés par les effets gravitaires, CV est la zone du sol où les flux sont dominés par les effets de la capillarité verticale et CL est la zone du sol où les flux sont dominés par les effets de la capillarité latérale.

1.2.2.2. Flux d'infiltration

Le flux d'infiltration $q(t)$ à chaque instant t est donné par une simple dérivation de lame infiltrée $I(t)$ par rapport au temps t .

$$q(t) = \frac{dI(t)}{dt} \quad (1.3)$$

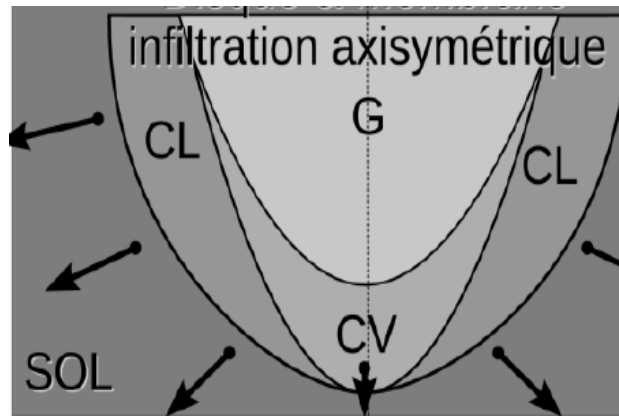


Fig.1.2 : Schéma représentant différentes composantes de l'infiltration.

1.2.2.3. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique notée $k(h)$, est l'un des paramètres décrivant la dynamique des mouvements de l'eau dans le sol. Elle est exprimée en fonction de la pression imposée au sol h (cm). Plusieurs formulations ont été proposées parmi lesquelles on trouve celle de Gardner 1958 [22]:

$$k(h) = k_s e^{(\alpha h)} \quad (1.4)$$

α est une constante caractéristique du sol et k_s la conductivité hydraulique à saturation qui reste à déterminer (voir paragraphe 1.4)

Le tableau (1.1) contient quelques valeurs de α utilisées dans la méthode de Van Genuchten

Type de sol	$\alpha(\text{cm}^{-1})$
Sable	0.145
Argile	0.008
Argile sableuse	0.027

Tableau.1.1 : Quelques valeurs de la constante α

1.2.2.4. Sorptivité

La sorptivité notée, s , représente la capacité d'un sol à absorber de l'eau. La formule de Philip proposée en 1969 est l'une des méthodes qui permettent son estimation [18]. Elle représente la pente à l'origine de la dérivée de lame infiltrée par rapport à la racine carrée du temps :

$$s = \lim_{t \rightarrow 0} \left(\frac{dl}{d\sqrt{t}} \right) \quad (1.5)$$

L'infiltration peut être mesurée in situ ou au laboratoire. Plusieurs auteurs ont étudié l'infiltration de l'eau dans le sol à partir des différents appareils de mesure.

1.3. Les différents appareils d'infiltromètres

1.3.1. Infiltromètre simple anneau ouvert ou appareil de Müntz (single ring method)

Cet appareil a été mis au point et utilisé au début du XX^e siècle par les agronomes Müntz et al. (1905) qui recherchaient une méthode simple, permettant d'obtenir des valeurs de l'infiltration, pour déterminer dans les projets d'aménagement agricole, le dimensionnement des raies d'irrigation et les débits à utiliser [30].

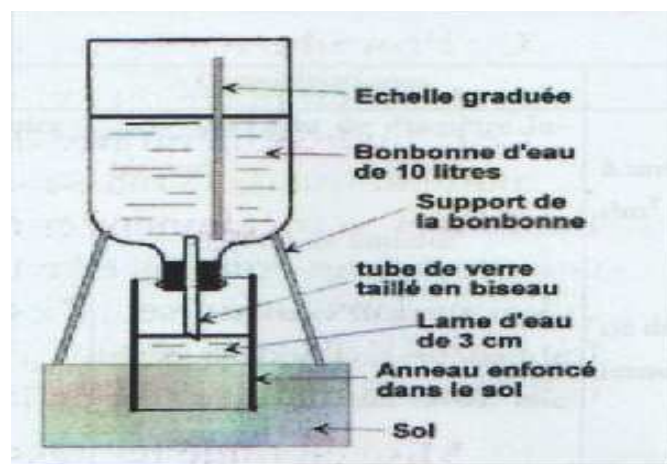


Fig.1.3 : Infiltromètre de Muntz

Le dispositif de Muntz classique illustré sur la figure (1.3) permet de maintenir sur une surface limitée une charge d'eau constante et d'assurer une infiltration horizontale de l'eau dans le sol. Il permet en outre la détermination des caractéristiques hydrauliques du sol comme la teneur volumique en eau (humidité) et la conductivité hydraulique $k(h)$ (voir paragraphe 1.4). Il comprend un cylindre de tôle d'acier à fin de renforcer la partie supérieure et de pouvoir enfoncer le cylindre en tapant avec une masse, un flacon ou bouteille de Mariotte, contenue 5 à 10 litres d'eau, un support réglable (trépied) pour maintenir le flacon au-dessus de l'anneau, un chronomètre et un réservoir d'eau pouvant contenir une dizaine de litres d'eau.

Notons qu'une bouteille de Mariotte est un réservoir permet de régler la pression d'eau dans le sol. Pour plus de détails, voir annexe A.

La mesure consiste à noter à tout instant le volume d'eau infiltré par lecture directe sur l'échelle graduée à l'aide d'un chronomètre. Lorsque le régime stable s'est établi (variation du volume en fonction du temps devenant constant), on arrête l'essai.

1.3.2. Infiltromètre double anneau ouvert

Cet infiltromètre est destiné à caractériser l'infiltration de l'eau dans le sol dans le cas d'un écoulement vertical. Il est composé de deux anneaux en tôle d'acier, de deux bidons d'alimentation et d'un ensemble de tuyauterie. Les deux anneaux sont disposés de façon concentrique sur le sol puis enfoncer d'une dizaine de centimètres environ. L'anneau

extérieur est appelé « anneau de garde » et a pour fonction de garantir une infiltration verticale dans l'anneau central.

Une fois la lame d'eau initiale versée, l'appoint d'eau (même niveau) dans les deux anneaux est réalisé manuellement par un opérateur, qui maintient le niveau constant au moyen d'un robinet. A chaque apport d'eau, l'opérateur note le temps écoulé et lame d'eau infiltrée par lecture à l'œil sur le réservoir d'alimentation de l'anneau interne (Fig.1.4).

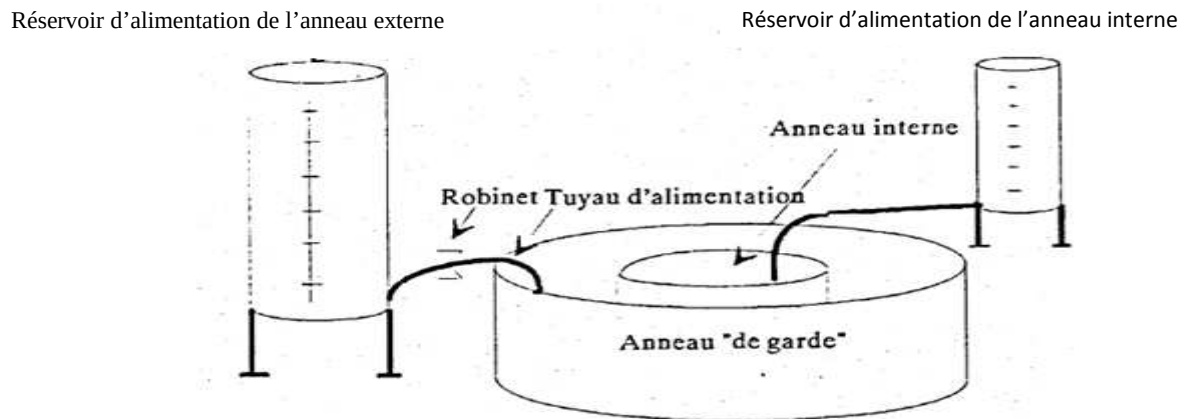


Fig.1.4: Représentation schématique d'un infiltromètre double anneau ouvert.

1.3.3. Infiltromètre double anneau automatisé

La durée de mesure de la conductivité dépend du type de sol. Or certains sols sont peu perméables comme par exemple un sol argileux, il faut alors prendre des intervalles de temps de mesure de 5 mn et plus. Dans le cas d'un sol dur, l'infiltration de l'eau est très faible et pour que le sol se sature il faut plusieurs heures voir plusieurs jours. L'opérateur doit rester sur le terrain plusieurs heures pour surveiller à l'œil l'évolution du niveau d'eau infiltré en fonction du temps (chronomètre).

Pour éviter cet inconvénient, Maheshwari a proposé en 1996 une solution illustrée sur la figure (1.5), qui consiste à relever d'une manière automatique le taux d'infiltration mesuré par un l'infiltromètre double anneau fermé.

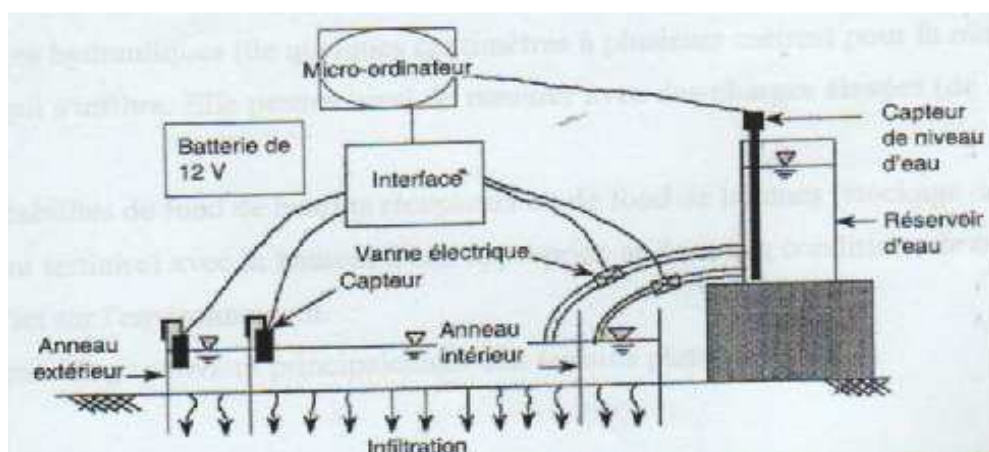


Fig.1.5 : Infiltromètre double anneau automatisé de Maheshwari(1996).

Ce système automatique est composé d'un infiltromètre double anneau, de 2 vannes électriques, de 3 capteurs de niveau, d'un réservoir d'eau, d'une interface (pour commander les deux vannes et le capteur de niveau d'eau) et un microordinateur.

1.3.4. Infiltromètre de Guelph

Cet appareil (Fig.1.6) a été mis au point à l'université de Guelph (Ontario, Canada), par Reynolds en 1985 dans le but de mesurer sur le terrain la conductivité hydraulique, la sorptivité, etc. [30].

Du point de vue de sa conception, c'est un appareil dont la charge est réglée, pour rester constante, par un vase de Mariotte (voir annexe). C'est un appareil léger, fabriqué en plastique transparent, peut être mise en œuvre facilement par un seul opérateur.

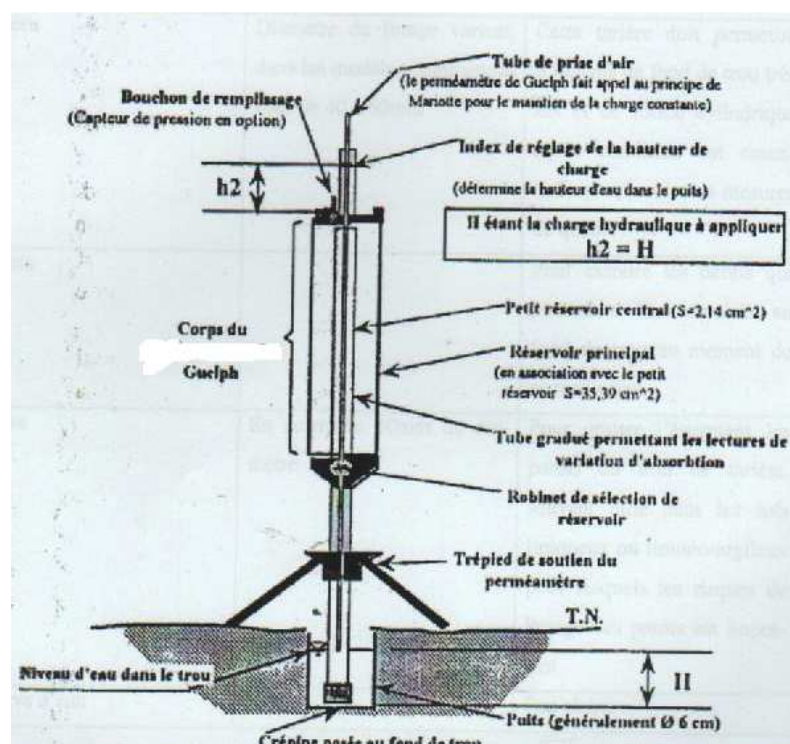


Fig.1.6: Infiltromètre de Guelph et sa représentation schématique détaillée

Cet appareil comprend divers éléments. La partie la plus importante est représentée par les réservoirs constitués de deux tubes transparents, un tube extérieur de diamètre de 4 à 6 cm et tube intérieur de diamètre de 1 à 3 cm. Ce dernier est gradué.

Ils sont rendus solidaires à leur base par une pièce en plastique qui fait office de vanne de contrôle à plusieurs voies :

- Une voie pour le réservoir interne (pour les sols nécessitant de faibles débits)
- Une voie orientant vers le réservoir externe (pour les débits moyens)
- Une voie rassemblant les deux réservoirs (pour les débits les plus forts)

Son principe de fonctionnement consiste en premier lieu à remplir les deux réservoirs d'eau et à mettre l'appareil en place au dessus d'un trou. Après l'établissement d'une charge

hydraulique dans le trou, on mesure l'écoulement de l'eau en notant à l'œil nu l'évolution du niveau de l'eau dans le réservoir (la lecture est facilitée par des graduations), en fonction du temps (utilisation d'un chronomètre). Après chaque mesure on doit vérifier le rapport volume/intervalle de temps représentant la vitesse de la descente de l'eau. Lorsque ce rapport devient stable, on arrête la mesure.

1.3.5. Infiltromètre minidisque

Cet appareil (Fig.1.7), développé par Zangh en 1997, est un outil adapté à la mesure de la conductivité hydraulique des sols au voisinage de la saturation pour des pressions en colonne d'eau comprises entre -7 cm et -0.5 cm. Il est simple, léger et facile à mettre en œuvre et ne nécessite que de petites quantités d'eau.

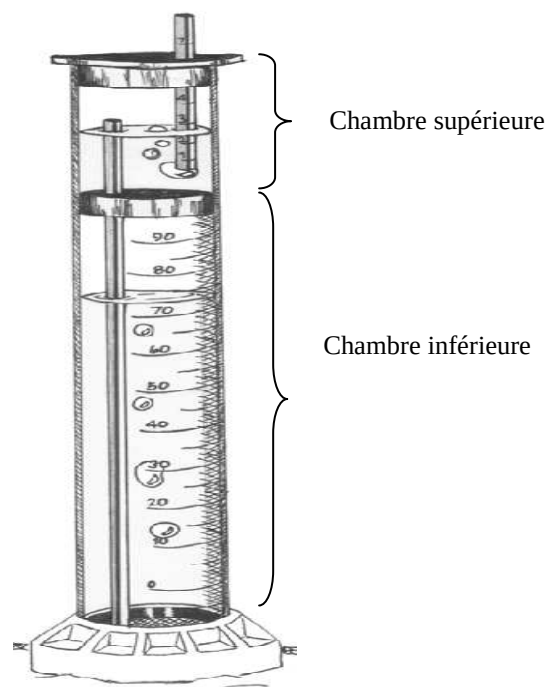


Fig.1.7: Infiltromètre minidisque

Il comprend une embase circulaire qui est un disque, une chambre inférieure constituée du réservoir d'eau dans lequel plonge le tube de Mariotte qui communique avec la chambre supérieure. Et une chambre supérieure qui est limitée par un stoppeur en sa partie supérieure et par un caoutchouc étanche en sa partie inférieure.

Après avoir préparé la surface du sol et l'infiltromètre, on note le niveau initial de l'eau. Ensuite, on met en contact l'infiltromètre avec la surface du sol à $t=t_0$ et on déclenche le chronomètre dès cet instant. On note le volume d'eau dans l'infiltromètre par lecture directe sur la graduation du réservoir d'alimentation à différents instants.

1.3.6. Infiltromètre à double disque

Cet infiltromètre est utilisé sur le terrain pour la détermination des propriétés hydrauliques des sols non saturés. La situation déportée de la membrane par rapport au corps principale du système permet d'apporter une stabilité meilleure à l'ensemble de l'appareil.

Il est représenté sur la figure (1.8) et se compose d'une embase circulaire mise en contact avec le sol, surmontée de deux réservoirs qui se connectent par un tube de liaison. La mesure se fait selon la même procédure que dans le cas de l'infiltromètre mini disque.



Fig.1.8 : Infiltromètre à double disque

1.3.7. Infiltromètre à disque

L'infiltromètre à disque est un appareil couramment utilisé pour la mesure de l'infiltration. Il est l'objet de notre étude à cause de sa disponibilité..

1.3.7.1 Historique de l'infiltromètre à disque :

L'infiltromètre à disque a connu rapidement de nombreuses applications : La mesure de la conductivité hydraulique des croutes de sol [18].

Les premiers essais d'infiltration axisymétrique sont dus à Clothier et White(1981). Peu de temps après, Perroux et White (1988) proposaient un prototype de l'infiltromètre à disques tel qu'utilisé à l'heure actuelle, au développement duquel l'école australienne de physique du sol a largement contribué (White et al . 1992). A l'origine, l'estimation de la conductivité du sol reposait sur l'exploitation de mesures de sorptivité et de teneur en eau volumique avant et après infiltration (White et Perroux, 1989). Parallèlement à la mise au point de l'infiltromètre, la théorie de l'infiltration de l'eau dans le sol elle est aussi développée.

L'utilisation de la solution de Wooding (1968) du problème du calcul du flux d'infiltration axisymétrique en régime quasi-permanent a permis la mise au point des méthodes multidisques (Smettem et Clothier, 1989) et multi potentiels (Ankeny et al., 1991 ; Reynolds et Elrick, 1991) d'estimation de la conductivité hydraulique à l'aide de l'infiltromètre, [16].

Plus récemment Haverkamp et al. (1994) ont développé une solution applicable au régime transitoire d'infiltration. Enfin, Simunek et Van Genuchten (1996, 1997) ont proposé d'estimer la conductivité hydraulique du sol à partir des mesures infiltrométriques par une procédure d'inversion numérique indirecte.

1.3.7.2. Description de l'appareil

La plupart des infiltromètres à disque se composent d'une embase circulaire (disque D), mise en contact avec la surface du sol à travers une membrane (D), surmontée d'un réservoir d'alimentation (RA) et d'un vase de Mariotte (VM), permettant de régler le potentiel de l'eau au niveau de la surface du sol (Fig.1.9 et (1.10)). Les divers modèles actuellement répandus se différencient essentiellement par le type de matériau utilisé pour le contact avec le sol (membrane poreuse ou plaque céramique).

Pour que l'eau quitte l'infiltromètre et s'infilte dans le sol, il doit être remplacé dans le réservoir d'alimentation par un volume identique d'air. Cet air transite à travers le vase de Mariotte par le tube A à la pression atmosphérique. Les bulles d'air formées à la base du tube A remontent dans le vase de Mariotte et rejoignent le volume d'air contenu dans celui-ci.

La charge hydrostatique h_1 existant entre la base du tube (A) et la surface de l'eau contenue dans la vase de Mariotte est à une pression $P_{air\ VM}$ inférieure à la pression atmosphérique P_{atm} .

$$P_{air\ VM} = P_{atm} - \rho_w h_1 g \quad (1.6)$$

Où ρ_w est la masse volumique de l'eau et g accélération de la pesanteur.

Lors de l'infiltration de l'eau, l'air quitte le vase de Mariotte par le tube (B) à la pression $P_{air\ VM}$ pour rejoindre le réservoir d'alimentation. On en déduit la pression de l'eau P_0 à la sortie du disque de l'infiltromètre.

$$P_0 = P_{air\ VM} + \rho_w h_2 g = P_{atm} + \rho_w (h_1 - h_2) g \quad (1.7)$$

Si on exprime les pressions en unité de hauteur de colonne d'eau, le potentiel de l'eau h_0 à la sortie de l'infiltromètre est :

$$h_0 = h_2 - h_1 \quad (1.8)$$

La hauteur h_2 est déterminée en remontant le tube (A) jusqu'à ce que l'eau coule à travers la membrane alors $h_0 = 0$ et $h_1 = h_2$

Le tube est alors abaissé de la distance correspondant au potentiel h_0 désiré.

Pour assurer un parfait contact entre la membrane et le sol, on dispose une couche de sable fin entre les deux. La taille des grains est choisie de telle sorte que la sorptivité du sable soit importante (ainsi le sable se sature rapidement) (Fig.1.11).

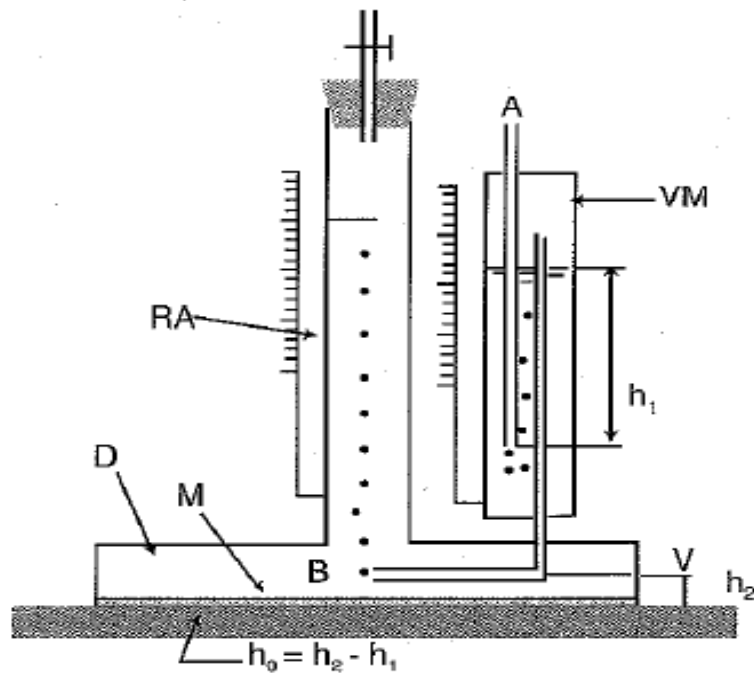


Fig.1.9: Schéma de l'infiltromètre à disque

RA : réservoir d'alimentation en eau, VM : vase de Mariotte,
D : disque, M : membrane, A : tube d'aération du vase de Mariotte,
B : tube d'aération du réservoir d'alimentation



Fig.1.11 : Etat avant et après préparation de la surface de sol



Fig.1.10:Infiltromètre à disque sur le terrain

1.3.7.3. Avantages de l'infiltromètre à disque

L'infiltromètre à disque est un appareil léger et facilement transportable. La mesure de l'infiltration à l'aide de cet appareil est simple, rapide et nécessite qu'une petite quantité d'eau. Il peut être également utilisé pour mesurer la sorptivité et le potentiel d'écoulement. Il peut être même utilisé lorsque le sol présente une fissuration importante. En outre, il permet de différencier la part qui s'infiltre dans la microporosité et celle qui passe dans la macroporosité.

1.4. Théorie de l'infiltration axisymétrique

Pour calculer les caractéristiques hydrauliques du sol non saturé, on exploite souvent les résultats de mesures obtenues lors de l'expérimentation avec l'appareil de l'infiltromètre à disque dans la théorie de l'infiltration axisymétrique.

1.4.1. Méthode en régime permanent [22]**1.4.1.1 Formule de Wooding**

Wooding (1968) à établi une formulation simple permettant d'exprimer le flux d'infiltration en régime permanent à la surface du sol comme suit :

$$q_{\infty}(h_0) = k(h_0) + \frac{4Q(h_0)}{\pi r} \quad (1.9)$$

r représente le rayon du disque de l'infiltromètre, h_0 le potentiel où bien la pression exercée à la surface du sol par l'infiltromètre, $k(h_0)$ la conductivité hydraulique du sol au potentiel h_0 et $Q(h_0)$ le potentiel d'écoulement, qui est défini par Gardner en 1958 comme l'intégrale de la conductivité hydraulique par rapport au potentiel entre le potentiel initial et le potentiel final.

$$Q(h_0) = \int_{h_i}^{h_0} k(h) dh \quad (1.10)$$

L'équation (1.10) est soumise à des conditions d'application :

- 1- le sol est un milieu semi infini, homogène et isotrope.
- 2- le potentiel initial h_i est constant dans tout le sol tel que $k(h_i) \ll k(h_0)$.
- 3- la relation $k(h)$ est de type exponentiel :

$$K(h) = k_s e^{(\alpha h)} \quad (1.11)$$

k_s est la conductivité hydraulique à saturation et α une constante caractéristique du sol.

Cette dernière permet de linéariser l'équation d'infiltration en simplifiant l'expression du potentiel d'écoulement :

$$Q(h_0) = \frac{k(h_0) - k(h_i)}{\alpha} \quad (1.12)$$

Si $k(h_i)$ est négligeable devant $k(h_0)$ (hypothèse (2)), on obtient :

$$Q(h_0) = \frac{k(h_0)}{\alpha} \quad (1.13)$$

L'équation (1.10) de Wooding se simplifie alors en :

$$q_{\infty}(h_0) = k_s e^{(\alpha h_0)} \left[1 + \frac{4}{r\pi\alpha} \right] \quad (1.14)$$

Cette relation montre que pour un potentiel donné, le flux d'infiltration dépend de la conductivité hydraulique à saturation k_s , du potentiel imposé au sol h_0 , du rayon du disque r de l'infiltromètre et de la constante caractéristique du sol α .

Cette formule est valable à partir du moment où le régime permanent est atteint, c'est-à-dire le temps à partir duquel la surface du sol atteint la saturation, ou bien à partir duquel la conductivité hydraulique et la sorptivité tends vers zéro. Vandervaere a proposé en 1995 un

temps caractéristique qui définit le temps d'apparition du régime permanent (stabilité) et qui est donné par :

$$T_{STAB} = \left[\frac{S_{(\theta_0, \theta_i)}}{k(h_0) + \frac{4bS_{(\theta_0, \theta_i)}}{\pi r(\theta_0, \theta_i)}} \right]^2 \quad (1.15)$$

1.4.1.2. Méthode mono-potentielle

La méthode mono-potentielle permet de calculer la conductivité du sol en estimant la sorptivité S à partir du potentiel d'écoulement Q et du flux du régime permanent q_∞ [18]

$$Q(h_0) = \frac{bS^2}{(\Delta\theta)_0} \quad (1.16)$$

$$q_\infty(h_0) = k(h_0) + \frac{4Q}{\pi r} \quad (1.17)$$

b est généralement prise égal 0.55 [18], r est le rayon du disque de l'infiltromètre et

$(\Delta\theta)_0 = \theta_0 - \theta_i$, la teneur volumique en eau du sol avant et après essai (humidité).

La sorptivité S se déduit du comportement à l'origine de la cinétique d'infiltration cumulée :

$$I(t) = \int q(t)dt \quad (1.18)$$

En effet, pour t proche de 0, on a (Philip, 1969 ; Smettem et al., 1995) :

$$I(t) = S(\theta_0, \theta_i) \sqrt{t} \quad (1.19)$$

La figure (1.12 A et B) illustre la façon dont on obtient la sorptivité $S(\theta_0, \theta_i)$ (Fig.1.12A) et le flux en régime permanent (Fig.1.12B) par régression sur les parties initiale et finale de la cinétique d'infiltration en fonction de $\sqrt{t}$ et de t , respectivement. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne fait intervenir qu'une mesure à un seul potentiel. Elle est cependant sensible à l'estimation de $S(\theta_0, \theta_i)$ et aux erreurs de mesure sur θ .

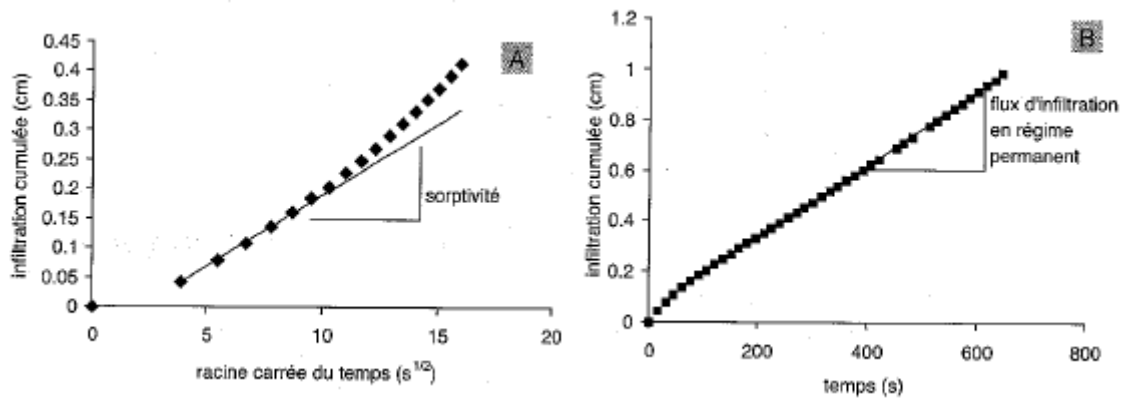


Fig.1.12 : Détermination de la sorptivité

1.4.1.3. Méthode multi-potentiels

Le flux d'infiltration $q_{\infty}(h_0)$ défini par Wooding (voir relation 1.15) dépend du rayon de disque r et du potentiel d'infiltration h_0 donnée.

La conductivité hydraulique à saturation k_s ainsi que le paramètre α peuvent être déterminés en utilisant deux mesures de $q_{\infty}(h_0)$ réalisées au même endroit avec deux valeurs différentes de h_0 [35]

Le logarithmique de la relation (1.15) s'écrit :

$$\ln q_{\infty}(h_0) = \ln k_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right) + \alpha h_0 \quad (1.20)$$

Si l'on représente $\ln q_{\infty}(h_0)$ en fonction de h_0 , α est alors la pente de la droite passant par les deux points et k_s se déduit de l'ordonnée à l'origine. Ainsi on dispose de plus de deux couples de mesure $(\ln q_{\infty}(h_0), h_0)$, ce qui permet d'estimer α et k_s par une régression linéaire.

Le problème de cette méthode est que, dans la réalité la linéarité de l'équation est rarement vérifiée : α n'est pas constant mais dépend de h_0 . Reynolds et Elrick(1991) proposent alors de définir $k(h)$ comme une fonction exponentielle par morceau (Fig.1.13). Ils considèrent α constant (α_{jk}) sur l'intervalle $[h_j, h_k]$ du potentiel d'infiltration h_0 . Pour chaque paire de couples $(q_{\infty}(h_j), h_j)$ et $(q_{\infty}(h_k), h_k)$, le calcul α_{jk} et k_{jk} est effectué en résolvant le système de équations linéaires suivant :

$$\begin{cases} \ln(q_{\infty}(h_j)) = \ln(k_{jk} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right)) + \alpha_{jk} h_j \\ \ln(q_{\infty}(h_k)) = \ln(k_{jk} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right)) + \alpha_{jk} h_k \end{cases} \quad (1.21)$$

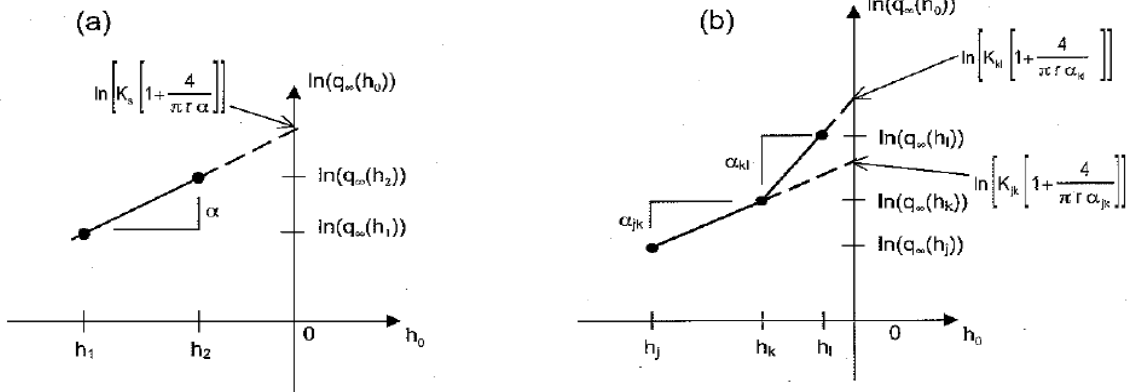


Fig.1.13: Principe de calcul des paramètres α et k_s , (a) à partir de deux couples de mesures, (b) à partir de trois couples de mesures

Cependant, k_{jk} n'a pas de sens physique que si $h_k = 0$. Il ressort alors $k_{jk} = k_s$.

Akney et al en proposent en 1991 de calculer pour chaque valeur de h_k une conductivité moyenne entre les estimations à « gauche » ($k_g(h_k) = k_{jk} e^{(\alpha_{jk} h_k)}$) et à « droite » ($k_d(h_k) = k_{kl} e^{(\alpha_{kl} h_k)}$). Cette stratégie implique 3 mesures de flux d'infiltration en régime permanent aux potentiels successifs croissants h_j , h_k et h_l pour une estimation de k au potentiel h_k

1.4.2 Méthode basée sur le régime transitoire [16]

1.4.2.1 Méthode de Haverkamp

En 1994, Haverkamp et al. ont proposé une solution au calcul du flux d'infiltration axisymétrique en régime transitoire. La hauteur $I(t)$ d'eau infiltrée en fonction du temps est :

$$I(t) = C_1 \sqrt{t} + C_2 t \quad (1.22)$$

avec $C_1 = S_{(\theta_{ini}, \theta_0)}$ et $C_2 = \frac{2-\beta}{3} \cdot k_{h_0} + \frac{\gamma S_{(\theta_{ini}, \theta_0)}^2}{r \cdot (\theta_0 - \theta_{ini})}$

θ_{ini} et θ_0 sont les teneurs en eau initial et final du sol, $S_{(\theta_{ini}, \theta_0)}$ est la sorptivité du sol entre θ_{ini} et θ_0 , β est une constante fixée à 0.6 d'après [18], γ est une constante donnée par $\frac{4b}{\pi}$ (pour $b=0.55$, $\gamma = 0.7$) et r est le rayon du disque de l'infiltromètre

L'équation (1.21) doit être linéarisée de manière à permettre une estimation graphique des paramètres C_1 et C_2 par une simple régression linéaire. Vandervaere (1995) propose une "linéarisation différentielle" de l'équation en dérivant l'infiltration par la racine carrée du temps, afin de déterminer $S_{(\theta_{ini}, \theta_0)}$ et C_2 graphiquement à partir de l'équation suivante :

$$\frac{\partial I}{\partial \sqrt{t}} = C_1 + 2C_2 \sqrt{t} \quad (1.23)$$

En ajustant $\frac{\partial I}{\partial \sqrt{t}}$ à une droite (Fig.1.14A), le paramètre C_1 est donné par l'ordonnée à l'origine, alors que le paramètre C_2 est donné par la pente de la droite.

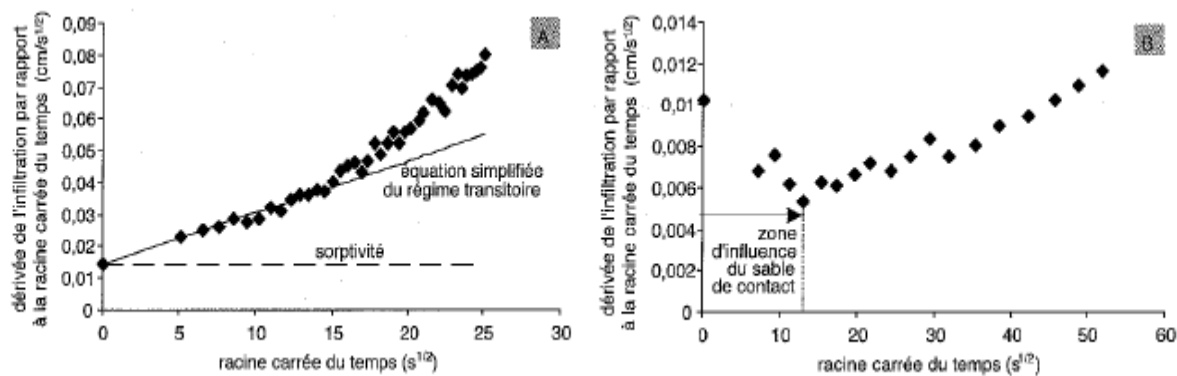


Fig.1.14 : Principe d'estimation des paramètres C_1 et C_2

1.5. Infiltromètre simple anneau associé à un système de vision

Afin de mesurer l'infiltration d'une manière automatique Abriak et al. [23] ont présenté une approche expérimentale en laboratoire basée sur un système de vision.

L'infiltration est réalisée à partir d'un demi-anneau collé contre l'une des parois en plexiglas d'un bac contenant le sol à étudier. L'écoulement est remarqué à l'aide de fluorescéine du sodium dissoute dans l'eau, un filtre bleu est utilisé en condition d'éclairage et un filtre orange pour la prise d'images afin de faciliter l'extraction des zones humidifiées.

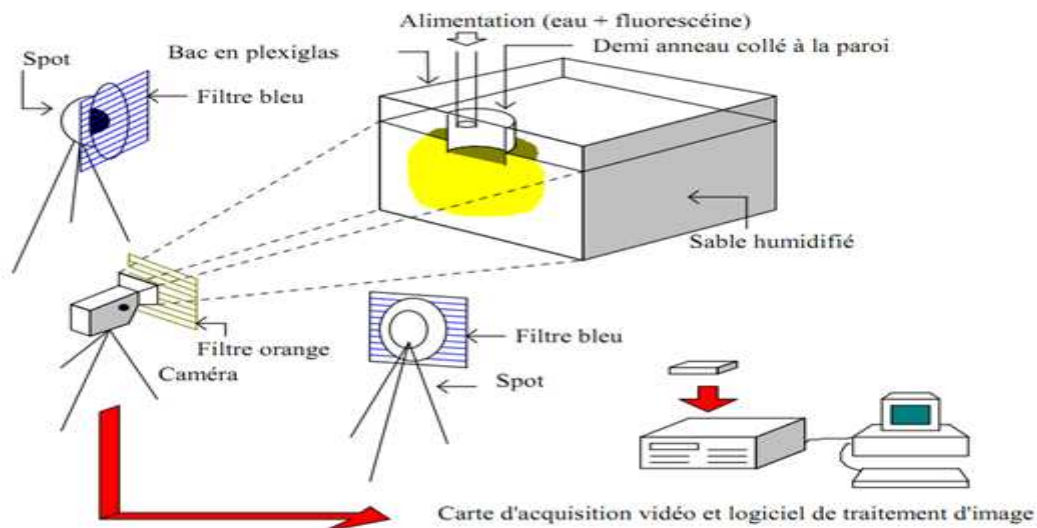


Fig.1.15 : Dispositif expérimental général

L'infiltration est filmée à l'aide d'une camera couleur. Un logiciel permet de définir la position du front d'humectation visualisé et de suivre à tout instant son évolution durant la phase d'infiltration. La figure (1.16) montre quelques images en niveaux de gris des zones humidifiées.

L'analyse des images est basée sur des outils de la morphologie mathématique binaire (voir chapitre 2). Elle consiste principalement à détecter les contours des taches représentant la zone humide en appliquant une opération d'ouverture suivie d'une opération d'amincissement avec un élément structurant de taille (3x3) de l'image binaire obtenue par seuillage de l'image originale. Le centre de gravité de la tache est ensuite déterminé (Fig.1.17)

Les volumes d'eau infiltrés V_c sont alors calculés par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$V_c = \pi X_G A(N - \theta_i) \quad (1.24)$$

A représente l'intersection du volume avec l'axe de révolution, X_G est le centre de gravité selon X de la tache humide, N est le nombre de points (en pixels) du contour de la tache et θ_i est la teneur en eau volumique initial.

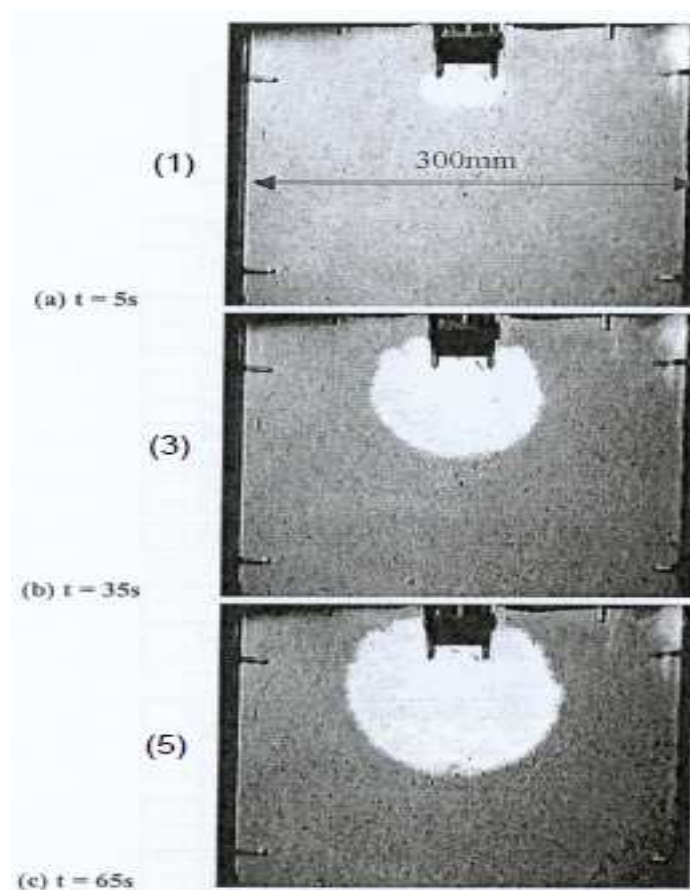


Fig.1.16 : Visualisation de l'infiltration à différents instants.

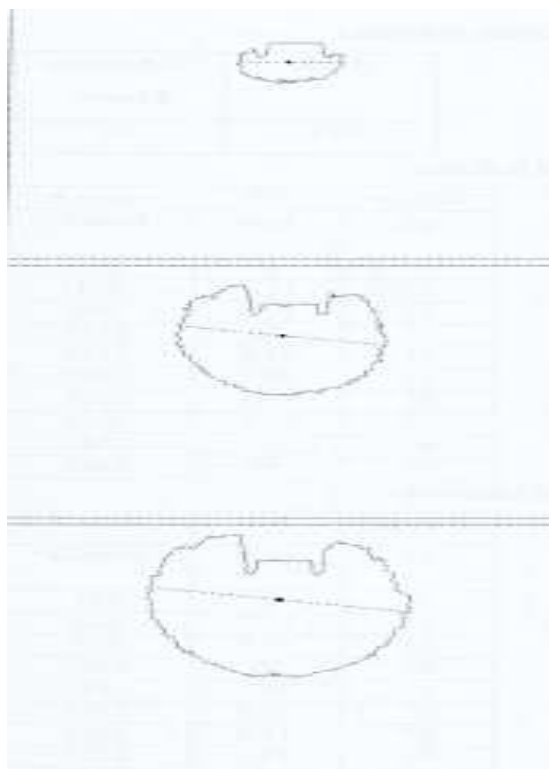


Fig.1.17: Détermination du contour, du centre de gravité et de la droite des moments de la tache infiltrée

La figure (1.18) montre quelques valeurs mesurées de ces volumes [23]

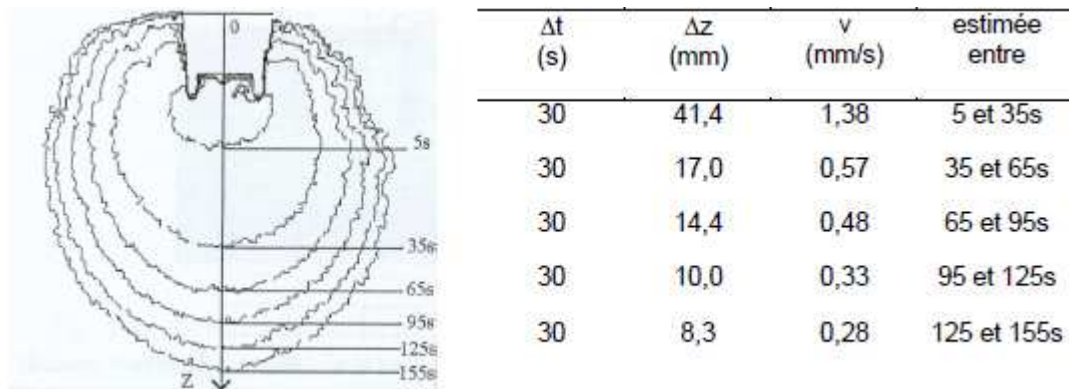


Fig.1.18 : Visualisation et détermination des cinétiques d'avancement du front au cours de l'infiltration

Malgré que cette méthode est non invasive, elle reste néanmoins utilisable qu'en laboratoire.

1.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques notions sur la théorie d'infiltration ainsi qu'un certain nombre d'appareils d'infiltromètres. L'infiltromètre à disque a été particulièrement détaillé. Il a été choisi dans notre travail à cause de sa disponibilité au laboratoire d'agronomie de l'UMMTO. Pour calculer les caractéristiques hydrauliques du sol non saturé, on exploite les résultats de mesures obtenues lors de l'expérimentation avec ces appareils dans la théorie de l'infiltration axisymétrique.

La mesure de l'infiltration s'effectue dans la plus part des cas appareils par une lecture visuelle du niveau d'eau dans le réservoir d'alimentation, sauf dans le cas du dispositif double anneaux automatisé de Maheshwari et celui d'Abriak et al. dont la lecture de niveau d'infiltration se fait d'une manière automatique.

2.1-Introduction

Nous avons vu au chapitre précédent que la mesure de l'infiltration par un infiltromètre à disque se résume à la lecture du niveau d'eau dans le réservoir principal à des instants réguliers.

Cette lecture qui s'effectue en général par un ou deux opérateurs à l'œil nu, est très fastidieuse et sujette à des erreurs car elle peut durer des heures voir des semaines (cas des sols dur).

Le but de notre travail est de proposer un système automatique de lecture de niveau dans l'infiltromètre à disque. Pour cela, nous allons passer en revue dans ce chapitre les différentes méthodes de mesure de niveau. Le choix de l'une de ces méthodes et la description des outils qui lui sont associés seront également détaillés.

2.2- Techniques de mesure de niveau

Une mesure fréquemment utilisée en milieu industriel est la mesure de niveau des matériaux qu'ils soient solides, liquides, ou gazeux. Les méthodes de mesure de niveau sont classées en deux classes :

La première classe utilise des capteurs de mesure industrielle, parmi lesquels on distingue :

- Les méthodes hydrostatiques
- Les méthodes électriques
- Les méthodes par rayonnement

La deuxième classe utilise des capteurs optiques (caméra). La mesure est donc effectuée via un système de vision artificielle.

Le choix d'une méthode de mesure doit prendre en compte plusieurs critères comme la nature de produit (solide, liquide, gazeux), l'étanchéité du réservoir, la possibilité donnée au capteur d'être en contact ou non avec le produit dont on mesure le niveau, l'étendu du niveau, la précision, etc.

2.2.1-Capteurs industriels

La mesure de niveau de liquides, de poudres de granularité plus ou moins grossière, gazeux, est indispensable dans le cas de stockage dans de cuves, silos, rivières, réservoirs. La diversité des sites pour lesquels un capteur de niveau est nécessaire conduit à plusieurs types de techniques de mesures faisant appel aux fondamentaux de la physique.

On peut classer ces techniques en trois méthodes de mesures : hydrostatiques, électrique et par rayonnement [19].

2.2.1.1. Méthode hydrostatique

Cette méthode utilise des capteurs simples parmi lesquels on distingue le flotteur, le plongeur, le capteur de pression.

a- Le flotteur

La loi d'Archimède stipule que tout corps partiellement ou complètement plongé dans un liquide reçoit, de la part de ce fluide, une poussée verticale orientée de bas en haut et dont l'intensité est égale au poids du fluide déplacé, ce que l'on peut traduire par :

$$F_{AR} = \rho g V \quad (2.1)$$

Où F_{AR} est la force d'Archimède, ρ est la masse volumique du liquide, g est l'accélération de la pesanteur, soit 9.81 m/s^2 et V le volume de la fraction du corps qui est immergé (où le volume de liquide déplacé).

C'est le phénomène qui est exploité dans les flotteurs. Lorsque le flotteur effectue la mesure de niveau, il devrait être inséré dans un puits de tranquillisation pour éviter qu'il soit soumis à l'agitation du liquide dans le réservoir. Cela assure aussi que le lien entre le flotteur et le conditionneur du signal de mesure soit le plus vertical que possible.

Le poids du capteur est une caractéristique importante qui détermine la précision de la mesure et ne doit pas varier. De ce fait, il n'est pas destiné aux liquides visqueux qui risquent de l'alourdir et de fausser la mesure. Sa gamme de mesure s'étend de 10 mm à une trentaine de mètres avec une précision de 0,5% à 5% [19].

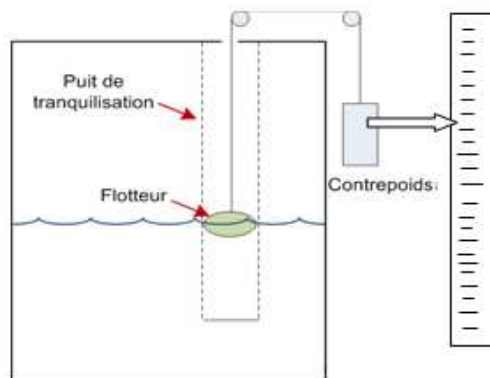


Fig.2.1 : Mesure de niveau par flotteur

b- Le plongeur

La mesure de niveau avec un plongeur (Fig.2.2) repose sur la mesure de son poids apparent, car celui-ci varie en fonction de la longueur immergée du plongeur. Contrairement au flotteur qui se déplace avec le fluide, le plongeur est une installation fixe. Il est constitué d'un tube de longueur égale à la hauteur maximal du liquide dans le réservoir. Ce tube subit la

poussée d'Archimède, il est suspendu à un capteur de force qui mesure le poids apparent dépendant de son niveau d'immersion dans le liquide.

Pour montrer comment le niveau est mesuré avec un plongeur, analysons les forces qu'il subit. Le plongeur est attiré vers le bas par la gravité, créant une force de gravité :

$$F_{P1} = mg \quad (2.2)$$

m est la masse du plongeur et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur. La fraction immergée du plongeur est soumise à la force d'Archimède F_{AR}

$$F_{AR} = \rho Ahg \quad (2.3)$$

A étant la section du plongeur, h la longueur immergée et ρ la masse volumique du liquide.

Le poids apparent qui en résulte est représenté par la force F_{APP} :

$$F_{APP} = F_{P1} - F_{AR} = mg - \rho Ahg$$

De la mesure de la masse apparente F_{APP} mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de force, on peut déduire la longueur immergée h du plongeur

$$h = \frac{mg - F_{APP}}{\rho Ag} \quad (2.4)$$

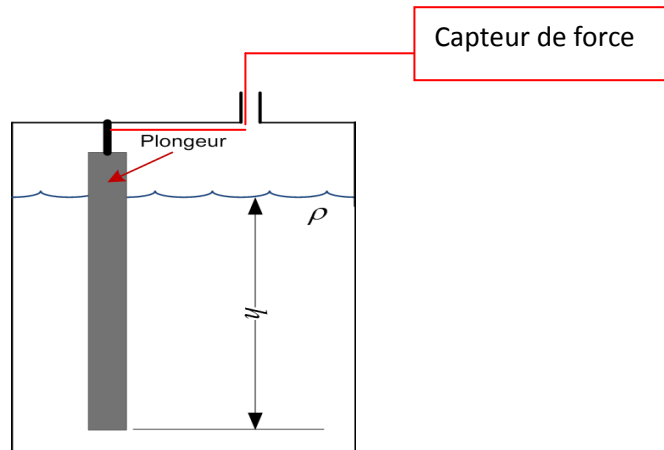


Fig.2.2 : mesure de niveau par plongeur

Le plongeur est utilisé pour mesurer des hauteurs faibles comprises entre 30 cm et 6 m environ avec une précision de 0,5% [19].

c- Le palpeur

Le palpeur (Fig.2.3) est un instrument dont le principe de fonctionnement est fort simple. Il s'apparente à celui utilisé anciennement par les marins pour déterminer la profondeur des eaux dans lequel leur navire circulait. En attachant un poids au bout d'une corde et en la descendant dans l'eau, le marin pouvait déterminer la profondeur en mesurant la longueur de la corde nécessaire au poids de toucher le fond.

Le principe est le même car un poids est descendu jusqu'à ce que l'on touche le produit, puis on mesure la longueur du câble déroulé. Cette mesure n'est pas continue comme le serait la mesure avec un flotteur.



Fig.2.3 : Le palpeur

Ce type de capteur peut être utilisé pour mesurer le niveau d'un liquide ou d'un solide. Il possède une grande plage de mesure (70m) et une très bonne précision ($\pm 1\text{cm}$).

d- Le capteur de pression

Lorsqu'un réservoir est rempli de liquide, les parois du réservoir à une profondeur h sous la surface du liquide subissent une pression hydrostatique P_{hydro} que l'on calcule comme suit :

$$P_{hydro} = \rho gh \quad (2.5)$$

Avec ρ la masse volumique du liquide et $g=9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur.

Le capteur de pression peut être utilisé de deux manières différentes selon que le réservoir est étanche ou non.

Réservoir non étanche

Lorsque le réservoir n'est pas étanche (Fig.2.4), on utilise un capteur de pression relative, car la pression subie par le capteur de pression est la somme de la pression atmosphérique poussant sur la surface du liquide P_{Atm} et la pression hydrostatique P_{hydro}

$$P = P_{hydro} + P_{Atm} \quad (2.6)$$

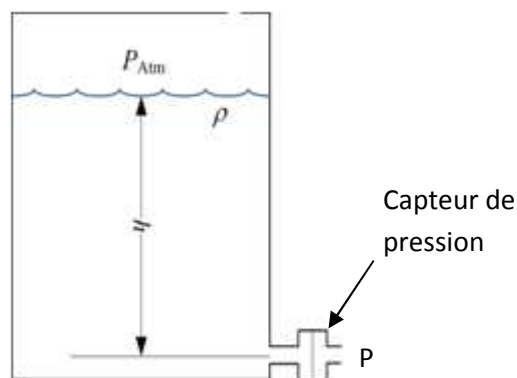


Fig.2.4: Mesure de niveau dans un réservoir non étanche avec capteur de pression

Le signal de sortie du capteur est donc directement proportionnel à la pression hydrostatique qui est elle-même proportionnelle à la hauteur h .

Réservoir étanche

Dans le cas où le réservoir est étanche (Fig.2.5), la pression du gaz cumulée entre la surface du liquide et le haut du réservoir exerce une pression P_{gaz} différente de la pression atmosphérique.

Dans ce cas, pour mesurer le niveau, il faudra utiliser un capteur de pression différentielle. Une des entrées du capteur de pression subira la pression $P_{\text{hydro}} + P_{\text{gaz}}$ et il faudrait avoir sur l'autre entrée P_{gaz} pour que le signal de sortie soit proportionnel à P_{hydro} donc à h . Si le gaz au dessus du liquide est difficilement condensable, on peut utiliser l'approche de la colonne sèche. Il suffit de connecter l'entrée haute pression du capteur de pression différentielle au bas du réservoir, qui subira la pression $P_{\text{hydro}} + P_{\text{gaz}}$ et le côté basse pression par une conduite allant au haut du réservoir pour être soumis à la pression P_{gaz} . On parle alors d'une mesure avec une colonne sèche.

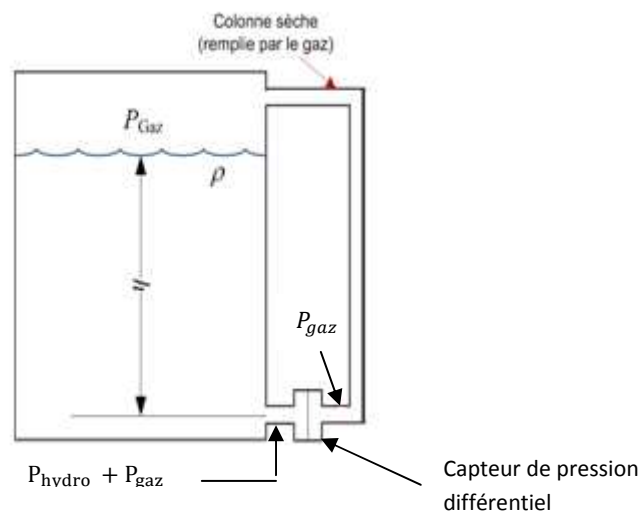


Fig.2.5 : Mesure de niveau d'un réservoir étanche avec capteur de Pression (gaz non-condensable) avec Colonne sèche

Si le gaz est facilement condensable, l'utilisation de la colonne sèche n'est pas appropriée, car celle-ci se remplira de liquide en raison de la condensation du gaz. Dans ce cas, il faut utiliser l'approche de mesure avec une colonne mouillée (Fig.2.6)

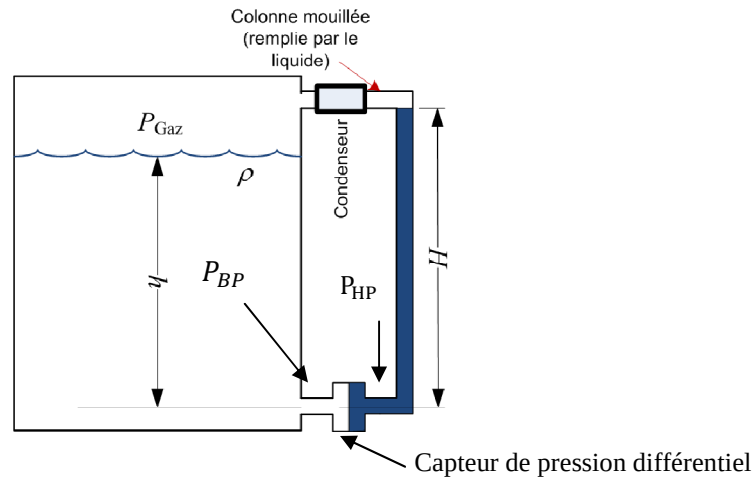


Fig.2.6 : Mesure de niveau d'un réservoir étanche avec capteur de pression (gaz condensable) avec colonne mouillée

On branche alors le côté basse pression du capteur de pression différentielle au réservoir et le côté haute pression à la colonne mouillée qui sera branchée au haut du réservoir.

La colonne mouillée étant remplie de liquide (en raison de sa condensation) et la pression subie du côté haute pression sera :

$$P_{HP} = \rho gH + P_{gaz} \quad (2.7)$$

H est la hauteur du liquide dans la colonne mouillée. On s'assurera qu'elle reste toujours pleine (par exemple en installant un condensateur) afin que son trop plein se vide dans le réservoir.

La différence de pression fournie par le capteur différentiel est $\Delta P = P_{HP} - P_{BP}$ est :

$$\Delta P = P_{HP} - P_{BP} = \rho gH + P_{gaz} - (\rho gh + P_{gaz}) = \rho g(H - h) \quad (2.8)$$

Le signal de sortie du capteur de pression est donc proportionnel à la différence de hauteur de liquide entre la colonne mouillée et le réservoir.

Le capteur de pression s'adapte très facilement à la mesure de niveau. Placé au fond du réservoir, il donne une valeur de la pression relative, qui est une fonction de la hauteur du liquide. Lorsque ce réservoir est ouvert (contact avec l'atmosphère) ou fermée, il peut, grâce à la mesure à la fois de la pression dans le réservoir au-dessus du liquide et de la pression au fond de celui-ci, de donner une valeur différentielle puis déduire la hauteur du liquide. La caractéristique essentielle de ce type de capteur est d'être utilisable pour un grand nombre de liquides : visqueux, corrosifs, chargés, inflammable. Mais, il faut tenir compte de la densité des liquides pour donner une valeur correcte de la hauteur. Ce capteur offre une gamme de températures ambiantes importante de -20°C à $+80^{\circ}\text{C}$ et peut également être utilisé à des températures supérieures à 120°C . La gamme de mesure est donnée en unité de pression de 0 à 25 mbar et jusqu'à 25 bars. La précision atteinte est comprise entre 0,5 et 1%.

2.2.1.2- Méthodes électriques

Ce type de méthodes exploite des capteurs électriques dont ces propriétés électriques (conductance, capacité, ...) varient en fonction du produit dont on veut mesurer le niveau. Les capteurs utilisant les propriétés électriques des liquides sont d'électrodes mesurant la conductance des produits conducteurs ou la capacité des produits diélectriques, liquides, pâtes, matériaux granuleux.

a- La sonde conductrice

Lorsque le liquide entre en contact avec deux électrodes, il ferme le circuit électrique qui alimente les électrodes qui agisse ainsi comme un commutateur. Ce principe est utilisé par une sonde constituée d'une électrode dit intérieure et de plusieurs électrodes extérieures formant un ou plusieurs commutateurs capable de détecter divers niveaux dans un réservoir (Fig.2.7).

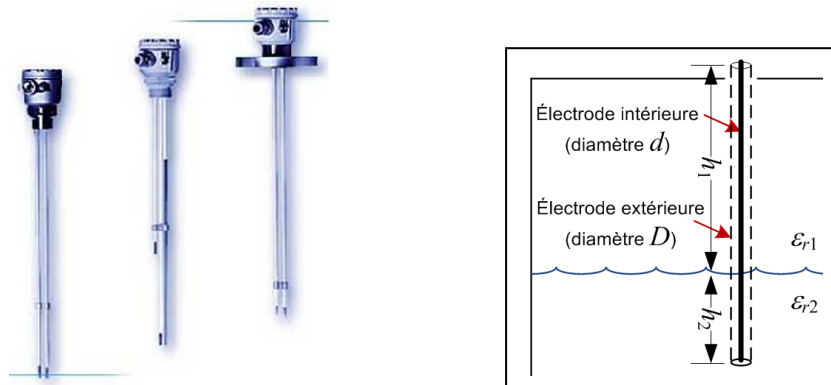


Fig.2.7 : détection de niveau avec des sondes conductrice

Le capteur mesurant la conductance ne permet que de détecter un niveau haut, bas ou intermédiaire mais pas un niveau variable. C'est un capteur tout ou rien. Lorsque le réservoir est conducteur, il suffit d'une seule électrode isolée, sauf à l'extrémité qui se situe au niveau à détecter. L'entrée, en contact avec le liquide, ferme un circuit électrique basse tension alternative à la masse, par l'intermédiaire du réservoir conducteur ou d'une deuxième électrode si celui-ci n'est pas métallique. L'intensité parcourant alors l'électrode est détectée et permet d'actionner un relais. La basse tension alternative évite l'électrolyse des liquides.

Ce type de capteur résiste dans une gamme de températures étendue, de -200°C à $+250^{\circ}\text{C}$, et la pression au niveau des électrodes peut s'élever jusqu'à 160 bars. En revanche, les milieux agressifs, les liquides contenant des graisses ou des huiles sont déconseillés, ils risquent de former des dépôts isolants sur les électrodes.

b-La sonde capacitive

On peut utiliser la variation d'une capacité pour mesurer le niveau d'un liquide isolant ou conducteur. La capacité consiste en un condensateur cylindrique constitué de deux électrodes. Si une hauteur h_2 de la sonde est immergée dans le liquide isolant, ayant une constante diélectrique relative ϵ_{r2} et une longueur h_1 , est exposée au gaz au dessus du liquide (souvent de l'air) dont la constante diélectrique relative est ϵ_{r1} (Fig.2.8), alors la longueur totale de l'électrode est $l = h_1 + h_2$ et sa capacité est :

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_{r1} h_1 + \epsilon_{r2} h_2}{\ln(D/d)} \quad (2.9)$$

D est le diamètre de l'électrode extérieure, d le diamètre de l'électrode intérieure et $\epsilon_0 = \epsilon_{r2} = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m est la constante diélectrique de l'air.

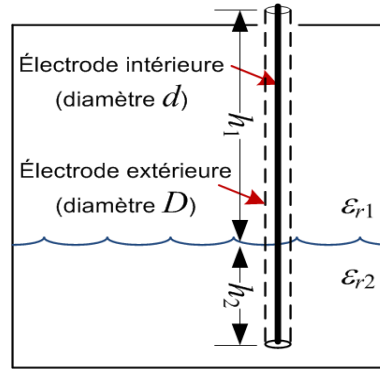


Fig.2.8 : Mesure de niveau d'un liquide non conducteur avec une sonde capacitive

Lorsque le liquide est conducteur, il jouera le rôle de l'électrode extérieure et l'électrode intérieure est simplement un fil (ou une tige) isolé suspendu dans le réservoir (Fig.2.9)

Si une longueur h_1 du fil est immergée, la capacité est :

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_{r1} h_1}{\ln((d+2e)/d)} \quad (2.10)$$

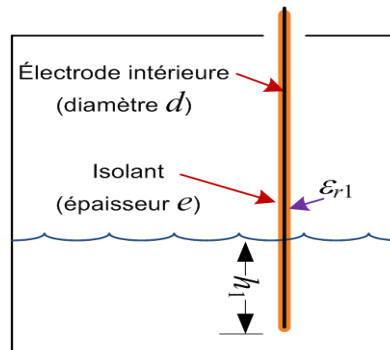


Fig.2.9 : Mesure de niveau d'un liquide conducteur avec une sonde capacitive

Cette technique de mesure a l'avantage de s'appliquer à de nombreux produits isolants ou conducteurs, mais avec les mêmes réserves que précédemment. Les produits peuvent être des liquides, des pâtes, des matériaux en granulé, pourvu que la granularité ne soit pas trop grossière. La gamme de mesures de niveaux s'étend sur une dizaine de mètres pour des températures comprises entre -20°C et $+85^{\circ}\text{C}$ et des pressions de l'ordre de 40 bars. La précision est de 1% environ.

2.2.1.3-Méthodes de rayonnement

a- Capteur ultrasonique

La mesure de niveau par un capteur ultrasonique se fait simplement en évaluant la distance par une mesure du temps requis pour qu'un signal ultrasonique fasse l'aller-retour entre le capteur et la surface du liquide (ou du solide). Cette distance h est évaluée par l'équation suivante :

$$h = \frac{1}{2} c t \quad (2.11)$$

c étant la vitesse du son 343m/s et t le temps requis pour l'aller-retour du signal ultrasonique.

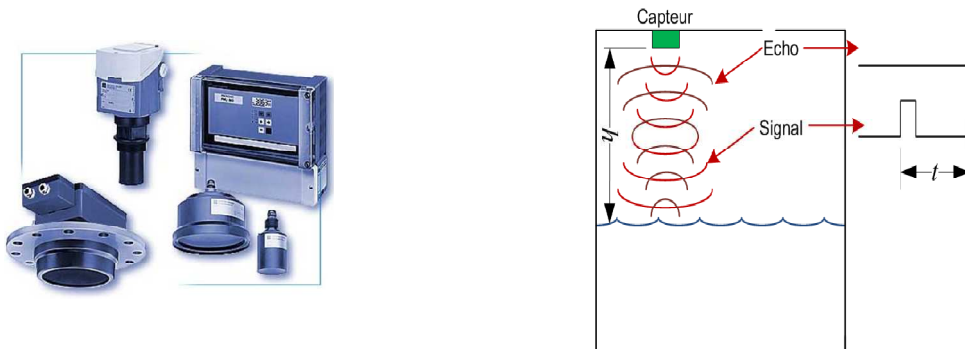


Fig.2.10 : Principe de mesure ultrasonique

b- Capteur radar à hyperfréquences

Le principe du capteur radar à hyperfréquences est également exploité pour la mesure de niveau. Des impulsions micro-ondes extrêmement courtes, de faible puissance, sont émises par une antenne et sont réfléchies par la surface du produit et détectées par la même antenne. La durée entre l'émission et la réception des signaux est proportionnelle à la position du produit dans le réservoir. La mesure s'étend jusqu'à 35 m, avec une précision de $\pm 3\text{ mm}$. Les micro-ondes se propagent en n'étant pratiquement pas influencées ni par la température ni par la pression. Les pressions s'étendent du vide à 160 bar et les températures de -40°C à $+400^{\circ}\text{C}$, ne posent aucun problème à la mesure radar.

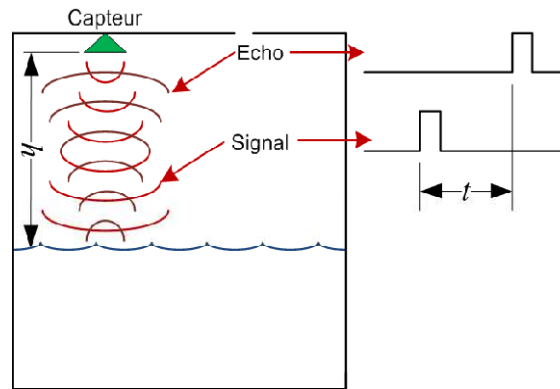


Fig.2.11 : Principe de mesure de niveau par capteur radar

Un dispositif à impulsions guidées a été également mis en œuvre dans la mesure de niveau. De courtes impulsions à microondes se déplacent le long d'un câble en acier ou d'une tige. Ces ondes sont réfléchies à la surface du produit et détectées par l'électronique de traitement. Le temps de propagation, qui dépend du niveau du produit stocké, est exploité par l'appareil.

Ces capteurs particuliers sont insensibles à la poussière et aux variations de produits. Avec des plages de mesure allant jusqu'à 60 m, ces capteurs sont appropriés pour des réservoirs de grande hauteur.

Des températures allant jusqu'à 150 °C et des pressions jusqu'à 40 bars peuvent être atteintes. L'absence de contact avec le produit permet à ce capteur de convenir à tous les produits alimentaires, chimiques, qu'ils soient liquides ou pâteux, etc.

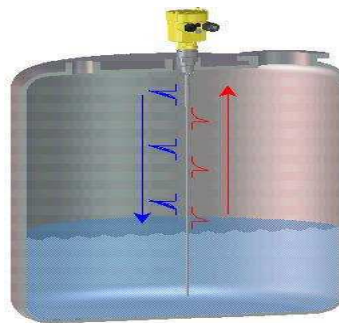


Fig.2.12 : Principe de mesure de niveau par impulsion guidées

L'utilisation d'ondes électromagnétiques permet d'obtenir une précision de 0,5% de la distance mesurée et d'éviter les inconvénients du capteur ultrasonique [WEB 3].

2.2.2- Capteurs optiques

Une autre manière pour mesurer le niveau d'un liquide, gaz ou solide dans un réservoir est d'utiliser des capteurs optiques tels que les caméras.

Une caméra placée en face du réservoir fournit une image (Fig.2.13). Cette image est ensuite traitée par un ordinateur afin de détecter le niveau du produit dans le réservoir et d'évaluer la valeur de ce niveau. Cette méthode invasive ne peut être utilisée que si le réservoir est transparent (verre ou plastique).

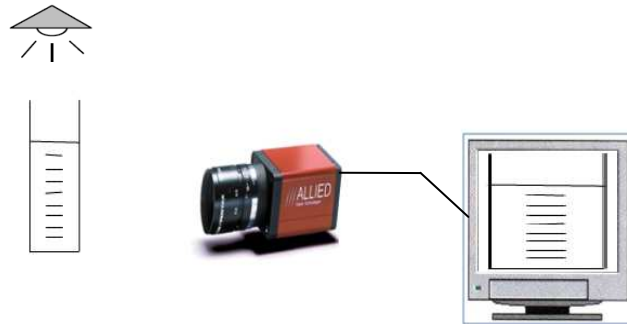


Fig.2.13 : acquérir une image par une caméra

2.2.3-Choix d'une méthode de mesure de niveau dans un infiltromètre

Le principe de la mesure avec l'infiltromètre à disque repose sur la mesure de l'infiltration axisymétrique de l'eau dans le sol. Pour ce faire, on mesure le niveau d'eau dans le réservoir principale de l'infiltromètre qui est en plastique transparent et étanche.

La mesure du niveau d'eau infiltré avec les méthodes hydrostatiques comme le flotteur, suppose que le réservoir soit ouvert pour laisser passer le fil qui relie le flotteur via le contre poids, ça ce n'est pas possible car il faut pas que l'air entre dans le réservoir afin de ne pas modifier la pression imposé au sol par le vase de Mariotte. La même chose, pour le plongeur et le palpeur, et que ces capteurs permettent de mesurer un niveau d'eau constant pas un niveau variable. L'utilisation d'un capteur de pression nécessite de modifier l'infiltromètre à disque afin d'ajouter une colonne d'eau sèche ou mouillé et de placer un capteur de pression en bas du réservoir principal.

Les méthodes électrique et par rayonnement ne sont pas aussi envisageables car il faut placer à l'intérieur du réservoir principal les capteurs et qu'il faut faire passer les fils électriques pour envoyer le signal vers la commande.

La mesure de niveau avec le capteur optique (caméra), nous permet d'éliminer les obstacles cités précédemment car pour effectuer la mesure de niveau, il faut placer le capteur optique à une distance de l'infiltromètre à disque, que le réservoir est transparent et que sa hauteur de niveau ne dépasse pas 100 cm. C'est une méthode non invasive car elle ne permet pas de modifier l'infiltromètre où de placer un capteur à l'intérieur du réservoir de telle sorte à ne pas gêner le réglage de l'infiltromètre. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'utiliser une caméra pour effectuer des mesures d'infiltration.

2.3- Système de vision artificielle

Un système de vision artificielle a pour fonction d'acquérir et de traiter des images. Il est constitué d'un système d'acquisition (caméra, ...) et un système de traitement d'image (Fig.2.14). Il se compose de plusieurs phases.

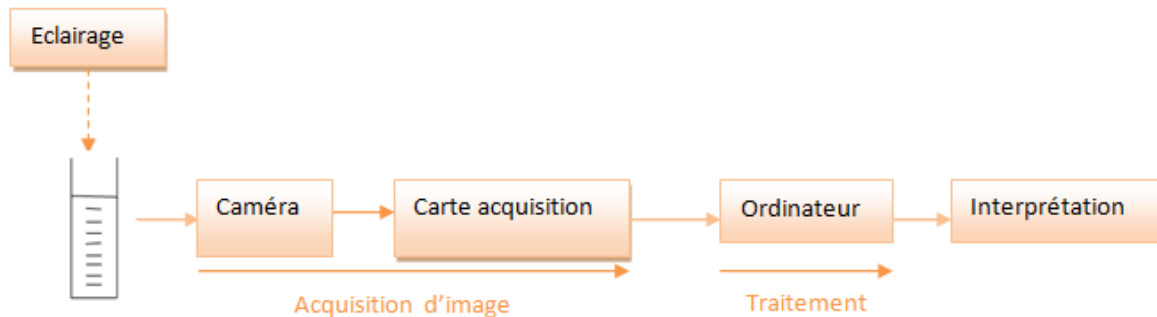


Fig.2.14 : Système de vision artificielle

Phase d'acquisition : Cette phase concerne l'acquisition de l'image par une caméra et sa conversion sous forme numérique (image numérique) afin qu'elle puisse être traitée par un ordinateur. Le réglage de l'éclairage et de la caméra sont nécessaires pour acquérir une image de bonne qualité. Il s'agit d'une phase importante car, une bonne acquisition permet de simplifier les étapes de traitement et d'analyse.

Phase de prétraitement : Le prétraitement regroupe un ensemble de techniques destinées à améliorer la qualité de l'image. Une première étape, appelée restauration, vise à corriger les déformations géométriques, provoquées par l'optique de la caméra et les variations d'éclairage. Une seconde étape, appelée amélioration, vise à réduire le bruit.

Le bruit est une perturbation qui peut affecter l'image. Il peut provenir du dispositif d'acquisition (caméra, amplificateur, échantillonnage, ...) et de la scène elle-même (poussière, brouillard, bulles,...).

La réduction du bruit est effectuée par un traitement appelé filtrage. Le principe de filtrage est l'application d'une opération locale (produit de convolution, max, min, médiane,...) au niveau du pixel élémentaire en tenant compte de son environnement (pixels voisins). A cet effet, plusieurs filtres tels que les filtres linéaires, les filtres non linéaires et les filtres morphologiques ont été définis. Parmi les filtres linéaires, on retrouve les filtres classiques, passe-haut, passe-bas, moyen, gaussien. Parmi les filtres non-linéaires, on peut citer le filtre médian. Les filtres morphologiques utilisant la notion de dilatation, d'érosion, d'ouverture et de fermeture constituent une autre catégorie de filtre. Ils seront présentés en détail au paragraphe (2.3.3).

Phase de l'analyse: Le but de l'analyse d'image réside dans la détection des divers objets qui compose l'image et à leurs descriptions par un ensemble d'attributs (forme, couleur, texture, position, orientation,...).

La détection d'objets est généralement effectuée en utilisant une méthode de segmentation ou de détection de contours. La segmentation consiste à partitionner une image en régions homogènes ou chaque région est assimilée à un objet ou une partie d'un objet.

Une manière simple de segmenter une image est d'utiliser le seuillage dont le principe consiste à répartir les pixels de l'image en deux classes, une classe "fond" C_0 et une classe "objet" C_1 .

Selon que le niveau de gris $I(x, y)$ de pixel de coordonnées (x, y) est inférieur ou supérieur à une valeur seuil s :

$$g(x, y) = \begin{cases} C_1 & \text{si } I(x, y) \geq s \\ C_0 & \text{si } I(x, y) < s \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{pixel appartient à la classe " objet"} \\ \text{pixel appartient à la classe "fond"} \end{array} \quad (2.12)$$

Le problème du seuillage se consiste alors à choisir une valeur du seuil s . celle-ci peut être fixée manuellement ou déterminée en optimisant un critère donnée comme celui d'Otsu [WEB 1]. Quelque soit la méthode utilisée le choix de s implique généralement l'histogramme de l'image.

Phase d'interprétation : Sur base des caractéristiques extraites sur les objets détectés, on procède à l'identification des objets, à leurs relations, etc. Dans le but de fournir une description plus générale de la scène.

2.3.1- Systèmes d'éclairage

La détermination des conditions d'éclairage est un des éléments à la bonne maîtrise de la vision artificielle. Les méthodes de traitement les plus sophistiquées ne pourront jamais apparaître des détails noyés dans une ombre provoquée par un éclairage ponctuel par exemple. Certaines techniques d'éclairage permettent parfois de simplifier considérablement l'étape de traitement. Le choix de la configuration de l'illumination de la scène dépend de la nature de l'objet à imager (transparent, réfléchissant, opaque, translucides,...) et des caractéristiques que l'imagerie doit permettre d'étudier [13]

L'élaboration d'un système d'éclairage nécessite trois points essentiels. Le premier est le choix du modèle de réflexion de la lumière de la scène où de l'objet à traiter. Le deuxième point est le choix de la source lumineuse éclairant la scène où l'objet. Le troisième point est le choix de la géométrie du système d'éclairage, c'est-à-dire de la disposition des sources illuminant l'objet à analyser par rapport à la caméra.

2.3.1.1-Les différentes réflexions

Les rayons lumineux provenant d'une source lumineuse peuvent être partiellement ou intégralement réfléchis par l'objet à observer par la caméra. Dans le cas d'objets opaques, les rayons lumineux qui sont intégralement réfléchis proviennent de la réflexion spéculaire tandis que les rayons partiellement réfléchis sont issus de la réflexion mixte lorsque ces deux réflexions sont combinées entre elles.

2.3.1.1.1. La réflexion spéculaire

Lorsque les rayons lumineux incidents notés R_i provenant d'une source lumineuse sont intégralement réfléchis dans une direction unique, symétrique à celle de la lumière incidente par rapport à la normale $\vec{k}$ de la surface de l'objet comme le montre la figure (2.15), on parle alors de réflexion spéculaire.

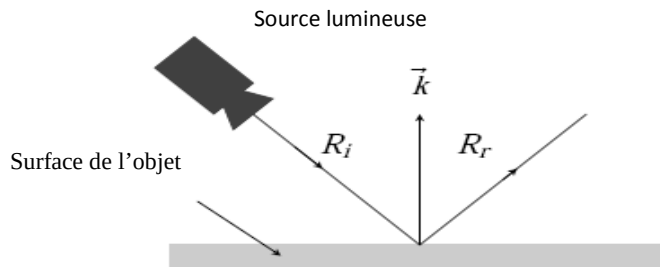


Fig.2.15 : Réflexion spéculaire

2.3.1.1.2. La réflexion diffuse

Les rayons réfléchis R_r peuvent également se disperser selon plusieurs directions à cause de la rugosité de la surface de l'objet. La réflexion est dite totalement diffuse pour une surface lorsque la lumière diffusée se fait de manière identique dans toutes les directions.

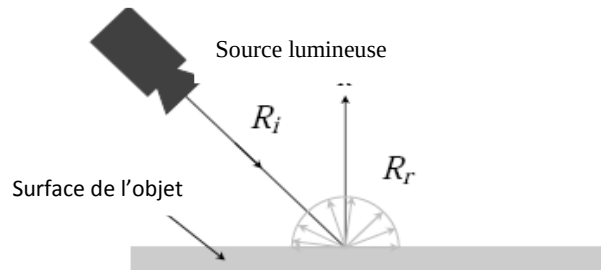


Fig.2.16: Réflexion diffuse

2.3.1.1.3. La réflexion mixte

Pour la plupart des objets, les réflexions spéculaires et diffuses sont combinées de telle sorte que la réflexion diffuse se développe de façon préférentielle selon les directions voisines de celle de la réflexion spéculaire. Il se crée alors un lobe de diffusion autour de cette direction préférentielle comme le montre la figure (2.17)

Il est important d'estimer la nature de réflexion de l'objet à fin de définir un système d'éclairage qui permet d'avoir une bonne image.

Pour mettre en évidence les défauts des objets à étudier, le choix du type de source lumineuse doit être effectué avec soin.

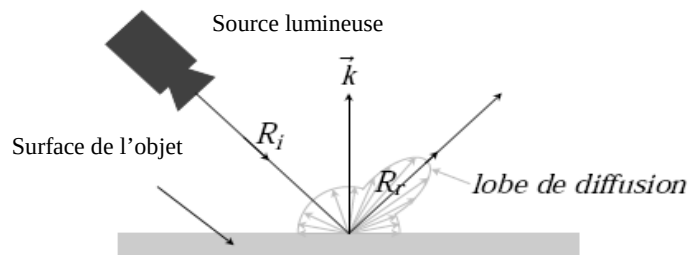


Fig.2.17 : Réflexion mixte

2.3.1.2. Les différents types de sources lumineuses

La lumière n'est qu'un petit domaine du spectre électromagnétique. Les rayons gamma, les rayons X, les ultra-violet, la lumière, les infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio (Fig.2.18). Le spectre visible s'étale entre 380nm et 780nm(Fig.2.19).

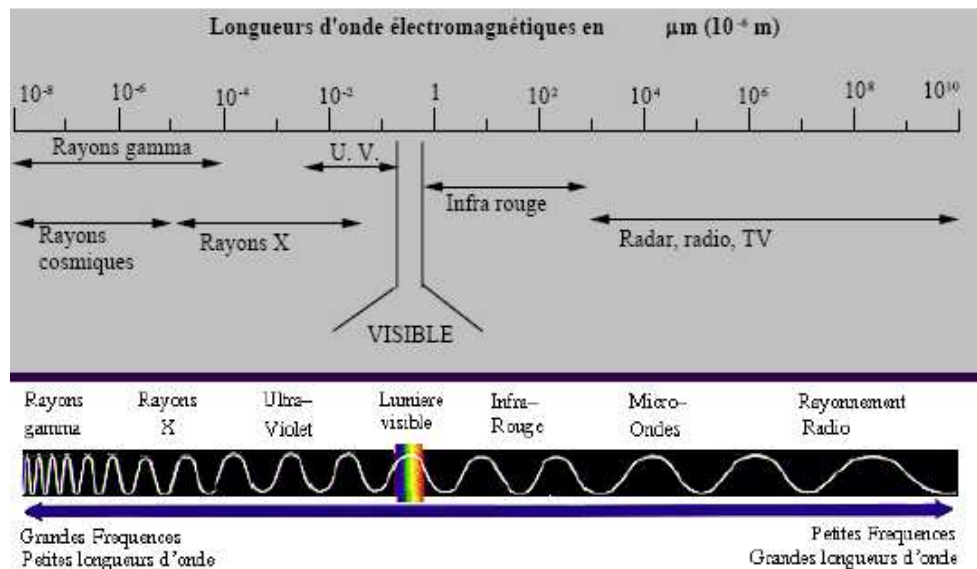


Fig.2.18 : Spectre d'ondes électromagnétiques

La lumière du soleil est une lumière blanche composée de l'ensemble des longueurs d'ondes (spectre), qui se déplacent à la vitesse de 300000km /s dans le vide.

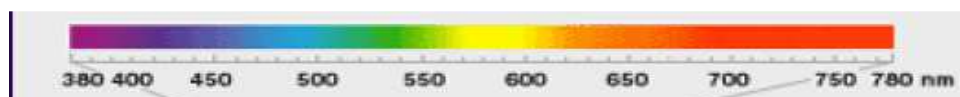


Fig.2.19 : Spectre visible

On distingue sept couleurs principales, le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet. Pour visualiser toutes les couleurs contenues dans la lumière blanche, il suffit d'observer la surface d'une boule de savon. On voit que la lumière est décomposée en plusieurs radiations colorées. L'émission de la totalité du spectre donne une lumière blanche. Une lumière colorée présente simplement une forte proportion d'onde d'une partie restreinte

du spectre visible. Par exemple, une lumière est rouge simplement parce qu'il y a beaucoup d'onde autour de 680nm.

Il existe de nombreux types de sources lumineuses parmi lesquels on peut citer :

Les lampes à incandescence : elles contiennent un filament de tungstène qui porté à haute température (environ 2500 °C) par le passage d'un courant électrique, émet de la lumière. Ces lampes ont un rendement lumineux faible, car la plus grande partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur plutôt qu'en lumière. Leur durée de vie est courte.

Tube fluorescent (néon) : A l'intérieur d'un tube de verre est appliqué une couche de phosphore, ainsi que deux électrodes (cathodes) à chaque extrémité. La particularité du tube fluorescent est qu'il doit fonctionner avec un transformateur appelé self. Dès la mise sous tension, un arc électrique se propage entre les deux cathodes à l'intérieur du tube. Les électrons produit percutent les atomes de mercure et émettent une lumière ultraviolette invisible à l'œil nu. Les ultraviolets en heurtant la couche de phosphore émettent une lumière visible.

Les lasers : Ils permettent d'obtenir des faisceaux de lumière étroits (très directive), parfaitement monochromatique, intense et de grande portée. Ils peuvent être de nature diverses : laser à azote, laser à colorant, etc.

Les diodes électroluminescentes ou LED (Light emitting diode) : ce sont des diodes qui émettent de la lumière lorsqu'elles sont soumises dans le sens direct, à une tension supérieure à leur tension de seuil. Elles sont utilisées par exemple dans les tableaux d'affichage. Elles possèdent une très grande durée de vie, elles émettent une lumière assez blanche (un peu bleutée), mais son inconvénient majeur est qu'elle éclaire dans un cône assez étroit.

Une source de lumière peut également être caractérisée par sa température de couleur proximale. On distingue les lumières de teinte chaudes correspondent à des jaunes-rouge et ont des températures de couleur inférieures à 3000K, des lumières de teinte froide correspondent à des couleurs bleu-violet et ont des températures de couleur élevées entre 5000 K et 10000 K.

2.3.2- Caméra

Une caméra est un capteur d'image qui a pour rôle de transformer la lumière réfléchiée par la scène en une image.

Une caméra comporte deux parties essentielles, une optique (objectif) et un élément sensible à la lumière (capteur) [25] (Fig.2.20)

Un jeu de lentilles placées dans l'objectif permet de focaliser la lumière vers le centre optique de l'appareil. En fonction du diamètre de l'ouverture laissée par le diaphragme, une part plus ou moins importante de cette lumière entre ensuite dans la chambre de la caméra. Un capteur photosensible est placé au fond de l'appareil derrière un obturateur. Pendant le

temps où l'obturateur est ouvert, le capteur transforme l'énergie lumineuse qu'il reçoit sur chacun de ces récepteurs en signaux

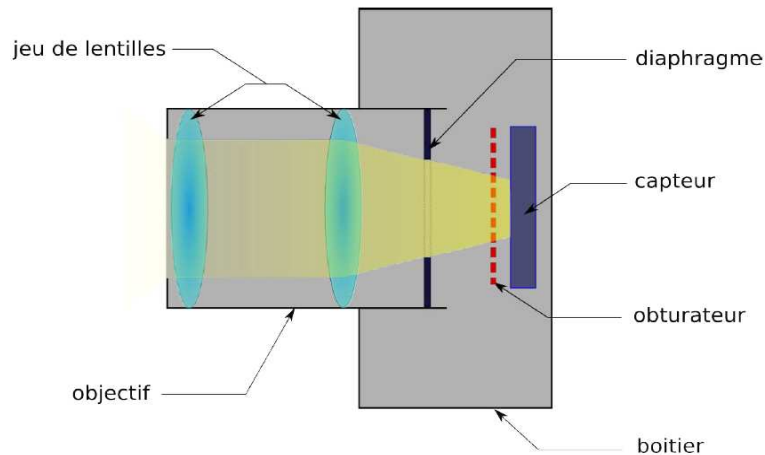


Fig.2.20 : Principe de fonctionnement d'une caméra

a- L'objectif

L'objectif (Fig.2.21) se présente sous la forme d'un cylindre, possède un certain nombre de bagues utilisées pour le réglage des paramètres (iris, focale,...) et se fixe sur la caméra. L'intérieur de l'objectif est composé d'un certain nombre de lentilles assemblées de façon très précises. Son rôle est d'assurer la projection d'une image nette sur la surface sensible. Cette dernière est donc placée à proximité du plan focal de l'objectif. L'objectif est caractérisé essentiellement par sa distance focale f et son diamètre D qui déterminent son grossissement et sa luminosité.

La distance focale : La distance focale f est définie par la distance entre le foyer F et le centre optique O (centre de l'objectif), (Fig.2.22) [25]. Le foyer est le point de convergence de rayons lumineux arrivant sur l'objectif parallèlement à l'axe optique. Le choix de la focale est fait en fonction du champ de vision désiré et de la taille du capteur. La mise au point permet alors d'ajuster le centre optique O de l'objectif par rapport à la distance de l'objet observé.

La distance focale des objectifs est mesurée en millimètres ; c'est une caractéristique importante qui indique si le champ de vision est étroit ou large (Fig.2.22). Une petite focale donne un angle large de vision alors qu'une grande focale donne un angle étroit de vision.

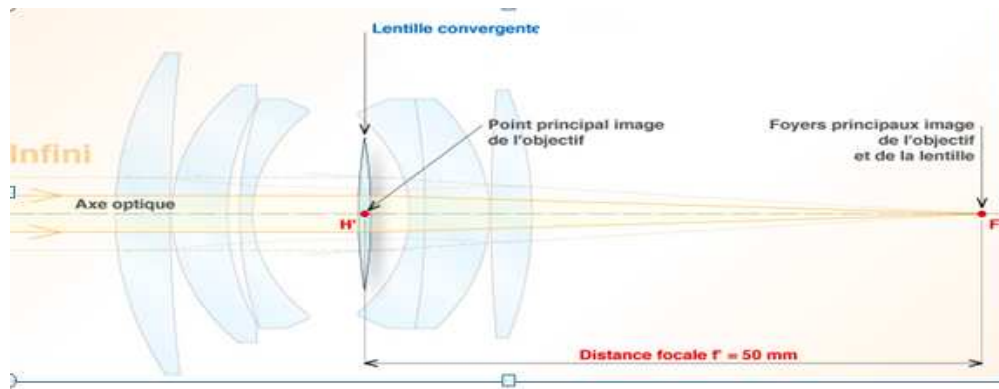


Fig.2.21 : Système optique d'un objectif

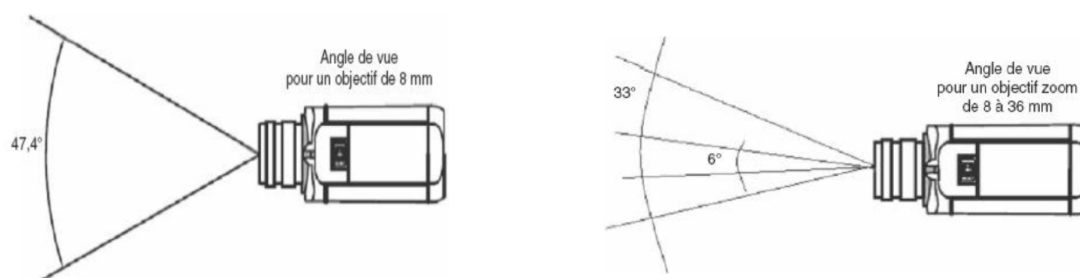


Fig.2.22 : Objectif de type fixe et de type variable avec angle de vue

La figure (2.23) montre un même objet à travers diverses focales depuis un même point (c'est-à-dire le photographe ne se déplace pas).



Fig.2.23: Images sur différentes longueurs focale

Diaphragme : Le diaphragme a une ouverture souvent circulaire dont le diamètre d se règle afin d'augmenter ou de diminuer la quantité de lumière qui entre dans l'appareil. L'éclairement est proportionnel à la surface de cette ouverture $\pi d^2/4$. En photométrie, l'éclairement diminue avec le carré de la distance focale, il est proportionnel au rapport $(d/f)^2$ [25].

Le diaphragme modifie aussi la profondeur de champ. Plus l'ouverture du diaphragme est petit, plus la profondeur de champ augmente. Cette régulation peut s'effectuer de deux manières [28] :

Manuellement : il suffit alors de régler l'iris en bougeant à la main la bague correspondante. Ce type d'objectif est généralement utilisé lors qu'un réglage répété de l'iris n'est pas nécessaire. Il convient parfaitement aux applications d'intérieurs, dans lesquelles il existe très peu de variations d'éclairage.

Automatiquement (Iris auto) : l'iris est alors asservi automatiquement en fonction de la qualité de lumière reçue. Ce type d'objectif existe sous deux versions L'objectif avec iris auto normale, sur lequel le réglage est effectué par l'objectif lui-même en fonction d'information fournie par la caméra et l'objectif à commande directe sur lequel l'asservissement provient de l'extérieur. Ce type d'objectif est utilisé en extérieur, quand la dynamique du signal (zone d'ombre ou zone ensoleillée) est trop grande pour le capteur. Par comparaison avec l'humaine, l'œil possède un iris qui fonction en mode automatique.

La profondeur

La profondeur du champ dépend de plusieurs éléments dont la longueur de la focale de l'objectif et la distance de l'objectif à l'objet. Une profondeur de champ importante signifie qu'une grande partie du champ de vision est nette et une profondeur de champ faible signifie qu'une petite partie du champ de vision est nette.

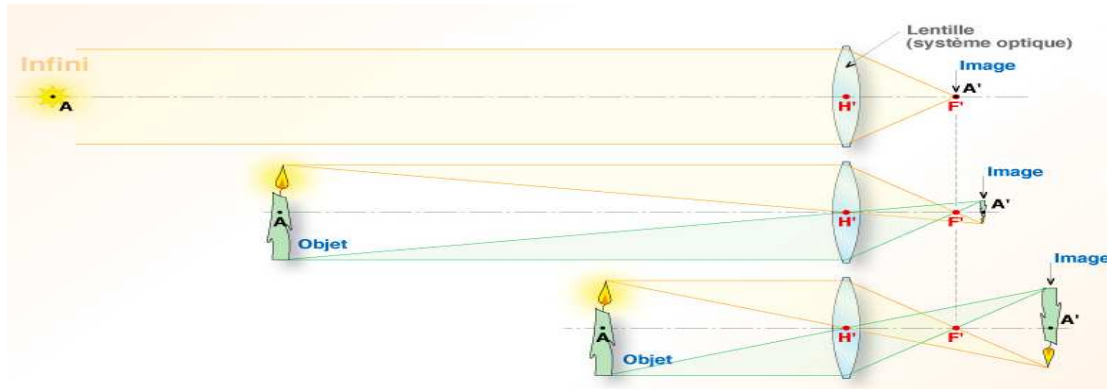


Fig.2.24 : Comportement de l'image en fonction de la distance de l'objet.

Le temps d'obturation ou le temps d'exposition

Le temps d'obturation est la durée pendant laquelle l'obturateur est ouvert et donc pendant laquelle le capteur est exposé à la lumière. Cette durée est appelée aussi le temps d'exposition. Elle représente le temps nécessaire pour que le pixel acquière la scène observée.

La qualité

Elle est pour une grande part liée aux lentilles utilisées pour construire l'objectif. La qualité du matériau des objectifs utilisés dans les applications types surveillance de locaux sont fabriqués à partir de lentilles en plastique dont les qualités optiques (transmission,

déviations,...) sont moins bonnes que les lentilles en verre. Les lentilles en verre sont utilisées pour les objectifs industriels ou pour les appareils photographiques.

Chaque lentille, même de bonne qualité, ne transmet pas intégralement le signal lumineux, une partie de ce signal est réfléchi. La plupart des objectifs sont réalisés à partir de plusieurs lentilles, le signal réfléchi peut être renvoyé de lentille à lentille et générer du bruit. Pour cela, certaines lentilles sont traitées pour l'anti-reflet. L'image est alors améliorée, mais le coût de ces objectifs est élevé.

En générale, les objectifs de très bonne qualité ont beaucoup de lentilles, elle-même de très grande qualité.

b-Capteur d'image

Les capteurs d'images sont des composants électroniques destinés à assurer la conversion des niveaux de luminosité d'une scène visuelle en grandeurs électriques représentatives de cette scène. La surface sensible, constituée d'une matrice de photo-capteurs, se situe dans le plan d'image de l'appareil de prise de vue et reçoit l'image réelle de la scène focalisée par le bloc optique. Cette image inversée est décomposée en éléments (pixels) arrangés selon une matrice à deux dimensions. L'analyse consécutive des éléments de la matrice, ordonnés en lignes et en colonnes, fournit pour chaque pixel, une tension directement liée à l'éclairement reçu [25].

On distingue deux types de capteurs : CCD et CMOS.

b.1- Capteur CCD

Le dispositif à transfert de charges ou capteur CCD (Charge Coupled Device) a été inventé en 1970 par Willard Boyle et George Smith dans les laboratoires Bell [26]. Il est basé sur une capacité MOS (Métal-Oxyde-Semi-conducteur) dont la grille est polarisée (voir figure (Fig.2.25)). La lumière incidente traverse la cathode de la capacité MOS (grille) pour générer une paire électron-trou sous la grille du MOS. Cette paire est vite séparée par l'effet du champ électrique existant, attirant ainsi le photoélectron vers la grille et repoussant le trou dans le volume du silicium [28]

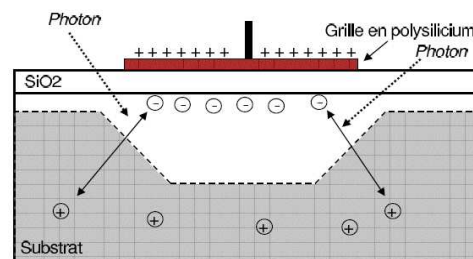


Fig.2.25 : Principe d'accumulation de charge dans un capteur CCD

Les paquets de charges accumulés dans chaque pixel sont transférés à travers les capacités MOS voisines. Cette opération s'effectue par le biais de polarisations successives de grilles adjacentes. Les électrons sont attirés vers les capacités qui subissent la plus forte

polarisation [27]. Ainsi les paquets de charges sont transférés par colonne, de ligne en ligne, jusqu'à un registre horizontal. Le transfert s'effectue ensuite dans ce registre vers l'étage de sortie du capteur, où chaque paquet de charge est converti en tension. On distingue trois types de capteurs : le capteur pleine trame (full frame), à transfert de trame (frame transfert), ou encore à interlignes de transfert (interline transfert) (Fig.2.26).

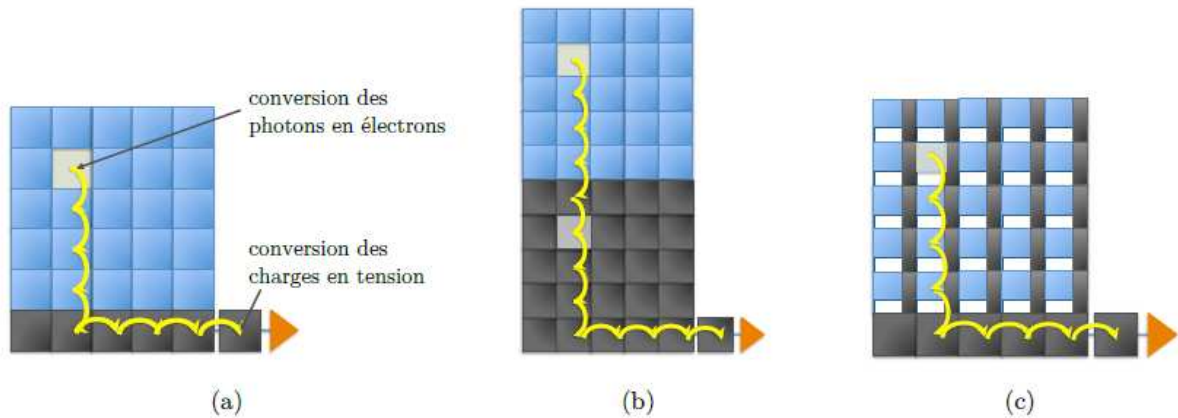


Fig.2.26 : Architecture de CCD: (a) pleine trame ; (b) à transfert de trame ; (c) à interlignes de transfert.

-Le capteur pleine trame (full frame), est le plus simple possible, dans lequel seul le registre horizontal est masqué pour ne pas recevoir de lumière. La surface photosensible est dans ce cas importante, mais le capteur nécessite un obturateur mécanique.

-Pour le capteur à transfert de trame, une zone mémoire protégée de la lumière de la même façon que la matrice de pixels. A la fin du temps d'exposition, les charges sont transférées suivant les lignes dans la zone protégée.

-Dans la matrice à interlignes de transfert, des registres CCD protégés de la lumière sont réservés à côté des lignes de pixels, de sorte que les charges sont transférées dans ces registres à la fin de la phase d'exposition et le transfert ligne s'effectue dans ces zones protégées. Le phénomène de smearing est parfaitement éliminé et l'obturateur mécanique n'est plus nécessaire.

b.2-Capteur CMOS

Le capteur CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor) est un composant basé sur une technologie de semi conducteurs. L'arrivée de photons sur le silicium va créer des charges électriques, qui vont s'accumuler dans le silicium durant un certain temps appelé temps d'intégration.

La différence fondamentale entre les CMOS et les CCD réside dans la manière de convertir les charges photo générées en tension. Dans le cas d'un CMOS, cette conversion s'effectue à l'intérieur même du pixel. La lecture s'effectue généralement ligne par ligne (Fig.2.27)

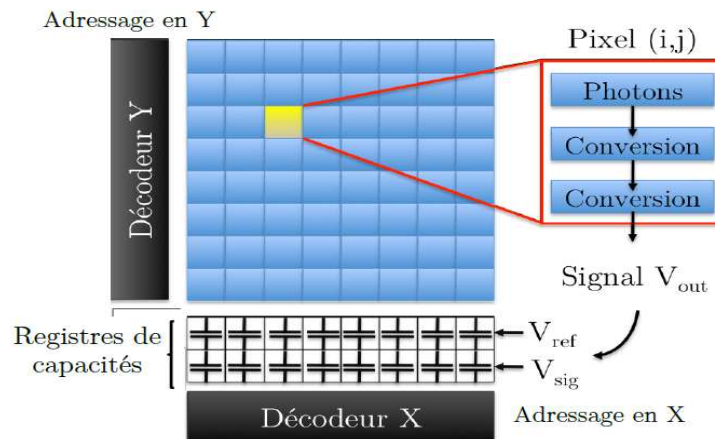


Fig.2.27 : Fonctionnement global d'un capteur CMOS

Dans un premier temps on sélectionne une ligne i à l'aide du décodeur d'adresse Y. le signal V_{out} issu de chaque pixel est échantillonné en deux temps : on récupère successivement le palier de référence V_{ref} puis le palier de signal V_{sig} . Les signaux V_{ref} et V_{sig} de tous les pixels de la ligne i sont stockés dans deux registres horizontaux de capacités. Il suffit de les transférer vers la sortie pour effectuer leur différence et récupérer le signal utile. Après la lecture du dernier pixel de la ligne Y_i , on adresse la ligne Y_{i+1} et le cycle recommence [27].

La lecture est aussi réalisable par simple adressage des coordonnées (x, y) des pixels, permettant une lecture fenêtrée sur une zone d'intérêt sans avoir à lire les autres pixels, ce qui facilite les zooms et suivi de mouvement [27].

La principale différence est la nature du signal sortant d'un photosite. Pour le CCD il s'agit de charges et pour le CMOS c'est déjà un signal sous forme numérique (concernant le CCD, les charges seront converties en tension après le registre de sortie).

Il existe deux types de caméras (pour capteur CCD et CMOS) : Caméra linéaire et caméra matricielle (décrite précédemment)

Une caméra linéaire est équipée d'un capteur linéaire, la disposition des photons sous forme linéaire ne permet que l'observation d'une ligne de la scène restituée sous la forme d'une image ligne, contrairement aux caméras matricielles dont les photons sont disposés sous la forme d'une matrice permettent l'acquisition d'images bidimensionnelles. Pour obtenir une image matricielle à partir d'images-lignes, il suffit de stocker en mémoire les images-lignes acquissent successivement les unes à la suite des autres suivant une valeur d'ordonnée croissante.

b-3-Comparaison entre les capteurs CMOS et les capteurs CCD

Vue l'incompatibilité de fabrication entre les CCD et les CMOS, les CCD ne possèdent que la fonction capteur d'image (surface photosensible) mais aucun traitement ou conversion de l'information. Par contre les capteurs CMOS peuvent regrouper sur le même circuit, la partie photosensible et également l'électronique nécessaire à la conversion, le stockage, la

lecture et le traitement de l'information. Cela permet une réduction du bruit et bien sur du cout de fabrication.

La technologie CCD nécessite pour le déplacement des charges dans le silicium, plusieurs horloges et plusieurs alimentations de valeurs élevées. Il en résulte une consommation plus importante que les capteurs CMOS.

Dans la plupart des capteurs CMOS, les pixels peuvent renseigner à tout moment, sur l'intensité lumineuse qu'ils reçoivent et par conséquent, ils sont potentiellement accessibles à n'importe quel endroit. Cette technique (accès libre aux pixels) offre un intérêt de taille : celui de pouvoir sélectionner uniquement la zone contenant l'information utile (ROI : Region Of Interest). Il existe des modes de lecture partielle de CCD : le transfert de charges d'un pixel à l'autre impose de lire des lignes entières.

2.4. La morphologie mathématique

La morphologie mathématique est une science de la forme et de la structure, basée sur des concepts de théorie des ensembles de topologique et de géométrie. Inventée en 1964 par Georges Matheron et Jean Serra dans les laboratoires de Mines Paris, la morphologie mathématique s'est établie au cours des dernières années comme une méthode puissante pour le traitement d'images, elle est devenue une théorie mathématique complète. Elle a été appliquée avec succès dans divers domaines (biologie, imagerie médicale, science des matériaux, vision industrielle, multimédia, télédétection ...) [1].

Une des idées de base de la morphologie mathématique est d'étudier ou de traiter un ensemble à l'aide d'un autre ensemble, appelé "élément structurant". A chaque position de l'élément structurant, on regarde s'il touche ou s'il est inclus dans l'ensemble initial. En fonction de la réponse, on construit un ensemble de sortie.

On distingue la morphologie mathématique ensembliste qui s'applique sur des images binaires et de la morphologie mathématique fonctionnelle qui opère sur des images en niveaux de gris

2.4.1. Notion d'élément structurant

La morphologie mathématique ensembliste ou fonctionnelle repose sur un élément structurant dont on choisit la taille et la forme. Ces deux caractéristiques sont adaptées selon ce que l'on souhaite faire.

L'élément choisi est déplacé de façon à ce que son centre x passe par toutes les positions dans l'image à analyser. Pour chacune des positions de X , on se pose une question relative à l'union ou à l'intersection de l'élément structurant avec les objets de l'image. L'ensemble des points correspondant à une réponse positive permet de construire une nouvelle image qui constitue l'image résultat. A partir de ces principes, il est possible de construire les opérateurs de base de la morphologie mathématique qui sont l'érosion et la dilatation [2].

2.4.2. Propriétés de bases des transformations morphologiques

En générale, les transformations morphologiques sont dotées d'un ensemble de propriétés importantes relatives aux opérations. Les principales propriétés sont classées en deux catégories :

a-Propriétés algébriques

Soient x et y deux ensembles de R^2 et T une transformation.

➤ Croissance

La transformation T est dite croissante si : X inclus dans Y alors aussi $T(X)$ inclus dans $T(Y)$:

$$X \subset Y \Rightarrow T(X) \subset T(Y) \quad (2.13)$$

➤ Extensivité et anti-extensivité

La transformation T est extensive (resp, anti extensive) si X est inclus dans son transformé $T(X)$. Inversement, la transformation T est dite anti-extensive si $T(X)$ est inclus dans l'ensemble d'origine x . Plus formellement :

$$T \text{ est extensive si : } X \subset T(X) \quad (2.14)$$

$$T \text{ est anti-extensive si : } T(X) \subset X \quad (2.15)$$

➤ Idempotence

La transformation T est dite idempotente si elle est invariante par itération.

$$T[T(X)] = T(X) \quad (2.16)$$

b-Propriétés topologiques

Deux propriétés topologiques sont couramment utilisées : l'homotopie et la connexité :

Soient X et Y deux ensembles de R^2 et T une transformation.

➤ Connexité

On dit que la transformation T préserve la connexité si :

$$X \text{ est connexe } \Rightarrow T(X) \text{ est connexe} \quad (2.17)$$

➤ Homotopie

Une transformation T est homotopique si elle ne modifie pas le nombre de connexités.

$$N[T(X)] = N(X) \quad (2.18)$$

N : désigne le nombre de connexités.

2.4.3. Opérations morphologiques de bases appliquées aux images binaires

L'élément structurant est déplacé sur l'ensemble des points x de l'espace de définition. Pour chaque position, on pose une question relative à l'union, l'intersection ou l'inclusion de l'élément structurant avec l'ensemble X a analysé. La réponse sera positive ou négative, d'où le nom **transformation en tout ou rien**. L'image des points correspondants à des réponses positives forme un nouvel ensemble qui constitue ce que l'on appelle l'image transformée.

Les transformations en tout ou rien les plus simples sont :

- L'érosion qui est relative à l'inclusion.
- La dilatation qui est relative à l'intersection.

a-Transformation par érosion

Pour définir l'opération d'érosion, nous allons nous situer dans un espace R^2 partiellement occupé par un ensemble X . Prenons un élément structurant B représentant une figure géométrique simple, par exemple un cercle. Cet élément B_x est repéré par son centre et placé en x dans l'espace R^2 (Fig.2.28). Il est ensuite déplacé de telle sorte que son centre occupe successivement toutes les positions x de l'espace.

Pour chaque position, on se pose la question suivante : est-ce que B_x est complètement inclus dans X ?, c'est-à-dire en notation ensembliste : $B_x \subset X$?

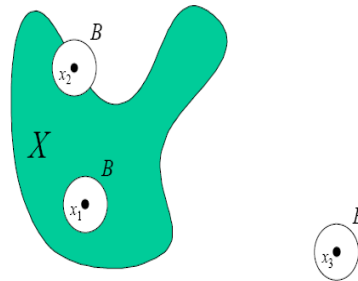


Fig.2.28: Principe de l'érosion d'un ensemble X par un élément structurant B de forme circulaire : B_{x1} est inclus dans X alors que B_{x2} et B_{x3} ne le sont pas.

L'ensemble des positions x correspondant à une réponse positive forme un nouvel ensemble Y appelé érodé de X par B . Cet ensemble est défini par :

$$Y = X \ominus B = \{x / B_x \subset X\} \quad (2.19)$$

$\ominus$ représente le symbole de l'érosion.

La figure (2.29) présente une érosion de la figure (2.28) par un élément structurant B de forme circulaire.

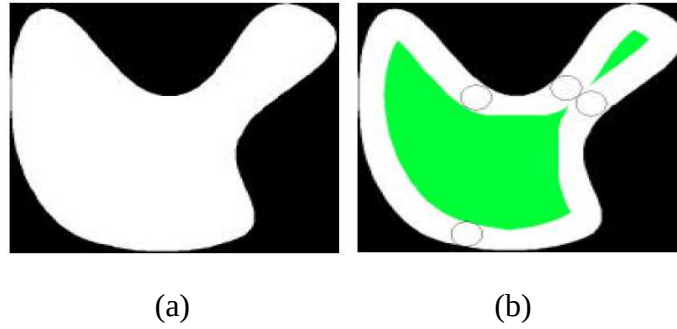


Fig.2.29 : (a) Ensemble X, (b) Erosion de l'ensemble X par un élément structurant circulaire

Y l'érodé de X est obtenu en pelant X d'une épaisseur égale à la largeur de l'élément structurant. Si on itère l'opérateur d'érosion suffisamment de fois, la forme finit par disparaître.

b-Transformation par dilatation

L'opération de dilatation, notée $\oplus$, se définit de façon analogue à l'opération d'érosion.

En prenant le même élément structurant B_x , on se pose pour chaque point x de R^2 de savoir si B_x touche l'ensemble X, c'est-à-dire si B_x et X ont une intersection non vide :

$$B_x \cap X = \emptyset ?$$

L'ensemble des points x de R^2 correspondant aux réponses positive forme un nouvel ensemble Y dont la frontière est le lieu des centres géométrique de B_x lorsque B_x touche X. L'ensemble Y est défini par :

$$Y = X \oplus B_x = \{ x / B_x \cap X \neq \emptyset \} \quad (2.20)$$

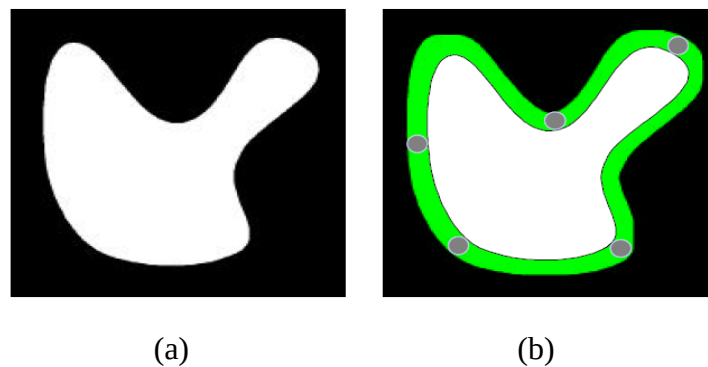


Fig.2.30: (a) Ensemble X, (b) Dilatation de l'ensemble X par un élément structurant de forme circulaire

Le dilaté de X est obtenu en agrandissant X d'une épaisseur égale à la largeur de l'élément structurant. Si en itérant l'opérateur de dilatation, on finit par remplir tout le domaine considéré.

c. Propriétés de l'érosion et de la dilatation

Il est important de connaître les principales propriétés de ces deux transformations.

- **Croissance** : L'érosion et la dilatation sont des opérations croissantes, ce qui permet la préservation des relations d'inclusions entre les objets de l'image.

$$X \subset Y \Rightarrow (X \ominus B) \subset (Y \ominus B) \quad (2.21)$$

$$X \subset Y \Rightarrow (X \oplus B) \subset (Y \oplus B) \quad (2.22)$$

- **Idempotence** : Les deux transformations ne sont pas idempotentes. On obtient le même résultat en érodant X ou en dilatant le complémentaire de X et en prenant le complémentaire du résultat.

$$(X \ominus B)^c = X^c \oplus B^* \quad (2.23)$$

B^* : étant le transposé de B.

- **Extensivité** : La dilatation est une transformation extensive, alors que l'érosion est anti-extensive.

$$(X \ominus B) \subset X \subset (X \oplus B) \quad (2.24)$$

- **Homotopique** : L'érosion et la dilatation ne sont pas homotopiques, la structure de l'image est modifiée.

En filtrage d'image, il est souvent nécessaire d'éliminer le bruit représenté par de petites taches sombres ou claires. L'érosion va éliminer les taches claires et la dilatation les taches sombres. Ces opérations vont cependant modifier également les objets à étudier et il faudra user d'une opération supplémentaire pour redonner aux objets leur forme originelle. Ceci nous conduit à deux nouveaux opérateurs, l'ouverture et la fermeture.

d. Ouverture morphologique

L'ouverture morphologique est la transformation qui consiste en l'application sur un ensemble X de l'opérateur érosion puis de l'opérateur dilatation avec le même élément structurant, elle est notée

$$Y = O^B(X) = (X \ominus B) \oplus B \quad (2.25)$$

En générale, l'ensemble de départ n'est pas conservé car une partie de la forme éliminée par l'érosion ne peut être recrée par une dilatation. L'ensemble Y est plus régulier et moins riche en détails au niveau du contour que l'ensemble initial X. En termes « géographiques » ou morphologiques, on dit que l'ouverture adoucit les contours, coupe les isthmes étroits, supprime les petites îles et les caps étroits (Fig.2.31).

e. Fermeture morphologique

La fermeture est l'opération inverse de l'ouverture, c'est-à-dire que l'on applique tout d'abord une dilatation puis une érosion toujours avec le même élément structurant :

$$Y = F^B(X) = (X \oplus B) \ominus B \quad (2.26)$$

Un ensemble fermé est également moins riche en détail que l'ensemble initial. La transformation par fermeture bouche les canaux étroits, supprime les petits lacs et les golfes étroits (Fig.2.31)

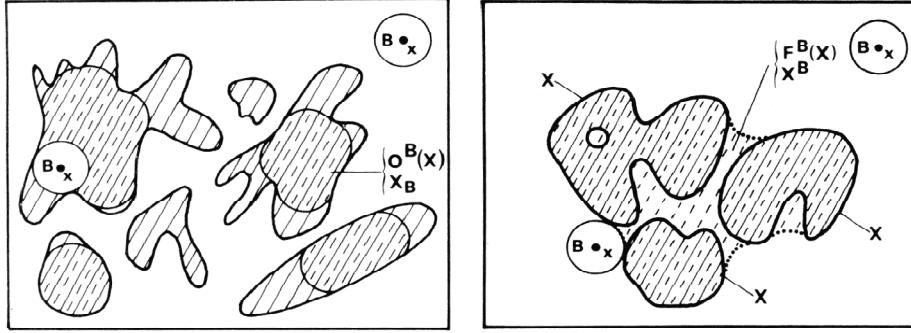


Fig.2.31: Illustration de l'ouverture et de la fermeture morphologique

f. Propriétés de l'ouverture et de la fermeture

- **Croissance** : L'ouverture et la fermeture morphologiques sont des transformations croissantes. Si X_1 est inclus dans X_2 alors on a :

$$X_1 \subset X_2 \Rightarrow O^B(X_1) \subset O^B(X_2) \quad (2.27)$$

$$X_1 \subset X_2 \Rightarrow F^B(X_1) \subset F^B(X_2) \quad (2.28)$$

- **Extensivité** : L'ouverture est anti-extensive alors que la fermeture est extensive. C'est-à-dire que :

$$O^B(X) \subset X \text{ (ouverture)} \quad (2.29)$$

$$X \subset F^B(X) \text{ (fermeture)} \quad (2.30)$$

- **Idempotente** : Les deux opérations d'ouverture et de fermeture sont idempotentes, c'est-à-dire que le résultat est invariant après deux itérations :

$$O^B(X) = O^B(O^B(X)) \quad (2.31)$$

$$F^B(X) = F^B(F^B(X)) \quad (2.32)$$

Comme l'érosion et la dilatation, l'ouverture et la fermeture ne possèdent pas de propriétés topologiques particulièrement intéressantes. Ces transformations ne sont pas homotopiques, c'est-à-dire elles ne préservent pas la connexité car elles peuvent scinder une forme en deux (érosion) ou fusionner deux formes (dilatation). On peut dire qu'il s'agit de transformations de simplification ou de filtrage.

2.4.4. Morphologie mathématique fonctionnelle

Les transformations d'images en morphologie mathématique fonctionnelle se pratiquent comme pour la morphologie mathématique ensembliste : l'élément structurant B

est déplacé à ce que son origine x passe par toutes les positions de l'image. Pour chaque position, on comparera les valeurs prises par les pixels inclus dans le domaine de l'élément structurant. Le pixel central prendra soit la valeur minimale «lors d'une érosion » soit la valeur maximale «lors d'une dilatation »

a-Erosion

Pour obtenir la fonction érodée de X , on attribue à $f(x)$ la valeur minimale qu'elle prend dans le domaine de l'élément structurant B et ce, à chaque nouveau déplacement de B .

Soit B^x l'élément structurant centré au point x :

$$E^B(X) = X \ominus B = \inf [f(y) / y \in B^x] \quad (2.33)$$

L'érosion en niveau de gris permet de réduire les pics de niveau de gris et d'élargir les vallées. Elle tend à homogénéiser l'image, à l'assombrir et à étaler le bord des objets les plus sombres. La figure (2.32) montre le résultat d'une érosion sur une image en niveau de gris.



Fig.2.32: Erosion d'une image en niveau de gris par un disque de taille 3.

b-Dilatation

Pour obtenir la fonction dilatée de X , on attribue à $f(x)$ la valeur maximale qu'elle prend dans le domaine de B et ce, à chaque nouveau déplacement de B .

Soit B^x l'élément structurant centrée au point x :

$$D^B(X) = X \oplus B = \sup [f(y) / y \in B^x] \quad (2.34)$$

La dilatation en niveau de gris comble les vallées et épaissit les pics : elle homogénéise l'image, l'éclaircit et tend à faire disparaître les objets sombres (Fig.2.33).

c. Ouverture

Comme en morphologie mathématique ensembliste, l'ouverture consiste en une érosion suivie d'une dilatation avec le même élément structurant.

$$O^B (X) = (X \ominus B) \oplus B \quad (2.35)$$

L'ouverture supprime les pics mais préserve les vallées, elle homogénéise l'image mais préserve les objets sombres (Fig.2.34)



Fig.2.33 : Dilatation de l'image de la figure (2.32) par un disque de taille 3



Fig.2.34: Ouverture de l'image de la figure (2.32) par un disque de taille 3

d-Fermeture

Comme en morphologie ensembliste, la fermeture consiste en une dilatation suivie d'une érosion.

$$f^B (X) = (X \oplus B) \ominus B \quad (2.36)$$

La fermeture comble les vallées, elle homogénéise et éclaircit l'image (Fig.2.35)

La dilatation et l'érosion modifient les niveaux de gris de manière conséquente en nombreux points de l'image et donc on ne peut pas les considérer comme des bons filtres pris séparément.



Fig.2.35 : Fermeture de l'image de la figure (2.32) par un disque de taille 3

e-Gradient morphologiques

En traitement d'image, un intérêt particulier est porté aux contours des objets qui donnent une information riche sur le contenu de l'image. Un détecteur de contour vise à mettre en évidence les hautes fréquences spatiales dans l'image. La détection de contours n'est pas propre à la morphologie mathématique. On peut distinguer deux types de détecteurs : linéaire et non linéaire. La première famille utilise la différentiation, le détecteur de Prewitt par exemple. Les détecteurs linéaires sont fréquemment suivis d'une non linéarité en sortie. C'est le cas par exemple, de détecteur de Sobel. Les détecteurs basés sur la morphologie mathématique entrent dans la catégorie des détecteurs de contours non linéaires.

Le gradient morphologique est défini comme la différence arithmétique entre la dilatation et l'érosion d'une image par un élément structurant B [1]. Ce gradient est noté ∇ :

$$|\nabla B(X)| = (X \oplus B) - (X \ominus B) \quad (2.37)$$

Il suffit donc de dilater et d'éroder l'image en niveau de gris puisque le gradient s'interprète comme l'étendue, c'est-à-dire la différence entre le max et le min (Fig.2.36).

- **Gradient par dilatation « gradient externe »**

Pour une image X , le module du gradient par dilatation avec l'élément structurant B s'obtient par la différence entre le dilaté de l'image elle-même (Fig.2.37).

$$|\nabla X^+| = (X \oplus B) - X \quad (2.38)$$



Fig.2.36 : Gradient morphologique



Fig.2.37 : Gradient externe

- **Le gradient par érosion « gradient interne »**

Pour une image X , le module du gradient par érosion avec l'élément structurant B s'obtient par la différence entre l'image et son érodée (Fig.2.38).

$$|\nabla X^-| = X - (X \ominus B) \quad (2.39)$$



Fig.2. 38: Gradient interne

- **Laplacien**

Le module du Laplacien $|\Delta X|$ d'une image X est la différence entre le module du gradient par dilatation et celui du gradient par érosion (Fig.2.39).

$$|\Delta X| = |\nabla X^+| - |\nabla X^-| \quad (2.40)$$

Comme tous gradients morphologique est sensible au bruit, il existe toutes fois des types de gradients plus élaborés appelés gradient régularisés qui permettent d'éliminer les contours les moins pertinents.



Fig.2.39: Laplacien de l'image de la figure (2.32)

f. Chapeau haut de forme

Le chapeau haut de forme est une transformation qui permet de retrouver les informations éliminée par l'ouverture, ou la fermeture morphologique. On définit la transformation du chapeau haut de forme blanc comme la différence algébrique entre la fonction de départ f et l'ouverture $O^B(f)$ tel que :

$$\text{CHFB}_B(f) = f - O^B(f) \quad (2.41)$$

On définit la transformation duale chapeau de forme noire qui est la différence algébrique entre la fermeture $F^B(X)$ et la fonction de départ f comme :

$$\text{CHFN}_B(f) = F^B(f) - f \quad (2.42)$$

La figure (2.40) illustre les différents chapeaux hauts de forme.



Fig.2.40: Chapeau haut de forme blanc (à gauche) et chapeau haut de forme noire (à droite) de l'image de la figure (2.31) avec un disque de taille 3.

Le besoin d'obtenir une image transformée conservant des informations importantes de sa structure et préservant la connexité nous amène à introduire la notion de squelette car les transformations morphologiques de base étudiées précédemment ne préservent pas la connexité.

La notion de squelette va nous permettre d'aborder deux nouvelles catégories de transformation d'images à savoir l'épaississement et l'amincissement.

Ces deux nouvelles transformations vont faire appel à des éléments structurants non convexes, ce qui va nous permettre d'introduire la notion de transformation de voisinage.

2.4.5. Notions de transformations de voisinage

Une transformation de voisinage est une généralisation de l'approche tout ou rien utilisée pour les opérateurs d'érosion et de dilatation. Elle est nécessaire pour définir le processus d'obtention d'un squelette.

Dans le cas d'un maillage hexagonal, un pixel à six voisins, et dans le cas d'un maillage carré, un pixel à huit voisins. On définit alors une configuration de voisinage en attribuant aux voisins du pixel central de la maille l'une des valeurs suivantes : 1, 0, 1 ou 0 (indifférence notée *), cette configuration de voisinage constitue ainsi un élément structurant.

2.4.5.1. Famille de voisinage

Une famille V de voisinage est un regroupement de configurations de voisinages $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$.

Ce regroupement est obtenu à partir d'une configuration partielle qui représente l'une des possibilités, les autres sont déduites par rotation de l'angle $(\pi/4)$ d'un point donné de cette configuration.

Exemple

Soit la configuration de voisinage suivante : $E = \begin{matrix} & 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * & \\ 1 & 1 & 1 & \end{matrix}$ et toutes les rotations possibles.

$$\begin{aligned} V1 &= \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}, & V2 &= \begin{matrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ * & 1 & 1 \end{matrix}, & V3 &= \begin{matrix} 0 & * & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{matrix}, & V4 &= \begin{matrix} * & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{matrix} \\ V5 &= \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}, & V6 &= \begin{matrix} 1 & 1 & * \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{matrix}, & V7 &= \begin{matrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & * & 0 \end{matrix}, & V8 &= \begin{matrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & * \end{matrix} \end{aligned}$$

$V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8$ constituent la famille de voisinage ; c'est-à-dire :

$$V = V1 \cup V2 \cup V3 \cup \dots \cup V8$$

Les transformations de voisinages permettent d'introduire deux nouvelles catégories de transformations : L'amincissement et épaisseur.

2.4.5.2. Notions d'amincissement et d'épaisseur**a-Amincissement appliqué aux images binaire**

L'amincissement d'un ensemble X par une configuration de voisinage V_X , noté $X \circ V_X$, est obtenu en mettant à zéro le point traité lorsque la configuration de voisinage est rencontrée. L'amincissement de X par une famille de voisinage V , noté $X \circ V$, est une succession d'amincissement par les configurations de voisinage de cette famille [2]. L'amincissement de X est défini par :

$$X \circ V = X \setminus (X \otimes V) \quad (2.44)$$

Où " $\setminus$ " représente la différence ensembliste.

$(X \otimes V)$ désigne la transformation en tout ou rien, dans laquelle tout pixel ayant un voisinage identique à la configuration de voisinage définie par l'élément structurant est éliminé de X .

Consiste à enlever de cet ensemble des points des bords au sens de l'élément structurant (configuration de voisinage utilisée).

b-L'épaisseur appliqué aux images binaires

L'épaisseur de l'ensemble X par une configuration de voisinage V_X , noté $X \bullet V_X$ est obtenu en mettant à 1 le point traité lorsque la configuration de voisinage est rencontrée.

L'épaississement de X par une famille de voisinage V , noté $X \bullet V$, est une succession d'épaississement par toutes les configurations de voisinage de cette famille V . L'épaississement est la transformation qui consiste à ajouter à un ensemble X l'ensemble $(X \otimes V)$:

$$X \bullet V = X \cup (X \otimes V) \quad (2.43)$$

Tout pixel ayant un voisinage identique à la configuration de voisinage définie par l'élément structurant est ajouté à X .

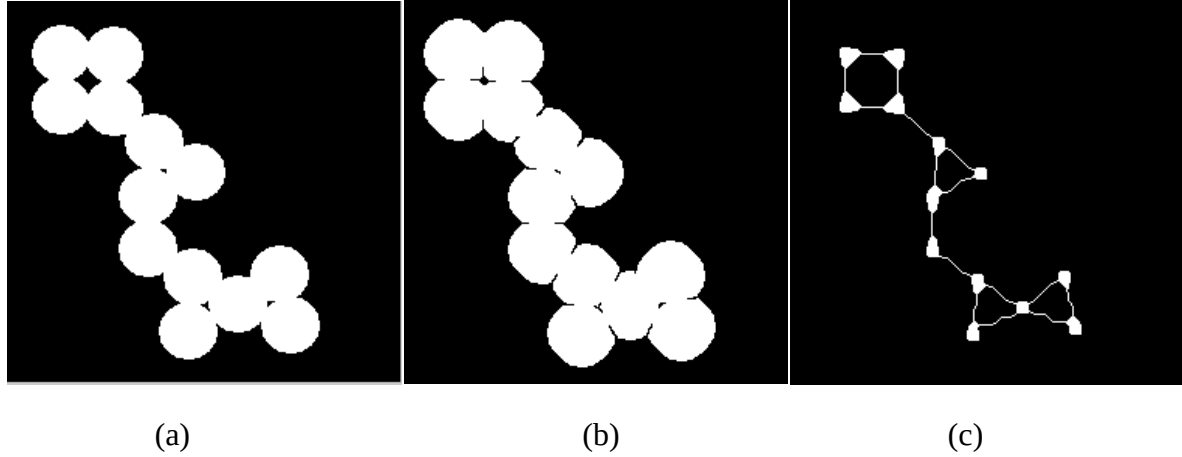


Fig.2. 41: Exemple d'épaississement (b) et d'amincissement (c) d'une image binaire(a)

L'épaississement et l'amincissement sont deux opérations duales vis-à-vis de la complémentation.

Amincir un ensemble X ou épaissir son complémentaire X^c sont deux opérations équivalentes :

$$(X \otimes V)^c = X^c \bullet V^c \quad (2.44)$$

2.4.6. La squelettisation

Le squelette est une représentation d'une forme très utilisée car il conserve les propriétés topologiques de la forme qu'il représente.

La squelettisation est une étape essentielle de la reconnaissance de forme. Elle a pour but de décrire chaque objet par un ensemble de lignes infiniment fines (analogue à une ossature de l'objet), réduisant le volume d'information à manipuler. Le squelette est homotopique à l'objet de départ.

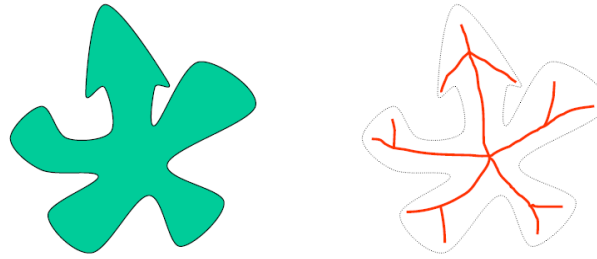


Fig.2.42 : Exemple de squelette

On présente également le squelette comme étant les lieux des centres des boules maximales incluses dans l'objet (Fig.2.43).

Soit X un ensemble et δX sa frontière, un point s de X appartiendra au squelette de X , noté $Sq(X)$, si la distance euclidienne de s à δX est atteinte en au moins deux points distincts de X :

$$s \in Sq(X) \Leftrightarrow \exists y_1, y_2 \in \delta X, y_1 \neq y_2 \quad \text{tel que:} \\ d(s, \delta X) = d(s, y_1) = d(s, y_2) \quad (2.45)$$

Une boule maximale touche la frontière de X en au moins deux points de X distincts.

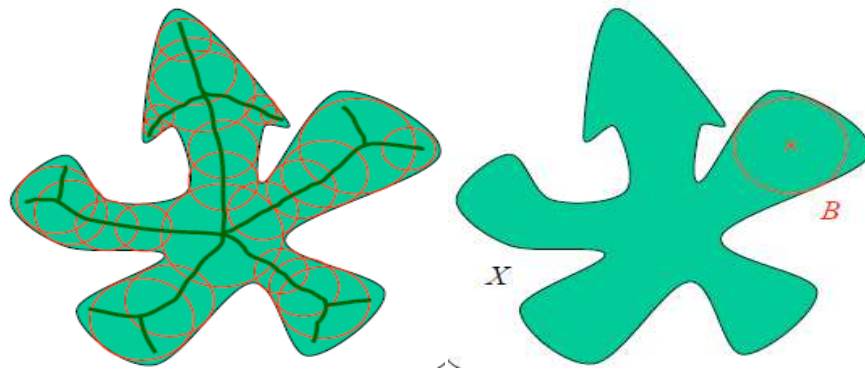


Fig.2.43: Illustration de la définition de squelette.

Le squelette est une transformation morphologique qui est aussi obtenue par itération d'amincissement jusqu'à se que l'on atteigne l'idempotence. Le résultat obtenu dépend de l'élément structurant est des irrégularités des contours des objets.

La figure (2.44) suivante illustre quelques exemples de squelettes.

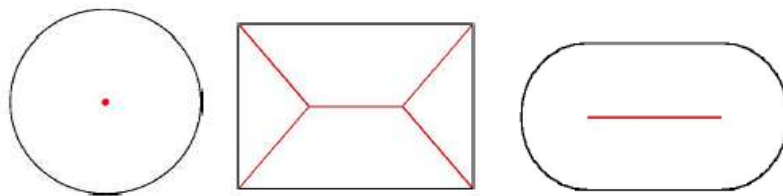


Fig.2.44: Exemple de squelette

Propriétés de la squelettisation

- La squelettisation n'est pas une transformation croissante (ni décroissante), en effet, $X \subset Y$ n'entraîne généralement pas $Sq(X) \subset Sq(Y)$.
- La squelettisation est une transformation anti-extensive : on a : $Sq(X) \subset X$..
- La définition du squelette à partir des boules maximales permet de constater que la squelettisation est une transformation idempotente.
- Une propriété topologique intéressante de la squelettisation est l'homotopie, dans

R^2 , si X est ouvert topologique on a : $N2(X) = N2(Sq(X))$.

2.5. Conclusion

L'objectif d'une détection de niveau automatique, principalement d'un produit liquide est souvent de garantir un niveau élevé de la qualité et de la fiabilité dans de nombreux secteurs industriels (agroalimentaire, agronomie, chimie, produit pharmaceutiques,...).

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue toutes les méthodes de détection d'un niveau existantes. Nous avons montré que ces techniques ne peuvent pas s'appliquer à la mesure du niveau d'eau dans un infiltromètre à disque sans modifier l'infiltromètre ou fausser sa mesure ou son réglage.

Pour éviter ces inconvénients, nous avons proposé de détecter ou de lire le niveau d'un liquide par un système de vision artificielle. Les composantes matérielles de ce système (caméra, systèmes d'éclairage) ont été présentées.

La détection ou la lecture d'un niveau par vision artificielle nécessite des techniques ou de théories de traitement d'images. Parmi ces théories, nous nous sommes intéressés à la morphologie mathématique qui nous fournit toute une panoplie d'outils qui conviennent à l'application visée et qui est la lecture d'un niveau d'un liquide dans le réservoir d'alimentation de l'infiltromètre à disque.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire toutes les étapes nécessaires pour la détection de niveau d'un liquide dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque par l'intermédiaire d'un système de vision qui comprend une caméra et un ordinateur.

3-1-Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire une méthode de détection de niveau d'un liquide dans le réservoir d'alimentation de l'infiltromètre à disque d'une manière automatique par un système de vision artificiel qui comprend une caméra et un ordinateur. Cette méthode fait appel à des outils de traitement d'images comme ceux présentés dans le chapitre 2. L'application a été réalisée sous Matlab 2012.

3.2- Système de mesure de niveau d'eau dans un infiltromètre à disque

La mesure de l'infiltration par un infiltromètre à disque consiste à lire le niveau d'eau à des instants différents sur le réservoir principal gradué par un système de vision.

Le schéma synoptique de ce système est illustré par la figure (3.1).

L'infiltromètre est destiné à être utilisé pour mesurer l'infiltration d'un sol en milieu naturel ou dans un laboratoire. Son environnement peut être donc variable et changeant.

Dans les deux cas, pour faciliter les différents traitements de détection du niveau, il est primordial d'acquérir des images nettes indépendamment du milieu dans lequel l'infiltromètre est utilisé. A cet effet, nous avons été amenés à créer un dispositif d'éclairage.



Fig.3.1 : acquisition d'image par une caméra

3.2.1- Dispositif d'éclairage

Le but de ce dispositif est de faciliter les traitements ultérieurs des images de l'infiltromètre en imposant d'une part au fond de l'image d'être fixe et à minimiser l'effet de la luminosité ambiante d'autre part. En effet le réservoir gradué sur lequel le niveau de l'eau doit être détecté est en verre et transparent.

Le fond de l'image peut contenir des informations qui peuvent être confondus avec le niveau de l'eau est donc gêner sa détection. Aussi, des sources lumineuses se trouvant aux alentours de l'infiltromètre peuvent créer des reflets sur le verre du réservoir.

Ainsi, pour éviter tous ses problèmes, nous avons entouré l'infiltromètre sur trois cotés d'un fond blanc à l'aide de tissus (draps) blanc (Fig.3.2). La caméra est disposée en face de

l'infiltromètre du côté non fermé. Ce côté ainsi que le dessous de l'infiltromètre sont laissés ouverts afin d'avoir des images non sombres et disposer d'une lumière ambiante assez suffisante pour fournir des images nettes et claires.



Fig.3.2 : Dispositif d'éclairage

Le dispositif peut donc fonctionner sous la lumière du jour (milieu naturel) ou sous une lumière artificielle blanche fournie par des néons (laboratoire).

Le dispositif doit se tenir à un endroit qui permet d'avoir assez de lumière pour avoir une image de bonne qualité et sans reflets.

3.2.2- Choix de la caméra

Le choix de la caméra est aussi important que le dispositif d'éclairage. Nous avons testé plusieurs caméras, Webcam, mais les images fournies sont de mauvaise qualité. Finalement, nous avons opté pour une caméra canon IXUS 132 ayant les caractéristiques suivantes :

Capteur CCD 1/2.3
Résolution de 16 méga pixels
Zoom optique 8x
Zoom numérique 4x
Focale 5-40 mm
Ouverture f/3.2 – f/6.9
Formats image : JPEG
Mode rafale environ 8 vue / seconde
Format vidéo : MOV
Niveau de qualité (HD) 1280x720, 25im/s, (L) 640x480, 30 im/s
Taille d'écran 2.7 (6.8 cm)
Résolution 230 000 pixels
Poids environ 133g
Dimension 92.9x52.4x21.6 mm

La caméra est disposée à une distance de 30 cm de l'infiltromètre afin de fixer dans son objectif la zone d'intérêt qui est le réservoir gradué dans lequel se trouve le niveau d'eau à détecter.

La figure (3.3) montre comme exemple une image de l'infiltromètre acquise par la caméra dans le laboratoire. On peut remarquer que le fond de l'image est blanc, que les graduations et les chiffres sont clairs et visibles et que le niveau d'eau est bien mis en évidence. Cette image qui est de dimension (1271 x156), contient le réservoir principal ainsi que le réservoir secondaire.



Fig.3.3 : Image couleur de l'infiltromètre à disque.

3.2.3. Méthodologie

Après avoir remplir les deux réservoirs d'eau, on a remarqué que le niveau d'eau apparait avec une couleur grise légèrement différente de la couleur d'eau. Pour extraire le niveau dans ce cas est très difficile. A cet effet nous avons été ramené à ajouter un colorant jaune à l'eau afin de faciliter les traitements et d'extraire facilement le niveau d'eau sur le réservoir d'alimentation de l'infiltromètre à disque.

La première phase dans tout traitement d'images consiste à acquérir les images à traiter à l'aide d'un appareil photo où d'une caméra. On peut donc utiliser deux stratégies:

La première (off line) : consiste à enregistrer la séquence d'images afin de les traiter par la suite. Dans ce cas la cadence d'acquisition est de 1/25

La seconde (on line) : consiste à traiter les images au fur et à mesure de leur acquisition. Dans ce cas on peut régler l'intervalle d'acquisition Δt de manière à ce que le Δt soit petit

au début de l'application car la descente du niveau d'eau est trop rapide. Mais dès que le sol est proche de la saturation, le temps de descente de niveau d'eau est très lent donc Δt doit être élevé.

Pour notre application, nous avons utilisé la première stratégie.

Pour calculer le niveau exact, nous avons procédé de la manière suivante :

D'abords, on prélève manuellement le niveau initial d'eau (l'ordonnée x_i en nombre de pixels) sur la première image de la séquence.

Une fois que le niveau est détecté on calcule son centre de gravité, soit x_f l'ordonnée en nombre de pixels.

La distance en pixels entre le niveau initial x_i et le niveau détecté x_f est alors :

$$\Delta x = x_f - x_i$$

Sachant que la distance entre les ordonnées de deux chiffres en pixels (centre de gravité de deux objets correspondant aux deux premiers chiffres) est d :

$$d = |x_2 - x_1|$$

Cette étape est effectuée initialement sur la première image de la séquence.

Pour calculer le niveau détecté en millimètre, il suffit simplement d'effectuer le principe de la règle de trois comme suit :

$$d \rightarrow 10mm$$

$$\Delta x \rightarrow x$$

$$\Rightarrow x = \frac{\Delta x * 10}{d} \text{ (en mm)}$$

Notons que la valeur 10 de d représente l'unité en mm entre deux chiffres sur le réservoir de l'infiltromètre à disque.

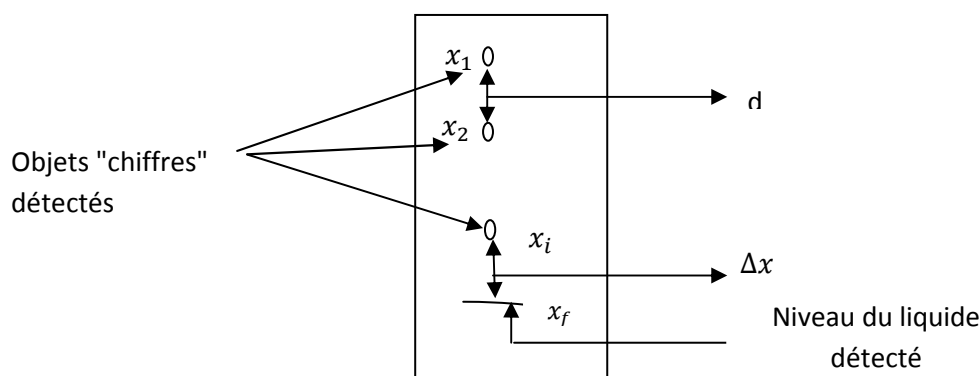


Fig.3.4 : Illustration du calcul du niveau du liquide détecté

Les étapes de cette méthode sont regroupées dans l'organigramme de la figure (3.5)

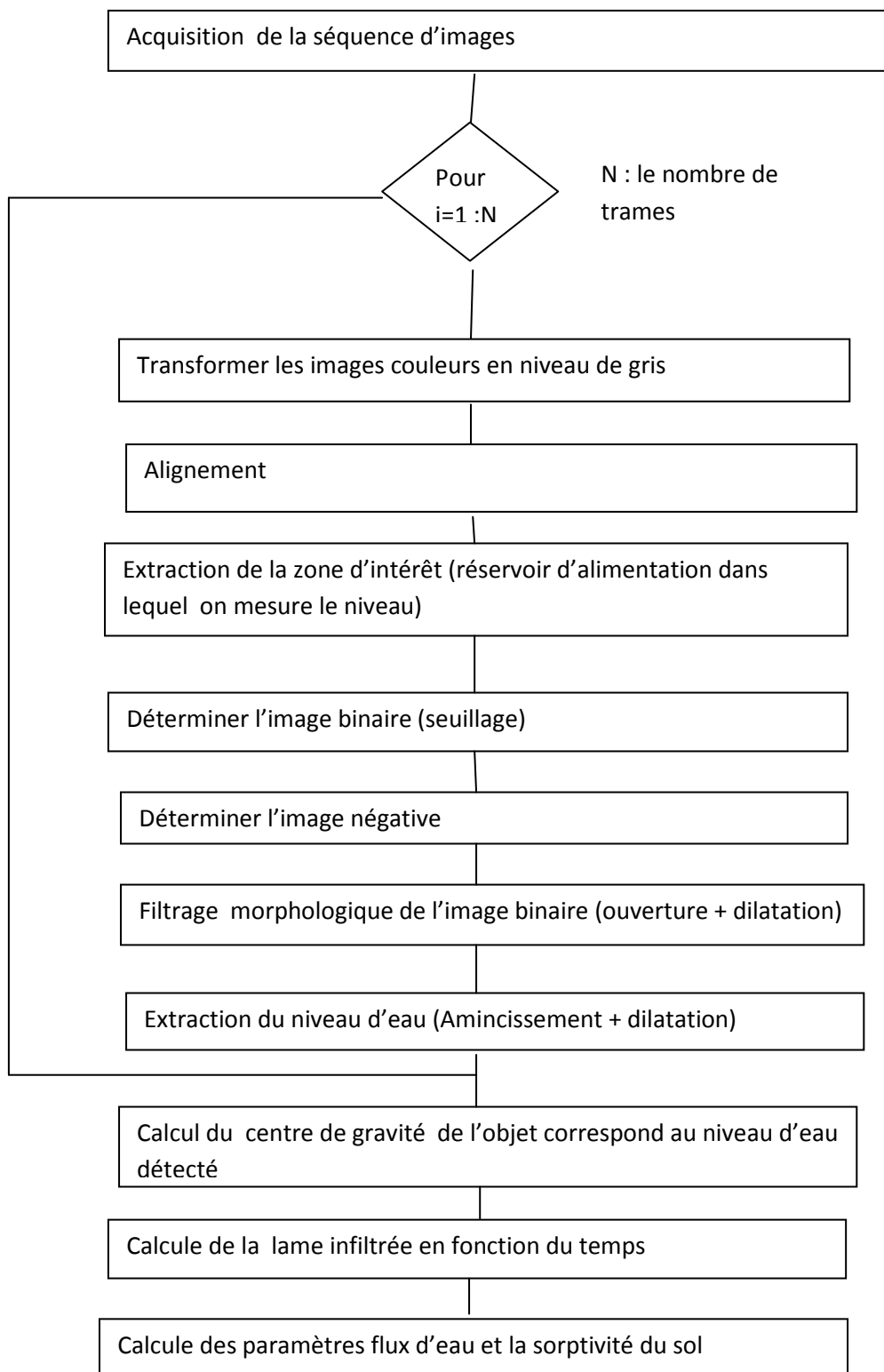


Fig.3.5 : Organigramme de la méthode

3.3. Les différentes étapes de la méthode

Acquisition d'image

C'est la première étape dans tout traitement d'images consiste à acquérir l'image à traiter à l'aide d'un appareil photo ou d'une caméra. Dans notre application, les images sont acquises à l'aide de la caméra canon XUS 132 par l'enregistrement de la vidéo puis la convertir à une séquence d'images ayant une résolution 16 Méga pixels. La figure (3.6) montre une séquence d'images acquises de l'infiltromètre à disque rempli d'eau. La première image de cette séquence nous servira d'exemple pour illustrer toutes les étapes de la méthode que nous proposons. Sur cette image, on distingue clairement le niveau d'un liquide ainsi que les chiffres et les graduations du réservoir principal. Notons que le liquide apparaît avec une couleur noir. La lecture (œil humaine) nous donne un niveau égal à 249mm.

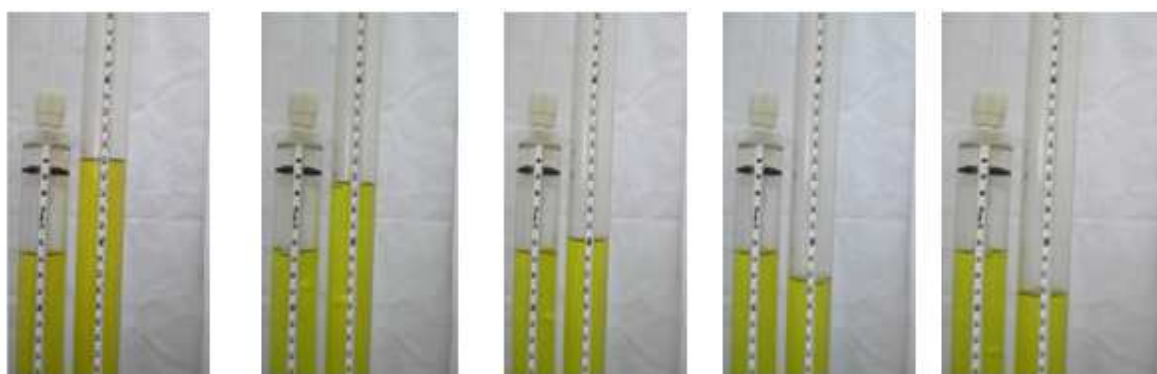


Fig.3.6 : quelques images de la séquence de l'infiltromètre à disque

Image en niveau de gris

L'image couleur obtenue après acquisition contient un nombre très élevé d'informations. A fin de réduire la quantité d'informations et faciliter les traitements, il est nécessaire de convertir l'image couleur en une image en niveau de gris. Dans ce cas, nous avons utilisé la formule suivante : $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ où R, G, B représentent les composantes couleurs rouge, vert et bleu de chaque pixel de l'image. Y étant la luminance ou niveau de gris du pixel correspondant. L'image en niveau de gris de la première l'image couleur de la figure (3.6) est représentée dans la figure (3.7). Cette image de taille (2160x1280) est codée sur 8 bit contient donc 256 niveaux de gris.

L'image en niveau de gris laisse apparaître le niveau du liquide, les chiffres ainsi que les graduations des réservoirs avec une couleur noir, alors que le fond et le verre des réservoirs apparaissent avec une couleur grise.

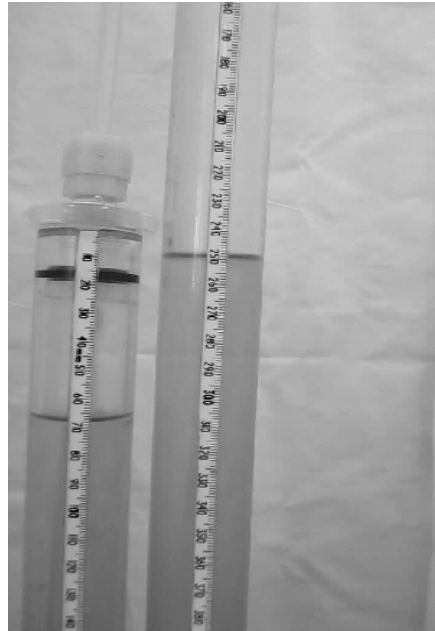


Fig.3.7 : Image en niveaux de gris de l'infiltrmètre à disque

Alignement de l'image

L'image de la figure (3.7) n'est pas droite car en déposant l'infiltrmètre sur le sol à étudié celui-ci peut être déséquilibré. Pour aligner cette image on applique une opération qui consiste à effectuer une rotation de 2° (cet angle de rotation dépend de l'inclinaison de l'infiltrmètre). Le résultat de cette opération est illustré sur la figure (3.8).



Fig.3.8 : Image alignée

Extraction de la zone d'intérêt

La figure (3.8) contient les deux réservoirs de l'infiltromètre. Or le niveau que nous devons mesurer est celui du réservoir principal (tube à droite). Il est alors nécessaire d'extraire de l'image la zone d'intérêt (réservoir principal) et ignorer les autres régions de l'image (Fig.3.9).

Image binaire

Pour extraire le niveau du liquide du réservoir principal de l'infiltromètre à disque, il est nécessaire de convertir l'image en niveau de gris en une image binaire. Pour cela, nous avons procédé au seuillage de l'image avec une valeur de seuil s égale à 102 :

$$I_b = \begin{cases} 255 & \text{si } I_n \geq s = 102 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

I_n : image en niveau de gris (Fig.3.9)

Ce seuil est fixé manuellement. Sa valeur a été déterminée après plusieurs tests impliquant plusieurs images. Sur l'image de la figure (3.10), on distingue le niveau du liquide, les chiffres et quelques graduations. Les graduations peuvent être assimilées à du bruit.

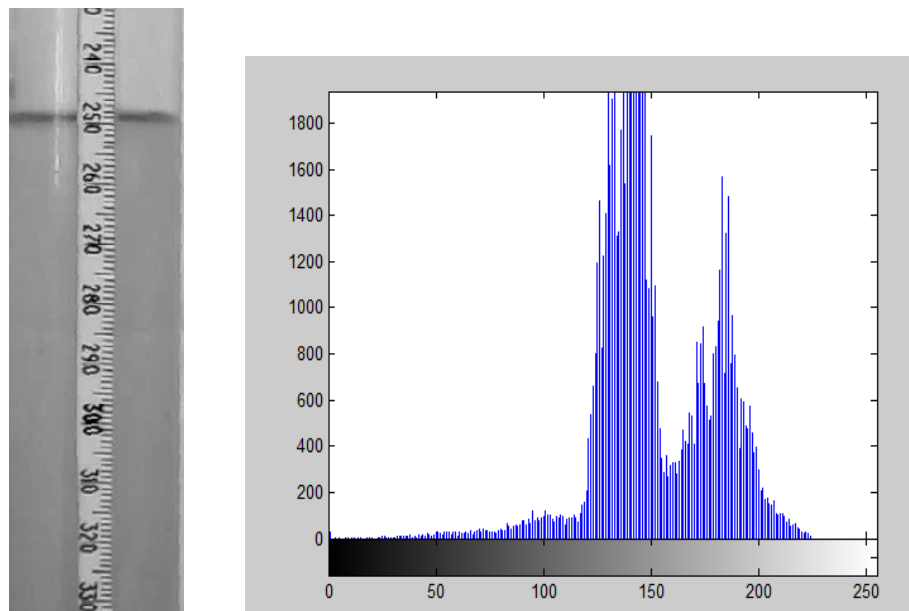


Fig.3.9 : Extraction de la zone d'intérêt (réservoir principal dans lequel on mesure le niveau) et son histogramme

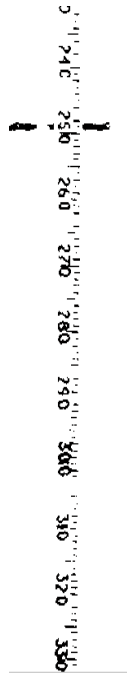


Fig.3.10: image binaire trouvée par seuillage

La binarisation de l'image laisse apparaître le niveau du liquide, les chiffres et les graduations) en noir sur un fond blanc. Nous assimilons ces informations à des objets. Habituellement, les objets sont en blanc et le fond en noir. Pour obtenir une telle image, il suffit de faire le négative de l'image de la figure (3.10). Le résultat est donné sur la figure (3.14)



Fig.3.11 : Image négative

Filtrage morphologique de l'image binaire

Pour éliminer le bruit apparu sur l'image binaire et garder que les informations pertinentes utiles à la lecture du niveau (niveau du liquide uniquement), nous avons utilisé les outils de la morphologie mathématique, c'est-à-dire des opérateurs morphologiques. Cette opération consiste à appliqué une ouverture suivie d'une dilatation. L'ouverture est effectuée avec un élément structurant de forme rectangulaire de taille [5 8] pour éliminer les graduations et les chiffres et ne laisser que le niveau d'eau. La dilatation est effectuée avec un élément structurant de forme rectangulaire de taille [10 10] pour agrandir le niveau d'eau (Fi .3.12)



Fig.3.12 : Opérations morphologiques de l'image binaire
(a) : Ouverture, (b) : Ouverture suivi d'une dilatation

Extraction du niveau du liquide

Pour extraire juste le niveau du liquide, il faut pouvoir extraire sur l'image un seul objet correspondant au niveau complet du liquide. Cependant, à l'issu du filtrage, le niveau du liquide peut être discontinu comme on peut le voir sur la figure (3.12). Ainsi pour rattacher les deux objets qui apparaissent sur l'image de la figure (3.12.b), il suffit d'appliquer une dilatation avec un élément structurant de forme rectangle de taille [5 66], le résultat de cette opération est illustré sur la figure (3.13)



Fig.3.13 : Niveau du liquide détecté

Dans certains cas, suite à l'infiltration du liquide dans le sol des bulles d'air remontent à la surface du réservoir principal. Dans ce cas, l'extraction du niveau de liquide à l'aide d'une opération de dilatation n'est pas suffisante. Nous avons ainsi appliqué une opération d'amincissement suivi d'une dilatation. L'amincissement est effectué par un nombre infini d'itérations, par contre la dilatation est effectuée avec un élément structurant de forme rectangulaire de taille [20 20]. La figure (3.14) illustre ce cas.

Calcul du centre de gravité du niveau

A partir de tous les pixels appartenant au niveau du liquide détecté (zone blanche sur la figure (3.14.b)), on calcul le centre de gravité de cette zone :

$$x_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

x_i : L'ordonnée d'un pixel blanc

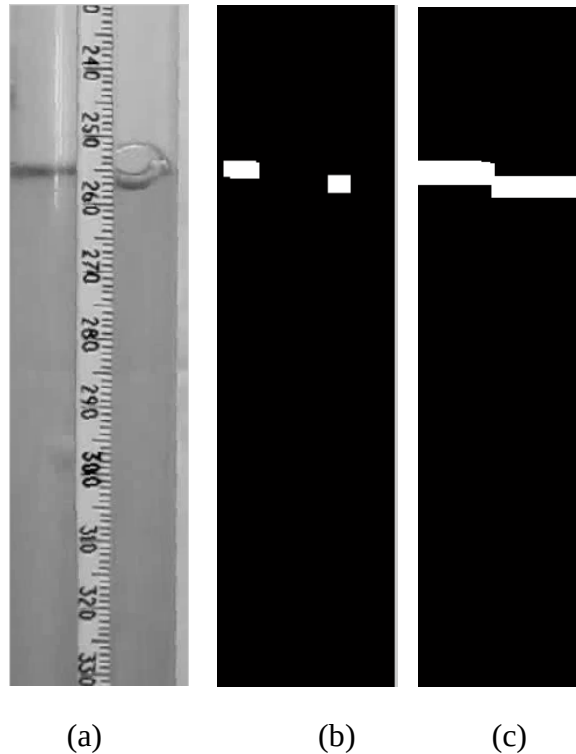


Fig.3. 14: Résultat de l'opération amincissement + dilatation
 (a) Image avec bulle d'aire, (b) Niveau du liquide détecté avec une seule dilatation, (c) Niveau du liquide détecté avec l'opération d'amincissement et de dilatation

Calcul de la valeur du niveau de liquide détecté

Pour calculer la valeur du niveau du liquide détecté en mm, on procède selon la procédure détaillée au paragraphe.3.3

Le niveau initial étant connu, il est déterminé sur la première image de la séquence. Il égal à $N_i = 249$ mm pour notre séquence test et correspond au nombre de pixels $x_i = 106$ pixels.

Sur la première image de la séquence de test (Fig.3.6), nous avons déterminé la valeur d entre deux chiffres égale à 57 pixels.

Pour calculer le niveau exact en millimètre, il suffit d'effectuer le principe de la règle de trois comme suit :

10mm $\rightarrow$ 57 pixels

$g \rightarrow x_f - x_i$

Soit :

$$g = \frac{(x_f - x_i) * 10}{57} \text{ mm}$$

La figure (3.15) montre quelques images (zones d'intérêt) de la séquence de test. Les niveaux détectés par les différents traitements sont représentés sur la figure (3.16). les centres de gravité des niveaux détectés sont indiqués sur les images par (*). La figure (3.17) montre les distances entre le niveau initial et les niveaux finaux détectés. La valeur du niveau détecté est en mm est également affiché.

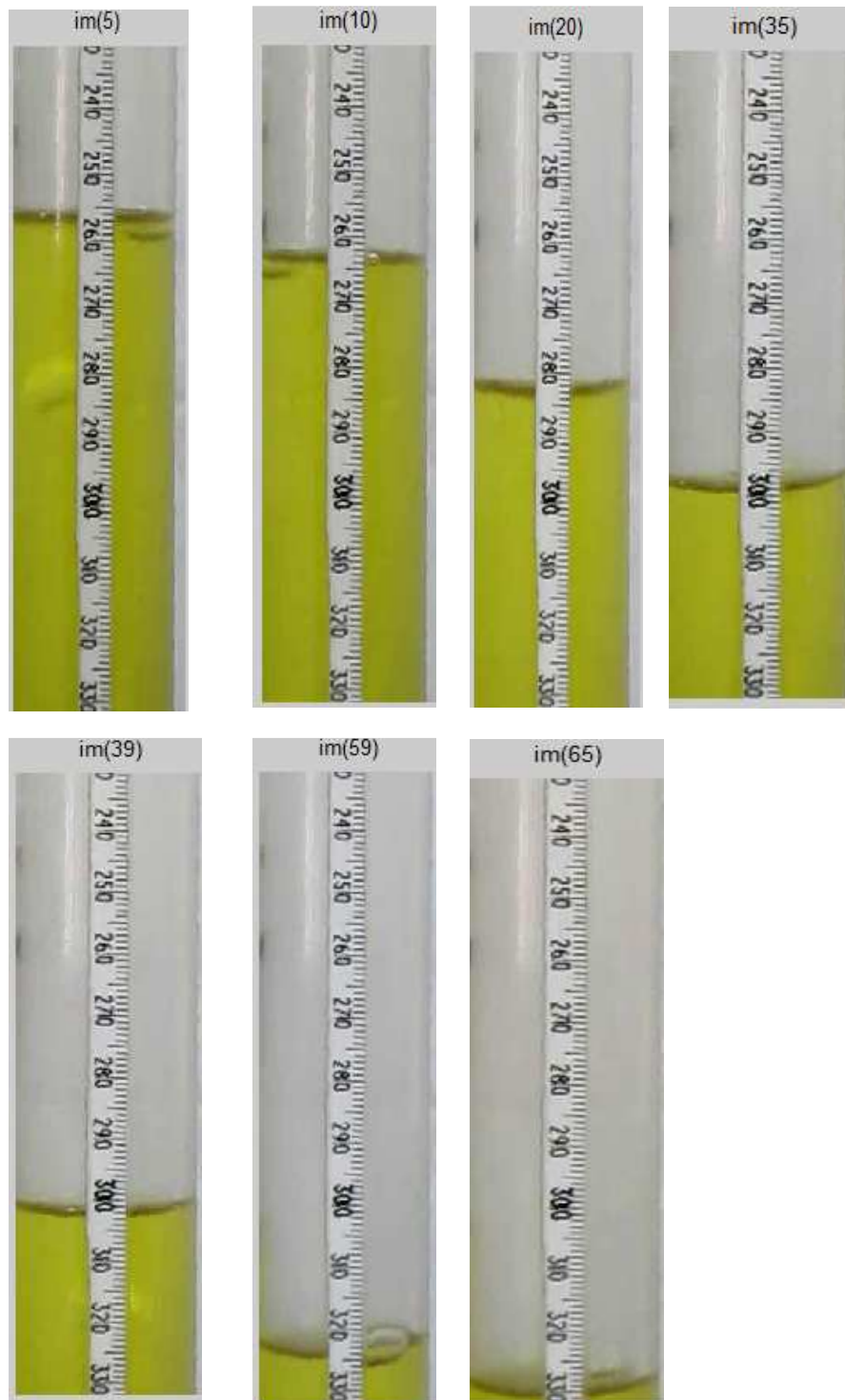


Fig.3.15: Zones d'intérêt de quelques images de la séquence de test.

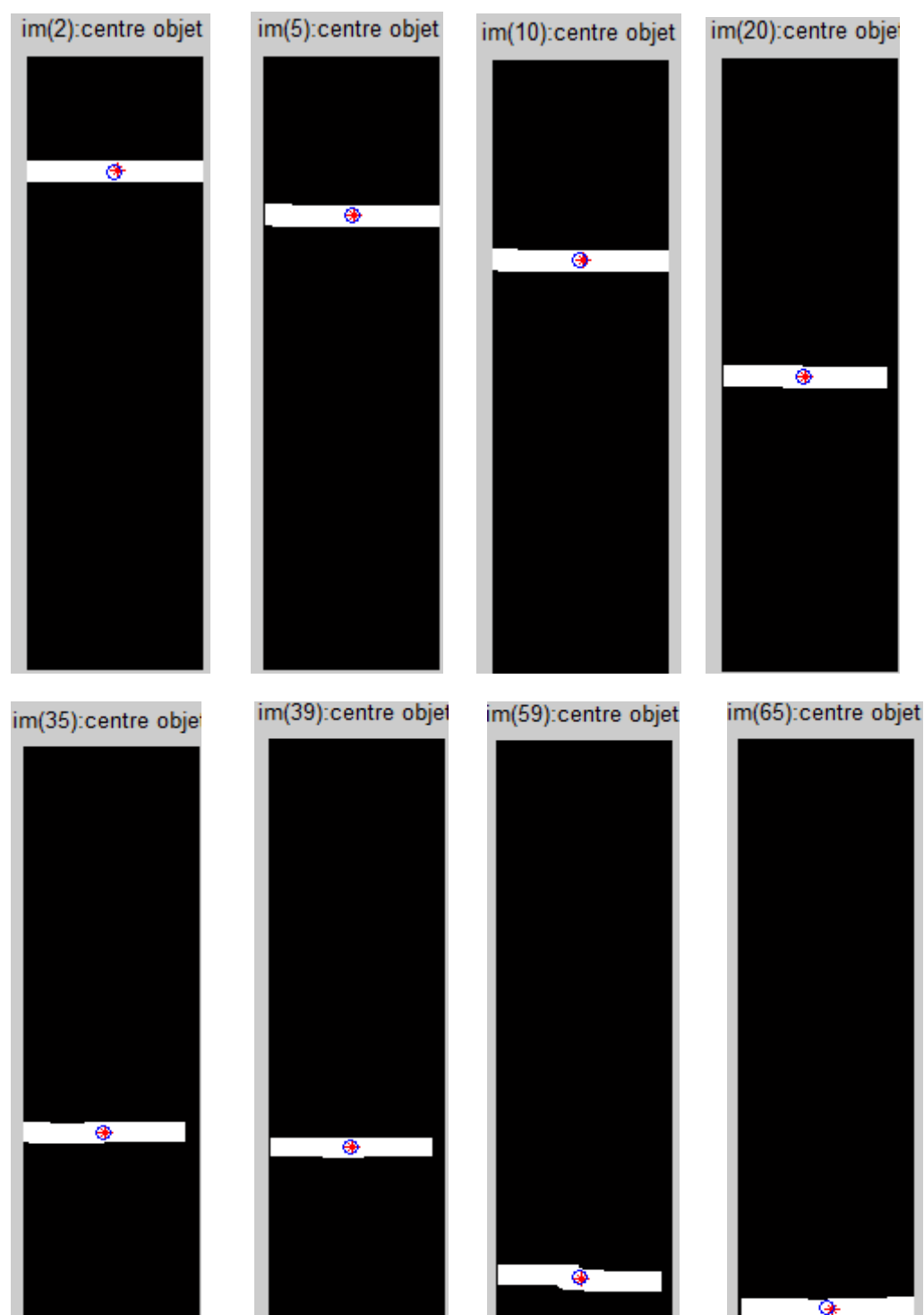


Fig.3.16 : Niveaux détectés par notre méthode sur les images de la figure (3.15)

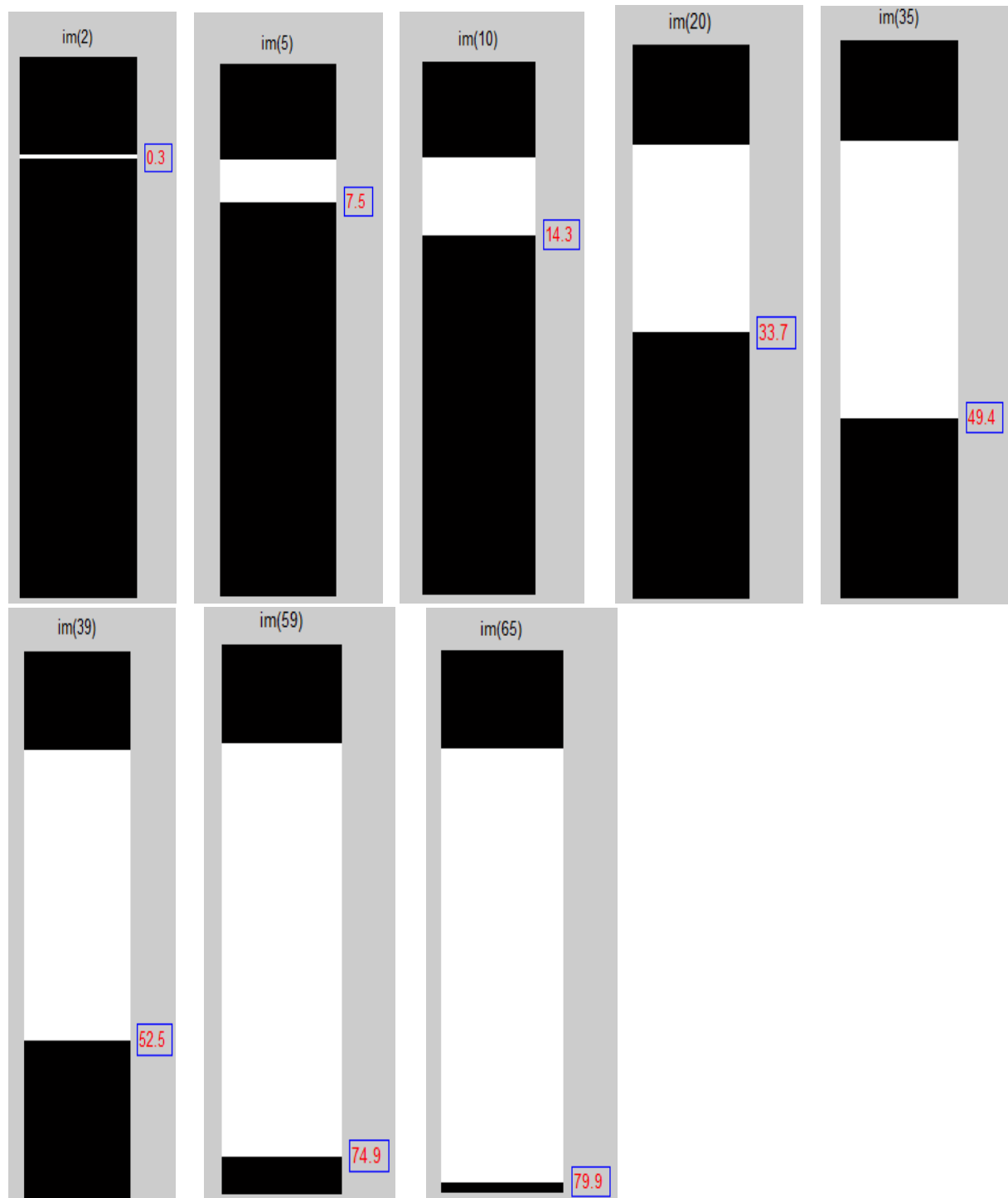


Fig.3.17 : Valeurs du niveau d'eau déterminées par notre système de vision

3.4.Tests et résultats

Après avoir rempli les réservoirs d'eau (réservoir principal et Vase de Mariotte) et regularisé la pression du vase de Mariotte (fixer la pression à une valeur donnée et qui correspond à un niveau en mm sur le vase de Mariotte), nous avons disposé l'infiltromètre dans le système d'éclairage et procédé au réglage de la caméra puis à l'exécution du programme de détection de niveau élaboré, sur toute la séquence enregistrée.

Nous avons ensuite calculé la lame infiltrée à partir des valeurs des niveaux détectés (lames mesurées) comme suit :

$$\text{Lame infiltré} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \text{ lame mesurée}$$

Pour infiltromètre utilisé, on a :

d : Rayon du reservoir d'alimentation (2cm)

D : Rayon de la membrane (4cm)

La lame infiltrée est alors égale à 0.25 de lame mesurée

Pour évaluer notre approche, nous avons comparé les valeurs de la lame infiltrée obtenus avec notre méthode avec ceux relevés d'une manière manuelle (œil nu).

a) Mesure du niveau d'eau infiltré d'une manière manuelle

Le tableau (3.1) regroupe les valeurs lues manuellement pour une pression d'eau $h = -100$ mm.

L0 représente le niveau lu sur le réservoir, $\Delta L0$ représente la différence entre le niveau lu à l'instant $t+1$ et t , L1 représente le niveau mesuré sur le réservoir principal de l'infiltromètre a disque (différence entre le niveau à l'instant t et celui de l'instant $t_0 = 0$) et L2 représente le niveau infiltré à travers la membrane de l'infiltromètre a disque.

t(s)	$\sqrt{t}$	L0(mm)	$\Delta L0$	L1 (mesuré) mm	L2 (infiltré) mm
0	0	249	0	0	0
3	1.73	250	1	1	0.25
6	2.44	251	1	2	0.5
9	3	255	4	6	1.5
12	3.46	257	2	8	2
15	3.87	258	1	9	2.25
18	4.24	260	2	11	2.75
21	4.58	261	1	12	3
24	4.89	263	2	14	3.5
27	5.19	264	1	15	3.75
30	5.47	265	1	16	4
33	5.74	267	2	18	4.5
36	6	268	1	19	4.75
39	6.24	270	2	21	5.25
42	6.48	271	1	22	5.5
45	6.70	272	1	23	5.75
48	6.92	275	3	26	6.5
51	7.14	280	5	31	7.75

54	7.34	281	1	32	8
57	7.54	283	2	34	8.5
60	7.74	284	1	35	8.75
63	7.93	285	1	36	9
66	8.12	286	1	37	9.25
69	8.30	287	1	38	9.5
72	8.48	289	2	40	10
75	8.66	290	1	41	10.25
78	8.83	291	1	42	10.5
80	8.94	292	1	43	10.75
83	9.11	293	1	44	11
86	9.27	294	1	45	11.25
89	9.43	295	1	46	11.5
92	9.59	296	1	47	11.75
95	9.74	298	2	49	12.25
98	9.89	299	1	50	12.5
101	10.05	300	1	51	12.75
104	10.19	301	1	52	13
107	10.34	301	0	52	13
110	10.48	302	1	53	13.25
113	10.63	303	1	54	13.5
116	10.77	304	1	55	13.75
119	10.90	305	1	56	14
122	11.04	306	1	57	14.25
125	11.18	307	1	58	14.5
128	11.31	308	1	59	14.75
131	11.44	311	3	62	15.5
134	11.57	312	1	63	15.75
137	11.70	313	1	64	16
140	11.83	314	1	65	16.25
143	11.95	315	1	66	16.5
146	12.03	317	2	68	17
149	12.20	318	1	69	17.25
152	12.32	319	1	70	17.5
155	12.52	320	1	71	17.75
158	12.56	321	1	72	18
161	12.68	322	1	73	18.25
164	12.80	323	1	74	18.5
167	12.92	324	1	75	18.75
170	13.03	325	1	76	19
173	13.15	327	2	78	19.5
176	13.26	328	1	79	19.75

179	13.37	329	1	80	20
182	13.49	330	1	81	20.25
185	13.60	330	0	81	20.25
188	13.71	331	1	82	20.5
191	13.82	332	1	83	20.75
194	13.92	333	1	84	21

Tableau.3.1 : Valeurs du niveau d'eau mesuré manuellement

b) Mesure du niveau d'eau infiltré d'une manière automatique

Le tableau (3.2) regroupe les valeurs des niveaux détectés automatiquement par notre technique pour une pression d'eau $h = 100$ mm.

L1 représente le niveau d'eau mesuré sur le réservoir principal de l'infiltromètre à disque et L2 représente le niveau d'eau infiltré à travers la membrane de l'infiltromètre à disque.

t(s)	$\sqrt{t}$	L1 (mesuré) mm	L2(infiltré) mm
0	0	0	0
3	1.73	0.3	0.075
6	2.44	1.9	0.47
9	3	7.5	1.87
12	3.46	7.5	1.87
15	3.87	9.2	2.3
18	4.24	10.4	2.6
21	4.58	11.5	2.87
24	4.89	13.4	3.35
27	5.19	14.3	3.57
30	5.47	16.3	4.07
33	5.74	17.2	4.3
36	6	19.8	4.94
39	6.24	20.9	5.22
42	6.48	22.8	5.7
45	6.70	23.1	5.77
48	6.92	25.4	6.35
51	7.14	31.0	7.75
54	7.34	32.5	8.12
57	7.54	33.6	8.4
60	7.74	34.6	8.65
63	7.93	36.5	9.12
66	8.12	37.6	9.4
69	8.30	39.0	9.75
72	8.48	39.7	9.92
75	8.66	40.7	10.17

78	8.83	41.9	10.47
80	8.94	42.6	10.65
83	9.11	43.5	10.87
86	9.27	45.5	11.37
89	9.43	46.3	11.57
92	9.59	46.4	11.6
95	9.74	48.0	12
98	9.89	49.2	12.3
101	10.05	50.1	12.5
104	10.19	50.8	12.7
107	10.34	51.7	12.92
110	10.48	52.3	13.07
113	10.63	53.9	13.47
116	10.77	54.3	13.57
119	10.90	56.5	14.12
122	11.04	56.9	14.22
125	11.18	57.4	14.35
128	11.31	58.4	14.6
131	11.44	61.2	15.3
134	11.57	61.9	15.47
137	11.70	63.1	15.77
140	11.83	64.2	16.05
143	11.95	64.7	16.17
146	12.03	66.6	16.65
149	12.20	67.5	16.87
152	12.32	68.2	17.05
155	12.52	69.4	17.35
158	12.56	70.1	17.52
161	12.68	71.1	17.77
164	12.80	72.7	18.17
167	12.92	73.0	18.25
170	13.03	73.0	18.25
173	13.15	74.6	18.65
176	13.26	74.8	18.7
179	13.37	75.3	18.82
182	13.49	77.2	19.3
185	13.60	78.8	19.7
188	13.71	79.7	19.92
191	13.82	80.03	20
194	13.92	80.03	20

Tableau.3.2 : Valeurs du niveau d'eau mesuré automatiquement par notre méthode.

La figure (3.18) montre l'allure en fonction du temps des lames infiltrées mesurées manuellement et par notre méthode.

Les valeurs des lames infiltrées obtenues par notre système de vision sont proches de celles relevées manuellement (à l'œil nu).

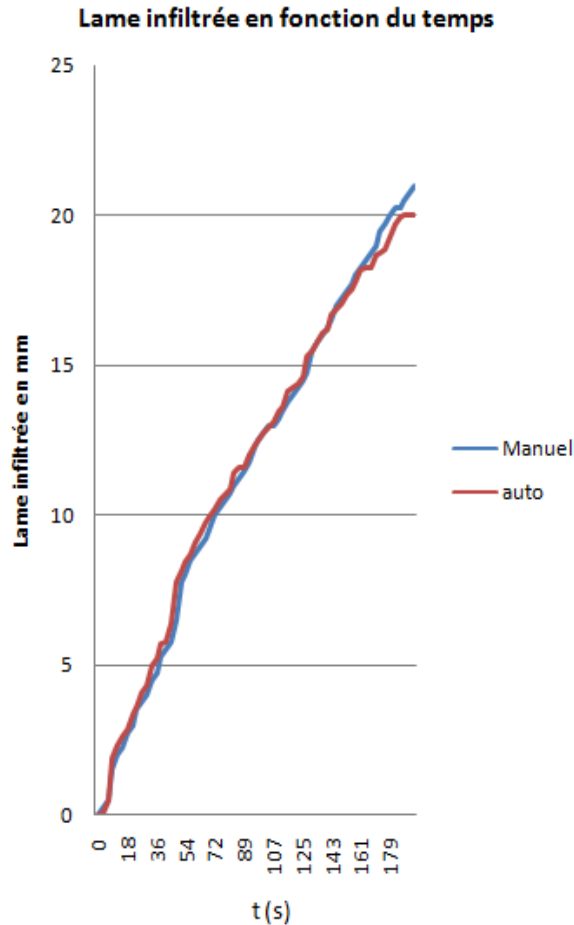


Fig.3.18: Représentation de lame infiltrée en fonction du temps d'une manière automatique et manuelle

Le flux d'eau dans le sol $q_{\infty}(h_0)$ pour une pression $h_0 = -100\text{mm}$ est calculé à partir de la figure (3.18) sur un intervalle du temps : $\Delta t = 3\text{ s}$ ($[3\text{s } 6\text{s}]$).

Avec les mesures effectuées automatiquement, nous obtenons :

$$q_{\infty}(h_0) = 0.131\text{ mm/s d'une manière automatique.}$$

Et avec les mesures relevées, nous obtenons :

$$q_{\infty}(h_0) = 0.083\text{ mm/s d'une manière manuelle.}$$

Les valeurs des deux flux sont proches.

La figure (3.19) montre les allures des lames infiltrées en fonction de $\sqrt{t}$.

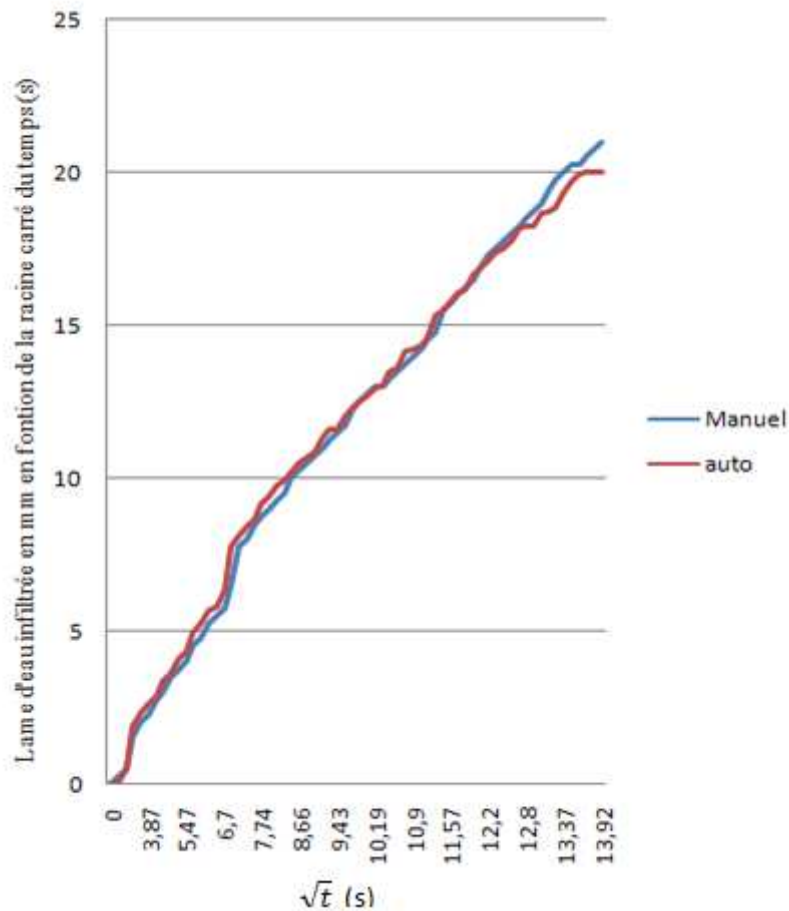


Fig.3.19 : Représentation de lame infiltrée par rapport à la racine carrée du temps d'une manière automatique et manuelle

A partir de ces courbes, on détermine la sorptivité (s) du sol pour une pression $h_0 = -100\text{mm}$. Elle est calculée sur un intervalle de temps

La sorptivité du sol pour une pression $h_0 = -100\text{mm}$ est calculée à partir de la figure (3.19) sur un intervalle de temps $[0 \ 2,44\text{s}]$ $\Delta t = 2,44\sqrt{s}$.

$S = 0,192 \text{ mm}/\sqrt{s}$, par notre méthode.

$S = 0,204 \text{ mm}/\sqrt{s}$, par la méthode manuelle.

Les deux valeurs sont également proches.

3.5. Conclusion

Nous avons décrit en détails dans ce chapitre notre application qui consiste à relever des données de l'infiltromètre à disque par un système de vision artificiel comprenant une caméra canon et un ordinateur portable Lenovo muni d'un logiciel de traitement d'image Matlab 2012.

Dans cette application, on a utilisé les techniques de traitements d'images issues de la morphologie mathématique pour la détection et la mesure du niveau d'eau dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque d'une manière automatique. Les tests menés sur divers séquences d'images montrent l'efficacité de la méthode vue que la valeur du niveau détecté est proche de celle du niveau lue.

Conclusion générale

Le sujet traité dans ce mémoire concerne la théorie de l'infiltration et plus précisément la mesure de l'infiltration d'eau dans un sol, qui constitue une information très importante dans le domaine de l'agriculture, de l'urbanisme. Après avoir présenté les différents appareils d'infiltromètres, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'un d'eux qui est l'infiltromètre à disque.

L'utilisation de cet appareil est très fastidieuse car les mesures d'infiltration s'effectuent manuellement en relevant à l'œil nu, le niveau d'eau dans un réservoir durant des heures voire des jours. Pour rendre cette tâche automatique, nous avons étudié les différentes méthodes de mesure de niveau à base de capteurs. Nous avons aussi opté à l'utilisation d'un capteur optique (caméra) pour relever les niveaux d'eau dans le réservoir transparent de l'infiltromètre durant toute l'opération de l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette méthode invasive nous permet de ne pas modifier, ni inclure un capteur dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque et donc de ne pas fausser ni le réglage ni son fonctionnement de celui-ci qui doit rester étanche durant toute l'opération.

Pour mesurer automatiquement le niveau d'eau dans le réservoir principal de l'infiltromètre à disque par un système de vision artificiel, nous avons élaboré un programme en Matlab qui utilise des opérations adéquates de la morphologie mathématique. Cette théorie s'est avérée convenable pour notre application.

Sur la base des mesures effectuées par notre système de vision, nous avons déterminé la courbe de lame infiltrée en fonction du temps ainsi que quelques paramètres du sol étudié à savoir le flux d'eau infiltré et la sorptivité. Ces résultats sont conformes à ceux basés sur des mesures relevées d'une manière manuelle. Comme perspectives, nous envisageons d'effectuer des mesures d'infiltration sur des sols situés à l'extérieur du laboratoire.

Bibliographie

- [1] -Serge Beucher .Segmentation d'images et morphologie mathématique. Thèse doctorat, école nationale supérieure des Mines de paris, 1990.
- [2]-Corinne VACHIER. Extraction de caractéristiques, segmentation d'image et morphologie mathématique. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure de Mines de Paris, 1995
- [3]-Jérôme Dubois. Conception en technologie CMOS d'un système de vision dédié à l'imagerie rapide et aux traitements d'images. Thèse de doctorat de l'université de Bourgogne, 2008.
- [4]-K. Abdennaceur, A. Mehdi et M. Samet. Sonde capacitive niveau métrique de liquides non miscibles. Brevet L'INNORPI n° 7303, pages 1-9, 2007.
- [5]-C. Durosier et C. Bourdry. Morphologie mathématique fonctionnelle. URFIST de paris, Ecoles des Charles, 2005.
- [6]-Frédéric Truchetet « Introduction à la vision artificielle industrielle », février 2005
- [7]- Jérémy Huart. Extraction et analyse d'objets- clés pour la structuration d'images et de vidéos. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de GRENOBLE, 2007.
- [8]-Antoine Manzanera. Traitement d'image et vision artificielle. Cours ENSTA D9-2 ,2005.
- [9]-J.P.Gastellen, Etchegorry . Acquisition et traitement d'image numérique. Cours université Paul Sabatier, 2008.
- [10]- D. Sheeren, S. Lefère et J. Weber. La morphologie mathématique binaire pour l'extraction automatique des bâtiments dans les images THR. Revue internationale de Géomatique. Volume 17- n° 3-4, pages 333à 352, 2007.
- [11]- Yaovi Gagou. Cours de traitement d'image. Université de Picardie Jules Verne, 2008.
- [12]-M.VAN Droogenbroeck. Traitement d'images numériques au moyen d'algorithme utilisant la morphologie mathématique et la notion d'objet : application codage. Thèse de doctorat en sciences appliquées, de l'Université Catholique de Louvain, 1994.
- [13]-Jack- Gérard postaire « contrôle de production par vision linéaire » université de sciences et technologies de Lille, R7600, 1-15, 1998.
- [14]-Hervé Mathieu. La chaine d'acquisition d'images. Rapport technique de l' Institut National de recherche en informatique et en Automatique, 2006.
- [15]-Hawraa Amhaz « traitement automatique d'images bas niveau intégré dans un capteur de vision CMOS »l'université de GRENOBLE juillet 2012.
- [16]-J-P.Vandervaere , R.Angulo.Jaramille, C.Peugeot, M.Vauclin « caractérisation hydrodynamique in situ des sols Encroutés » Journées hydrologiques- orstom-septembre 1994

- [17]- G. Matheron. Les variables régionalisées et leurs estimations. Masson Paris 1965.
- [18]-Jean-Pierre Vandervaere « caractérisation Hydrodynamique du sol in situ par infiltromètre à disque. Analyse critiques des régimes pseudo permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroutés » l'université Joseph FOURIER-GRENOBLE 1995.
- [19]- Endre Migeon. Applications industrielles des capteurs : secteur médical, chimie et plasturgie. HERMES science Lavoisier, 2009.
- [20]-Frédéric Truchetet. Introduction à la vision artificielle industrielle. Cours, février 2005.
- [21]-J. P Cocquerez et S. Philip. Analyse d'image et segmentation. Ouvrage collectif coordonnées (édition MASSON).
- [22]- Y. Coquet, A. Boucher, C. Labat, P. Vachier et j-Roger- Estrade. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disque. Aspects théoriques et pratiques. Article université du Paris-Sud ,2000.
- [23]- N. E Abriak, F. Gondola, G. Picot, C. Boulénia. Etude des phénomènes d'infiltration dans un milieu poreux par fluore3scence. Ecole de Mines de Douai, Douai, France, université Artois, Béthune, France.2002.
- [24]- Laurent Busin, Nicolas Vandenbroucke, Ludovic Macaire. Contrôle d'aspect par vision linéaire couleur »
- [25]- Abdelhafid Elouardi. Évaluation des rétines électroniques pour une définition architecturale d'un système monopuce (SoC) dédié à la vision embarquée. Thèse de doctorat, l'université Paris XI ORSAY , 2005.
- [26]-Yavuz Degerli. Etude, modélisation des bruits et conception des circuits de lectures dans les capteurs d'images à pixels actifs cmos. Thèse de doctorat en Microélectronique, capteurs d'images à l'école Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'espace, 2000.
- [27]- Perceval Coudrain. Contribution au développement d'une technologie d'intégration tridimensionnelle pour les capteurs d'images CMOS à pixels actifs. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009
- [28]-Hawraa AmhaZ. Traitement d'images bas niveau intégré dans un capteur de vision CMOS. Thèse de doctorat de l'université de GRENOBLE, 2012.
- [29]- Radu Horaud et Olivier Monga. Vision par ordinateur : outils fondamentaux. Edition Hermès, 1987.
- [30]- Jean- Claude Chossat. La mesure de la conductivité hydraulique des sols : méthodes in situ à saturation dans la zone non saturée : méthodes d'infiltrations. Livre. Edition HERMES Lavoisier, 2004.
- [31]- Daniel Huilier. Torricelli, Vidange réservoir. Licence LPAI, 2009-2010.

Annexe 1 : Principe de vase de Mariotte

Le vase de Mariotte est représenté sur la figure (A.1). Il représente un récipient dont l'embouchure est fermée par un bouchon et où un orifice est à la partie inférieure, le récipient est initialement rempli de liquide sur une hauteur qui peut atteindre la hauteur maximale. Si la surface de l'orifice est suffisamment étroite pour que les forces de tension superficielle interviennent, alors le liquide ne peut pas s'écouler tant que le bouchon ferme le récipient : le poids du liquide ne peut pas vaincre les forces de pression atmosphérique et de tension superficielle qui s'exercent au niveau de l'orifice. Si la section de l'ajutage est plus grande qu'une valeur limite, l'écoulement de l'eau s'effectue même si le bouchon ferme le récipient. Cette surface minimale est donnée par :

$$S_{min} = \frac{4\pi A^2}{(\rho g H + P_H - P)^2} \quad (1.1)$$

A est la densité d'énergie de surface du liquide (elle vaut $72,75.10^{-3}$ N/m pour l'eau à 20°C)

Et P_H est la pression qui est à la surface du liquide dans le récipient fermé si celui-ci n'est pas complètement rempli (s'il est rempli, on a $P_H = 0$). Cette section minimale devient faible pour des hauteurs de liquide.

Si le bouchon est enlevé, la pression est la même à la surface du liquide et à l'orifice, donc $P_H = P$, et le poids du liquide n'a plus qu'à être plus grand que la force de tension superficielle pour pouvoir s'écouler, et la section minimale requise est plus faible (relation (1.1)) devient :

$$S_{min} = \left(\frac{2\sqrt{\pi} A}{\rho g H} \right)^2$$

Exemple : Pour une hauteur d'eau de 10 cm, l'orifice doit avoir un diamètre minimal de 0.3mm pour que l'eau s'écoule lorsque le bouchon est enlevé.

Le vase de Mariotte permet l'écoulement de l'eau même lorsque le bouchon est en place, à condition bien sûr qu'il soit traversé par un tube AB qui plonge dans le liquide jusqu'à une hauteur H de l'orifice. Le liquide situé à l'extrémité B du tube est à la même pression atmosphérique que l'extrémité extérieure A. Étant donné l'égalité des pressions en B et à l'orifice C, le liquide peut s'écouler et son débit volumique Q à la sortie dépend de la hauteur H comme l'indique la loi de Torricelli [31]. Mais contrairement à un vase ouvert à son sommet, la hauteur de chute H reste constante, puisque au cours de la vidange c'est d'abord le niveau de la masse d'eau située au-dessus de B qui descend. Par conséquent le liquide s'écoule de l'orifice avec un débit Q constant, du moins tant que la surface libre n'atteint pas le niveau de l'extrémité du tube B.

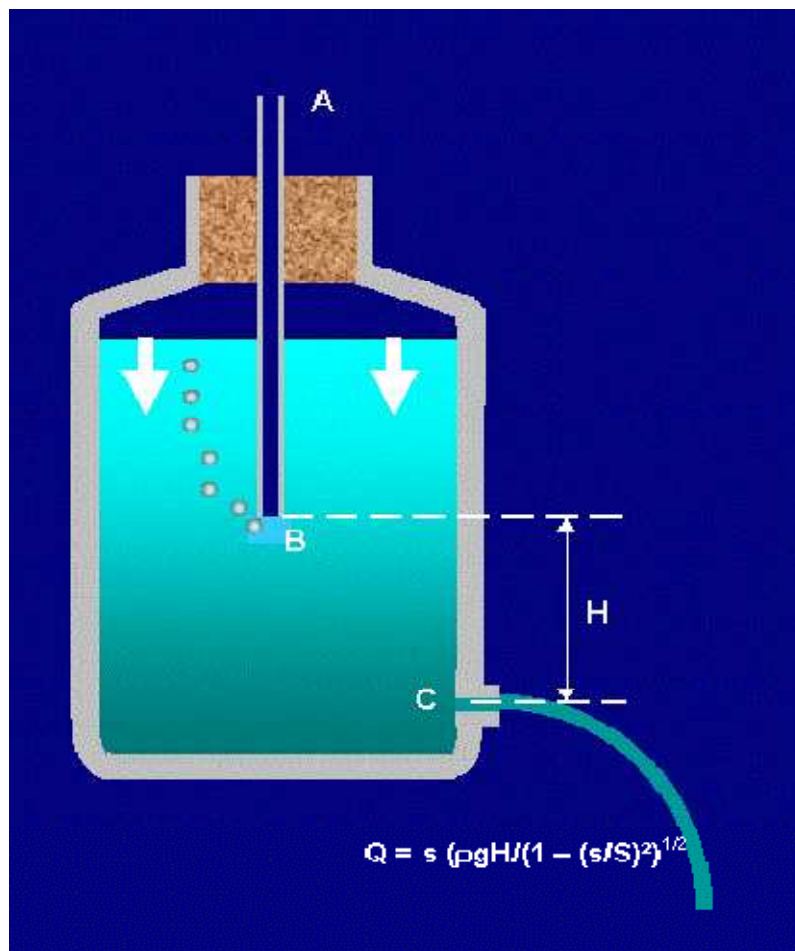


Fig.A.1 : Principe du vase de Mariotte