

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement  
supérieur et de la  
recherche scientifique

Université Ahmed Draia  
ADRAR



وزارة التعليم العالي

و البحث العلمي

الجامعة الأفريقية أحمد دراية  
أدرار

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département:** Sciences de la Matière

**Option:** Physique Energétique

Mémoire présenté par:

**KEDDI Abdelhamid**

**FOUDOU Abderrahmane**

pour l'obtention

du diplôme de **Master** en physique énergétique

## Traitement de l'image thermique pour la détection des zones défectueuses des panneaux solaires photovoltaïques

Soutenue publiquement le: 02 Juin 2014

Devant le jury composé de:

Qualité	Nom et prénom	Grade	Établissement
Président	Abdelaoui Moustapha	MC-B	Univ. Adrar
Directeur de mémoire	Hamouda Messaoud	Prof	Univ. Adrar
Examineur	Chogueur Djillali	MA-A	Univ. Adrar
Examineur	Mouhadjar Samir	MR-B	URERMS Adrar

**Année universitaire:**

**2013 - 2014**

# Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années. Nous exprimons notre grande gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur **Le professeur Messaoud HAMOUDA** qui nous honorée par son encadrement et d'avoir accepté cette lourde tâche, qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques, et pour l'aide continue durant la réalisation de ce mémoire. Nous lui exprimons également notre profonde reconnaissance pour son dévouement et de nous faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et de ses idées pour l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions également les membres de jury de cette soutenance pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous aidés à élaborer et réaliser ce mémoire.

Que tous ceux qui ont participé, directement ou indirectement, au bon déroulement de notre travail, trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier tous les personnels de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar, pour l'aide qu'ils nous ont donné durant la période du notre recherche, et notre remerciements aussi à Abdelkader GUEMNI, Abdelkader ABEKHTI, Fatima SAADI et tous les personnels de l'agence de Sonelgaz à Adrar .

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les travailleurs de l'université d'Adrar, et pour nos amis et collègues pour le soutien qu'ils nous ont apporté.

Enfin, nous adressons des remerciements particuliers à nos proches, pour leur présence, leur soutien, et pour leurs encouragements permanents.



# Dédicace



Je dédie ce modeste travail

- ✚ À ma chère mère FATIMA et grand père MHAMED  
Que Dieu les accueille dans ses vastes paradis.
- ✚ À mon cher père ABDELLAH qui m'a donné tous les efforts pour arriver à ce niveau, et qui a su m'imprégner de son savoir et de sa sagesse. Que dieu le préserve et le bénisse.
- ✚ À ma grande mère Fatma que DIEU le tout puissant la protège pour nous.
- ✚ À ma mère Mabrouka que DIEU le tout puissant la protège pour nous.
- ✚ À mes oncles: Mohamed, Abderrahmane, Ahmed et Abdelaziz.
- ✚ À mes tantes: Zohra, Mabrouka et Fatma
- ✚ À tous mes frères: Mohamed, Abdelkader, Ahmed, Abdelmadjid et Abdessadek.
- ✚ À toutes mes sœurs: Fatima, Nassira et Aicha.
- ✚ À toutes ma grande famille: Foudou, Tabet, Keddi, .....
- ✚ À tous mes amis.
- ✚ À tous mes amis dans le travail, surtout: Benmalek MS
- ✚ À mon collègue Abdelhamid qui a participé à la réalisation de ce mémoire.





# Dédicace



Je dédie ce modeste travail

Aux deux personnes les plus chers pour moi dans ce monde, qui m'ont soutenu jusqu'au bout: Ma chère mère FATMA qui m'a donné toute l'affection et l'amour durant toute ma vie, et qui m'a transmis toute sa volonté, sa prévenance et sa grande patience. Et à mon cher père ABDELKADER qui m'a donné tous les efforts pour arriver à ce niveau, et qui a su m'imprégner de son savoir et de sa sagesse. Que dieu les préserve et les bénisse.

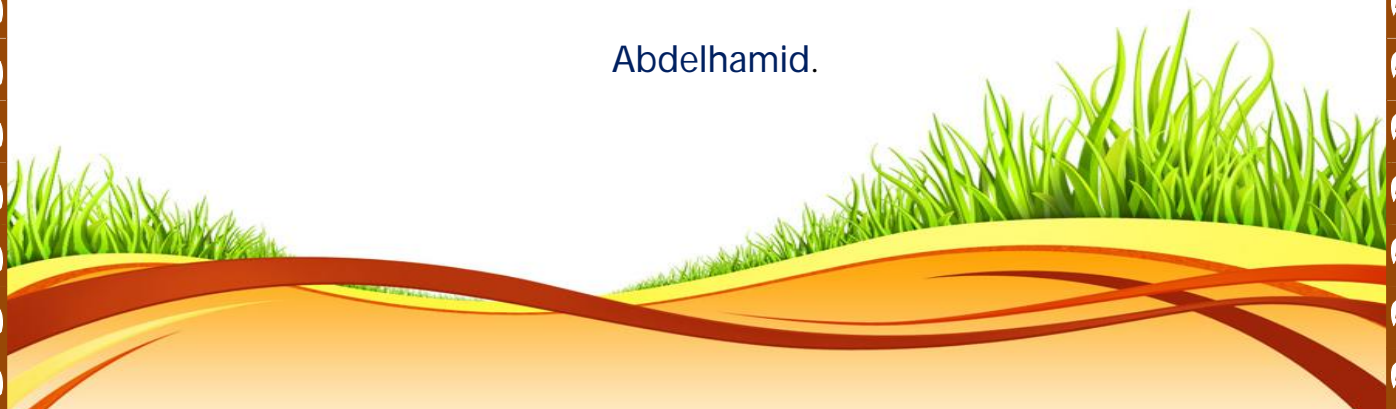
À tous mes frères: Abdelmadjid, Ahmed, Abderrahmane et Abdenmour.  
À toutes mes sœurs: Fatma Zohra, Soumya et Karima.

À mon oncle Abdelmadjid, son épouse Djamila et leurs enfants: Louaye, Abdelbari et Lina Albatoule.  
À ma grande mère Zohra que DIEU le tout puissant la protège pour nous, et ses fils: Abdelkader, Abdellah, Saleh, Fatiha, Aicha et Rokaya.

À la mémoire de:  
Mes frères: Mohammed et Abdellah.  
Ma grande mère Fatima.  
Mes grands pères Ahmed et El-Barka.  
Que Dieu les accueille dans ses vastes paradis.

À toutes ma grande famille.  
À tous mes amis.  
À mon collègue Abderrahmane qui a participé à la réalisation de ce mémoire.  
À tous les membres de forum d'Aoulef sur l'internet.

Abdelhamid.



## Résumé:

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'énergie renouvelable par utilisation des techniques de la vision industrielle. La thermographie infrarouge est une méthode efficace de contrôle et d'évaluation non destructive. La technique de thermographie permet de mettre en évidence les différences de structures internes grâce à l'étude de l'évolution et de la propagation d'une impulsion thermique appliquée sur la surface du matériau à inspecter. On peut traiter les images obtenues par la thermographie à travers des techniques d'analyse d'images thermiques pour détecter précisément les zones de défauts dans les panneaux photovoltaïques afin de les réparer pour améliorer le rendement de la production. Ce traitement est classé sous la maintenance préventive.

**Mots clés:** *Energie renouvelable, vision industrielle, thermographie infrarouge, techniques d'analyse d'images thermiques, panneaux photovoltaïques, maintenance préventive.*

## Abstract:

The work presented in this memoir comes within the framework of renewable energy with using the techniques of industrial vision. Infrared thermography is an effective method for control and non destructive evaluation. Thanks to evolution study and the thermal impulse observed on the surface with an infrared camera, subsurface features are detectable. We treat the pictures detected by infrared camera with techniques of analysis of the thermal pictures for to detect exactly the segments of defectiveness in the photovoltaic panel for most output of production. In this context, this treatment is classified under the preventive maintenance.

**Keywords:** *Renewable energy, industrial vision, infrared thermography, techniques of analysis of the thermal pictures, photovoltaic panel, preventive maintenance.*

## ملخص:

يندرج العمل المطروح في هذه المذكرة ضمن مجال الطاقة المتجددة من خلال استعمال تقنيات الرؤية الصناعية، كاميرا التصوير الحراري التي تلتقط الأشعة ما تحت الحمراء تعتبر وسيلة فعالة للمراقبة و التقييم عن بعد. هذه التقنية تسمح لنا بالتعرف على البنية الداخلية للمواد بفضل تحرك و انتشار الحرارة على مساحة الجسم المراد تصويره. الصور الحرارية الملتقطة يمكن معالجتها بواسطة تقنيات خاصة للكشف عن عيوب الخلايا الشمسية من أجل تحسين مردودية إنتاج الكهرباء. تصنف هذه المعالجة تحت إطار الصيانة الوقائية.

**كلمات مفتاحية:** *الطاقة المتجددة، الرؤية الصناعية، كاميرا التصوير الحراري، تقنيات معالجة الصور الحرارية، الخلايا الشمسية، الصيانة الوقائية.*

**Sommaire:**

Liste des figures et tableaux .....i  
Nomenclature et des abréviations .....iii  
**Introduction générale**.....01

**Chapitre I: Le système photovoltaïque**

I.1. Introduction .....03  
I.2. Historique.....03  
I.3. Le soleil.....04  
    I.3.1. Présentation générale.....04  
    I.3.2. Les caractéristiques principales du soleil .....05  
    I.3.3. Rayonnement solaire .....06  
I.4. L'effet photovoltaïque et la jonction PN .....07  
I.5. Le générateur PV et ses performances.....09  
I.6. La cellule PV .....10  
    I.6.1. Principe de fonctionnement et rendements .....10  
    I.6.2. Les types des cellules solaires.....12  
        I.6.2.1. Les cellules monocristallines .....12  
        I.6.2.2. Les cellules polycristallines .....13  
        I.6.2.3. Les cellules amorphes.....13  
        I.6.2.4. Comparaison des trois principales technologies des cellules .....14  
I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....15  
    I.7.1. Cellule photovoltaïque idéal .....15  
    I.7.2. Cellule photovoltaïque réel.....16  
I.8. Conclusion .....17

**Chapitre II: Traitement d'image**

II.1. Introduction .....19  
II.2. Historique du traitement d'images .....19  
II.3. Des notions sur l'image .....20  
    II.3.1. L'image numérique .....21  
    II.3.2. Pixel.....21  
    II.3.3. Dimension .....21  
    II.3.4. Résolution.....21  
    II.3.5. Contours et textures.....22  
    II.3.6. Luminance .....22  
    II.3.7. Contraste.....22  
    II.3.8. Les niveaux de gris.....22  
    II.3.9. Images en couleur .....22  
        II.3.9.1. Le modèle RVB (RGB) .....23  
        II.3.9.2. Le modèle Lab .....23

II.3.9.3. Le modèle YCbCr.....	23
II.3.9.4. Le modèle CMJN (CMYK).....	24
II.3.9.5. Le modèle TSL (HLS) .....	25
II.3.10. L'image thermique .....	25
II.3.11. Les formats d'images.....	25
II.4. Les outils d'analyse .....	27
II.5. Prétraitements .....	27
II.5.1. Filtrage linéaire .....	27
II.5.2. Filtrage non linéaire .....	28
II.5.3. Filtrage morphologique .....	29
II.6. Segmentation des images .....	29
II.6.1. Définition.....	29
II.6.2. Extraction des contours.....	30
II.6.3. Extraction des régions .....	30
II.6.4. Méthodes de segmentation en régions .....	31
II.7. L'interprétation .....	32
II.7.1. Classification non supervisée (ou non dirigée) .....	32
II.7.2. Classification supervisée ou dirigée .....	33
II.8. Segmentation en vue d'une classification par la méthode de s K-moyennes .....	33
II.9. Conclusion .....	34

### **Chapitre III: Détection automatique les zones de défauts dans les panneaux PV**

III.1. Introduction .....	37
III.2. Partie I.....	37
III.2.1. Techniques d'analyse d'images thermiques.....	37
III.2.1.1. Cadrage thermique .....	38
III.2.1.2. Isotherme .....	38
III.2.1.3. Palettes.....	38
III.2.2. Analyse d'une image thermique par FLIR QuickReport .....	39
III.2.3. Le logiciel FLIR QuickReport .....	39
III.2.3.1. Les éléments de la fenêtre.....	40
III.2.4. L'application d'un cas.....	42
III.3. Partie II : Approche proposée pour la détection des zones danger sur l'image Thermique .....	44
III.3.1. Acquisition des images thermiques .....	45
III.3.2. Étape de classification de l'image thermique par application de l'algorithme des K plus proches voisins .....	45
III.3.2.1. Problématique .....	45
III.3.2.2. K-means sur l'image thermique .....	46
III.3.2.3. Étapes de traitement par K-means sur l'image thermique sous Matlab	47
III.4. La conclusion.....	53
<b>Conclusion générale</b> .....	54
Bibliographie .....	55

**Liste des figures:**

<b>N° de la figure</b>	<b>Titre de la figure</b>	<b>Page</b>
Figure I.01	Structure du soleil.	06
Figure I.02	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	07
Figure I.03	La jonction P-N comme capteur.	09
Figure I.04	Schéma électrique équivalant d'une jonction PN.	09
Figure I.05	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure I.06	Schéma illustre la production PV.	11
Figure I.07	Schéma illustre l'effet PV.	12
Figure I.08	Cellules monocristallines.	12
Figure I.09	Cellules polycristallines.	13
Figure I.10	Cellules amorphes.	13
Figure I.11	Modèle de cellule photovoltaïque idéal.	15
Figure I.12	Modèle de cellule photovoltaïque réel.	16
Figure II.01	L'espace du couleur RGB.	23
Figure II.02	Espace de couleur YCbCr.	24
Figure II.03	Les quatre couleurs de base de la quadrichromie.	24
Figure II.04	Cercle TSL.	25
Figure II.05	Chaîne de traitement de l'image numérique.	27
Figure II.06	Exemple de produit de convolution entre image 8 bits et un noyau.	28
Figure II.07	Principe du filtre médian sur une image de 8 bits.	28
Figure II.08	Principe de la morphologie binaire.	29
Figure II.09	Objectif de la segmentation	29
Figure II.10	La différence entre contour idéal et réel.	30
Figure II.11	Résultats de la classification par K-means sur une image satellitaire.	34
Figure III.01	Les éléments de la fenêtre (Onglet Organiser).	40
Figure III.02	Les éléments de la fenêtre (Onglet Analyser).	41
Figure III.03	Les éléments de la fenêtre (Onglet Créer un rapport).	41
Figure III.04	L'image numérique du panneau PV à gauche et l'image thermique à droite.	42
Figure III.05	Réglage automatique à gauche et cadrage thermique à droite.	43
Figure III.06	L'image référence à gauche et l'isotherme supérieure à droite.	43
Figure III.07	L'image référence à gauche et l'image à palette medical à droite	44



<b>N° de la figure</b>	<b>Titre de la figure</b>	<b>Page</b>
Figure III.08	Interface Matlab.	45
Figure III.09	Chargement de l'image «PV thermique.jpg».	47
Figure III.10	Décomposition de l'image en deux segments (Noir et blanc).	49
Figure III.11	Résultats pour K=4.	50
Figure III.12	Le segment 1.	51
Figure III.13	Le segment 2.	51
Figure III.14	Le segment 3.	52
Figure III.15	Le segment 4.	52

**Liste des Tableaux:**

<b>N° du tableau</b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil.	05
Tableau I.2	Comparaison entre les trois principales technologies des cellules.	14
Tableau II.1	Principaux formats d'images.	26

### Nomenclature

<b>Symboles et notations</b>		
<b>Symboles</b>	<b>Unités</b>	<b>Désignations</b>
I	A (Ampère)	L'intensité de l'électricité
V	V (Volt)	La tension
R	$\Omega$ (Ohm)	La résistance
q	C (Colomb)	La Charge le l'électron
T	k (Kelvin)	Température absolu de corps
n		Le facteur de qualité de diode
h	$Watt \times S^2$	Constante de Planck $h = 6.6 \times 10^{-34}$
d		La densité
P	Atm (Atmosphère)	La pression atmosphérique
L	m (Mètre)	La longueur
C	$m/s$	Vitesse de la lumière $C = 3 \times 10^8$
$\lambda$	$m$	Longueur d'onde
E	$Watt/m^2$	Flux de puissance à la longueur d'onde $\lambda$ .
K	$Watt \times s^2/k$	Constante de Boltzmann $K = 1.4 \times 10^{-23}$

### Abréviations

PV	Photovoltaïque
URERMS	l'unité de recherche en énergies renouvelable en milieu saharien

## **Introduction générale:**

L'énergie est la source de la vie, pour cela l'homme essayait depuis son existence d'exploiter les différents types d'énergie.

Avec la révolution économique qui accompagne la découverte du pétrole, le monde a su que l'or noir finirons à la fin, donc la solution est une énergie renouvelable non polluée comme le soleil, et après des recherches successives arrive à la technique des panneaux photovoltaïques qui ont le pouvoir de transformer l'énergie de soleil à une énergie électrique.

Malgré les bienfaits de cette technique mais reste insuffisante pour satisfaire les besoins du monde de l'électricité, mais il y a une possibilité d'améliorer le rendement de ses panneaux à travers la maintenance préventive via l'inspection par les caméras thermiques.

La caméra devenue substitue de l'œil, se caractérise par sa précision élevée, sa rapidité et sa sécurité. Elle facilite les tâches industrielles les plus ardues dans plusieurs secteurs. La caméra nécessite quelques conditions pour son bon fonctionnement.

Toutes les applications visuelles utilisent un système de vision dont le but est de prendre en charge une image numérique, la traiter par des techniques d'analyse spécifiques afin d'atteindre un résultat déterminé de haut niveau.

Le développement des caméras à travers le temps a permis de découvrir un autre type de caméras aptes de voir l'invisible, ce sont les caméras thermiques. Le thermographe infrarouge est une caméra thermique qui peut capter la radiation du spectre infrarouge, elle est utilisable beaucoup dans les applications industrielles.

Le but de notre travail est de traiter l'image thermique en analysant et en détectant les zones de défauts dans les panneaux photovoltaïques. Nous appliquons l'algorithme des K-moyennes ou K plus proches voisins qui est une méthode assez simple de classification et segmentation des images couleurs.

Nous organisons notre mémoire comme suit:

- Dans le premier chapitre nous donnons un aperçu sur les panneaux PV
- Le deuxième chapitre est consacré aux principales techniques utilisées dans le domaine du traitement des images.
- Nous consacrons le troisième chapitre à notre méthode où nous détaillerons la démarche entreprise et les résultats pratiques.

*Chapitre***I***Le système photovoltaïque*

Avant d'entamer ce mémoire, il est important d'avoir une idée générale sur l'histoire des panneaux solaires d'une façon générale et les panneaux photovoltaïques d'une façon particulière et son développement.

Nous définirons dans ce premier chapitre le soleil et ses caractéristiques en tant qu'il est la seule source d'énergie des panneaux PV.

Nous parlerons aussi sur l'effet photovoltaïque et les éléments constituant ce système, puis on va voir son principe de fonctionnement.

En fin, nous distinguerons les différents types des cellules PV et faire une comparaison entre eux.

## I.1. Introduction:

Le mot photovoltaïque provient du grec « photo » qui signifie lumière et de « volta » qui provient directement du nom du célèbre physicien Alessandro Volta qui a contribué à la découverte de l'électricité.

Le photovoltaïque est la transformation d'une partie de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Depuis plus de demi-siècle, le concept du photovoltaïque est en plein essor grâce à l'emploi de nouveaux matériaux.

Tout au long de l'année, les applications se font de plus en plus nombreuses, et de nos jours touchent un large secteur d'activité, tout particulièrement à notre époque où les hommes sont contraints d'utiliser des énergies polluantes.

Si nous voulons bâtir un monde plus propre, il faut faire en sorte que progressivement le solaire prend partie intégrante de notre vie, ayons l'intelligence de la saisir.

## I.2. Historique:

L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et des saisons, elle est donc indirectement à l'origine de richesses énergétiques tels que le charbon, le pétrole ou encore le gaz. L'énergie solaire est utilisée depuis de nombreux siècles par exemple pour se chauffer.

Depuis l'Antiquité, les hommes tentent de tirer profit de cette énergie. C'est à cette époque que jaillit l'idée d'une conversion de l'énergie solaire en énergie de pompage. On retrouve cette idée dans certains travaux de nombreux savants tels que Euclide, Archimède ou bien encore Héron d'Alexandrie. Le développement de ces techniques va s'étendre du Moyen-âge à la Renaissance avec l'ajout de verre dans certains prototypes ou bien encore l'étude des miroirs ardents ainsi que la construction de pompes solaires par Salomon de Caus.

Mais l'effet photovoltaïque à proprement parlé n'a été découvert qu'en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui s'est posé la question de savoir pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière.

Il a réussi à prouver qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. Mais malheureusement, à cette époque, les appareils électriques n'existaient pas encore donc il n'y avait pas d'utilisations pratiques à cette découverte.

En 1905, Albert Einstein émet l'hypothèse que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir

des électrons de leurs orbites et permettre ainsi la création d'un courant électrique.

Il faut attendre le XX<sup>ème</sup> siècle pour voir se développer aux Etats-Unis une série de travaux et de réalisations se rapportant à l'énergie solaire. Les laboratoires de Bell Téléphone vont en 1954 mettre au point la première cellule photovoltaïque de rendements acceptables (environ 6% de l'énergie lumineuse convertie en énergie électrique). Ce rendement sera par la suite augmenté grâce à la découverte du fait que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés ; celui-ci atteindra vers 1960 jusqu'à 15%.

Lors de la course vers l'espace, les photopiles ont connu des progrès et des améliorations importantes. Car en effet, les photopiles sont une solution idéale pour l'alimentation en électricité des satellites.

En 1973, suite au choc pétrolier, l'énergie solaire subit un essor considérable. Au début des années 90, la prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle: "réseau câblé", oblige les marchés du photovoltaïque à s'ouvrir afin d'atteindre les campagnes de façon plus rentable [TPE14].

### **I.3. Le soleil:**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [KHE03].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [BER04].

#### **I.3.1. Présentation générale:**

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil [SEN08].

### I.3.2. Les caractéristiques principales du soleil:

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau suivant:

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2 \times 10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6.09 \times 10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1.41 \times 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5 \times 10^{17}$

**Tableau I.1.** Caractéristiques principales du soleil [SEN08].

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de:

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes [BER79]:
  - Une température de  $15 \times 10^6$  °C.
  - Une densité est de  $1015 \text{ kg/m}^3$ .
  - Une pression de 109 atm.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [DUF80]:
  - Une épaisseur de 244160 km.
  - Une température variant de  $10 \times 10^6$  °C à  $50 \times 10^4$  °C.
- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes:
  - Une température comprise entre  $50 \times 10^4$  °C à 6400 °C.
  - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [PER82]:
  - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500°C.
  - Une épaisseur de 500 km.
  - Une pression de 1/100 atm.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [SFE81]:
  - Une épaisseur 2000 km.
  - Une température augmentant de 4200 °C à  $10^4$  °C.

- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [DUF80]:
  - Elle est sans limite précise.
  - La température augmente de  $10^6$  °C à  $2 \times 10^6$  °C.

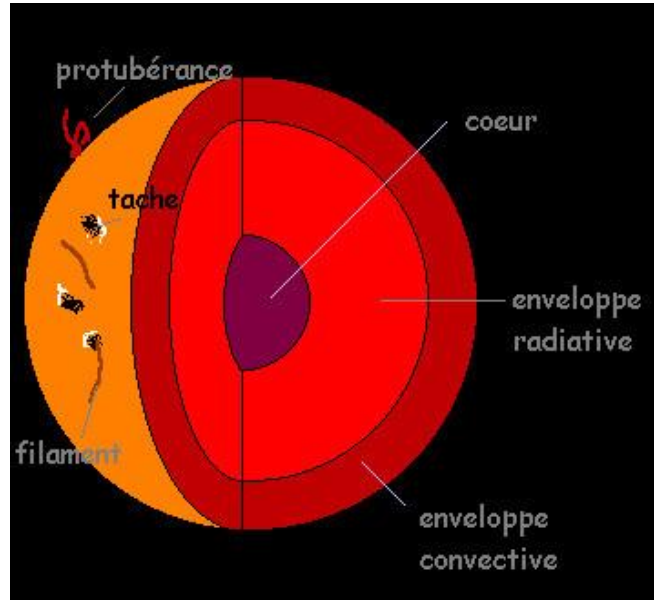


Figure I.1. Structure du soleil [SAA10].

### I.3.3. Rayonnement solaire:

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 mm à 10 mm. La figure I.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi:

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 mm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 mm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 mm).

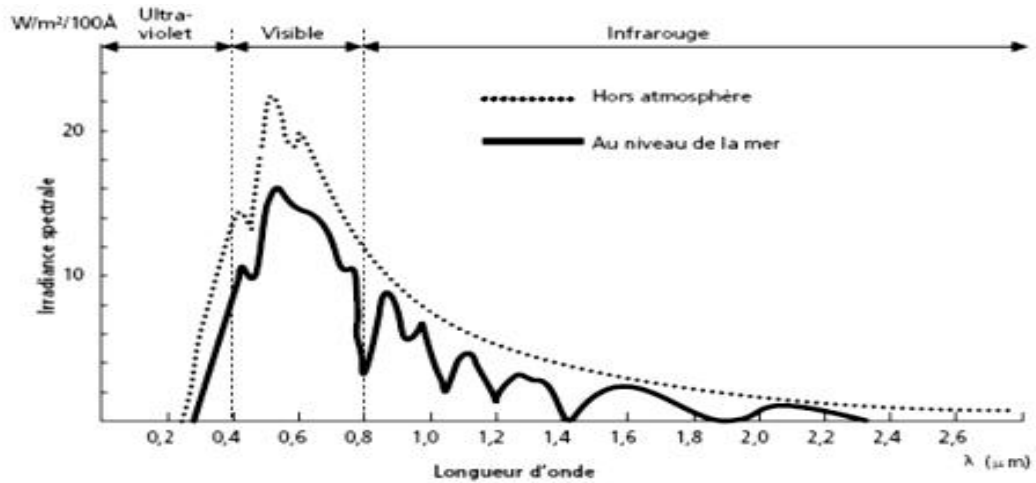
L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci.

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W/m}^2$ .

La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.



Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.



**Figure I.2.** Analyse spectrale du rayonnement solaire.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible; en outre, on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible.

Il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la terre sur le rayonnement solaire.

L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le «midi solaire», moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le soleil est plus haute et que les journées sont plus longue en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver.

#### **I.4. L'effet photovoltaïque et la jonction PN:**

C'est la conversion de l'énergie de transportent les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités, en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile.

La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé.

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créée s'appelle un semi-conducteur de type positif (type P).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type négatif (type N).

Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée.

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26%, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au dessus de 17%. Ces valeurs, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

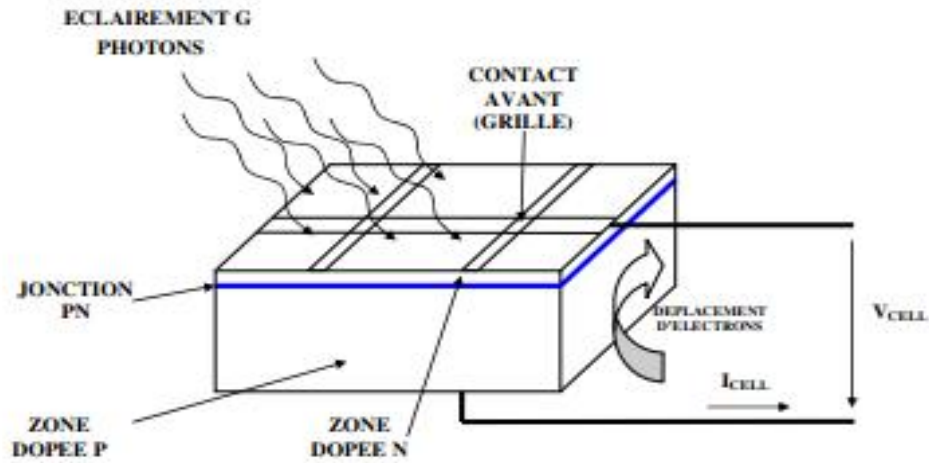


Figure I.3. La jonction P-N comme capteur.

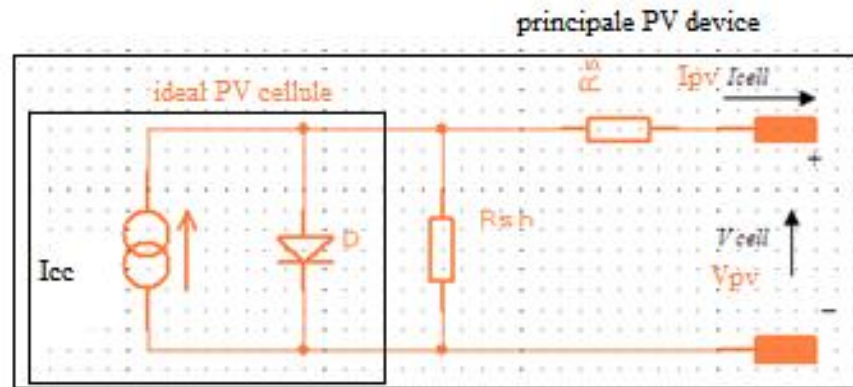


Figure I.4. Schéma électrique équivalent d'une jonction PN.

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

### I.5. Le générateur PV et ses performances:

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèles à fin d'obtenir des caractéristiques électroniques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension circuit ouvert.

## I.6. La cellule PV:

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [VIL09].

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm<sup>2</sup> ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. La figure I.5 suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [BIL06].

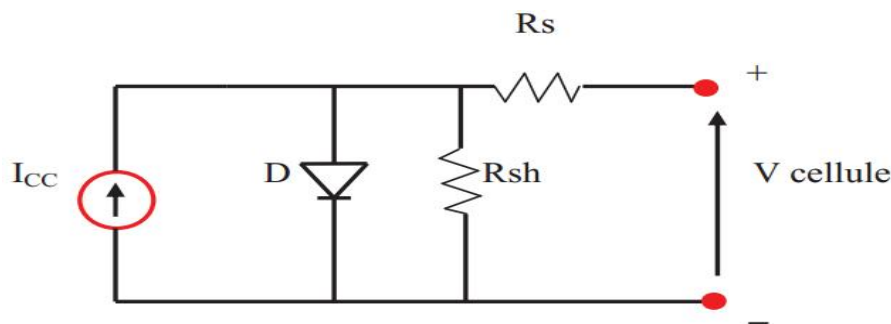
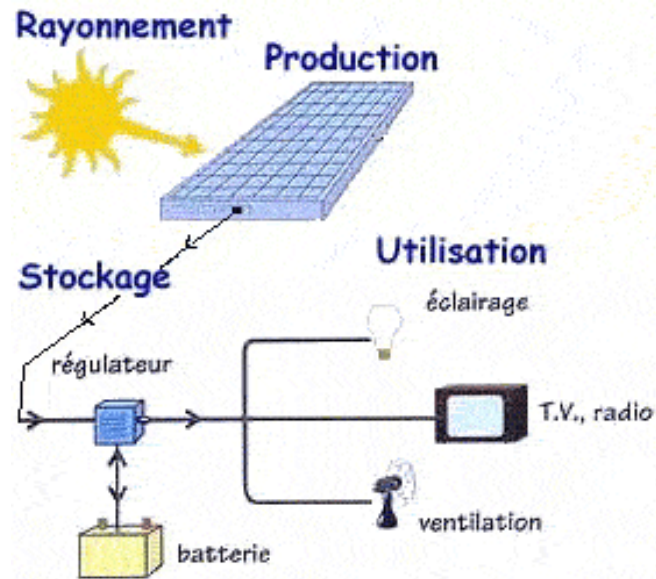


Figure I.5. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction [BEL09].

### I.6.1. Principe de fonctionnement et rendements:

Les cellules solaires sont composées de semi-conducteurs utilisés lors de la fabrication de puces informatiques. Ces semi-conducteurs transforment la lumière en électricité. Un courant continu est ainsi produit et peut être transformé, au moyen d'un onduleur, en courant alternatif et peut être donc ainsi directement injecté dans le réseau d'électricité public. En général, les semi-conducteurs sont composés de silicium, l'un des éléments les plus présents sur la planète.



**Figure I.6.** Schéma illustre la production PV.

Pour fonctionner une cellule photovoltaïque a besoin de lumière. La lumière du soleil est constituée d'une infinité de radiations électromagnétiques qui se propagent par ondes.

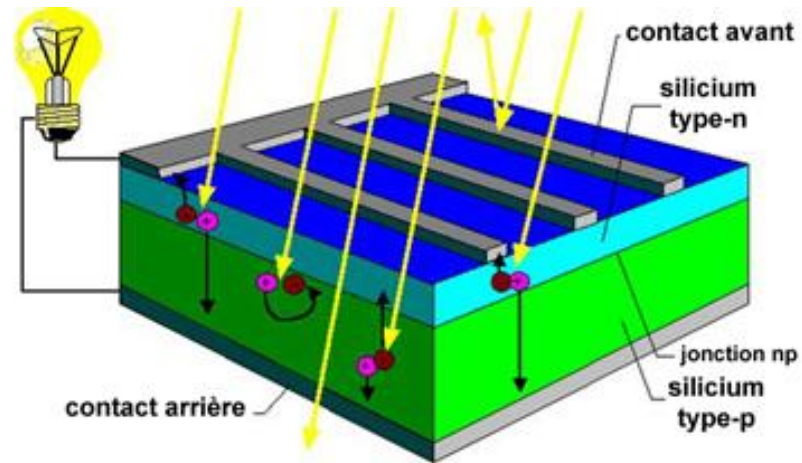
La décomposition de cette lumière blanche dans l'arc-en-ciel, ou par un prisme nous montre seulement la partie visible du spectre lumineux. Mais l'onde lumineuse véhicule aussi des « grains d'énergie » appelés photons.

Mais ce n'est pas tout, il faut aussi doper les plaques de silicium, c'est-à-dire créer une face N riche en électron et une face P pauvre en électrons. La surface de séparation s'appelle la jonction. Au voisinage de cette jonction le phénomène est complexe.

Pour simplifier, la jonction constitue une « barrière » empêchant les électrons de la face N d'aller vers les électrons de la face P. Si l'on introduit des atomes de phosphore ayant 5 électrons de valence, 4 électrons de l'atome forment des liaisons avec l'atome de silicium et il en reste qui pourra assurer la conduction.

C'est un dopage de type (N) comme négatif car la conduction se fera par les électrons supplémentaires. Si l'on introduit des atomes de bores ayant 3 électrons de valence, 3 électrons de l'atome forment des liaisons avec l'atome de silicium et il y a un « manque » d'électron que l'on appelle trou positif.

Des électrons de valence peuvent venir occuper ces trous, en libérant eux-mêmes des places pour assurer la conduction. C'est un dopage de type (P) comme positif car la conduction se fera par des trous.



**Figure I.7.** Schéma illustre l'effet PV.

Quand le flux de photons arrive sur les cristaux, de l'énergie est absorbée. On génère des porteurs de charge au voisinage de la jonction : une différence de potentiel apparaît entre les deux faces de la cellule; c'est l'effet photovoltaïque.

## I.6.2. Les types des cellules solaires:

### I.6.2.1. Les cellules monocristallines:

Ces cellules sont composées d'un seul cristal divisé en deux plaques ultrafines, dopées et connectées entre elles. Elles permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 20%. Ces cellules monocristallines souffrent néanmoins de deux inconvénients. Premièrement, leur prix reste élevé et deuxièmement, la durée d'amortissement énergétique reste élevée (c'est-à-dire le temps durant lequel une cellule solaire doit produire de l'énergie pur « rembourser » l'énergie nécessaire à sa production. Cette durée peut aller jusqu'à 7 ans). [DEL07].



**Figure I.8.** Cellules monocristallines [DEL07].

### I.6.2.2. Les cellules polycristallines:

Ces cellules ressemblent beaucoup aux cellules monocristallines, mais sont composées d'un agglomérat de cristaux et non pas d'un seul cristal pur, dès lors les plaques sont hétérogènes et les rendements un peu plus faibles, de l'ordre de 10 à 15%. Le seul avantage est que sa production nécessite moins d'énergie et son prix d'achat plus bas.



**Figure I.9.** Cellules polycristallines [DEL07].

### I.6.2.3. Les cellules amorphes:

On parle de cellules amorphes ou à couches fines lorsque la couche de silicium ne dépasse pas les 1  $\mu\text{m}$  (épaisseur d'un cheveu humain 50 à 100  $\mu\text{m}$ ). La production est peu coûteuse grâce à de moindre frais en matériaux. En revanche, le rendement des cellules amorphes est largement inférieur à celui des autres types de cellules. Les cellules amorphes sont généralement utilisées dans des appareils portables (montre, calculatrice...) ou comme éléments de façade.



**Figure I.10.** Cellules amorphes [DEL07].

#### I.6.2.4. Comparaison des trois principales technologies des cellules:

Technologie	caractéristiques
Monocristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très bon rendement: 14 à 20 %.</li> <li>-Durée de vie: importante (30 ans)</li> <li>-Coût de fabrication: élevé</li> <li>-Puissance: 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup> - 7 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>-perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>-Fabrication: élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</li> <li>-Couleur bleue uniforme</li> </ul>
Polychristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement: 11 à 15 %.</li> <li>-Durée de vie: importante (30 ans)</li> <li>-Coût de fabrication: meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>-Puissance: 100 Wc/m<sup>2</sup> - 8 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>-perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>-Fabrication: élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>-Ces cellules sont bleues, mais non uniforme: on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</li> </ul>
Amorphe	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible: 5 à 9 %.</li> <li>-Durée de vie: assez importante (20 ans)</li> <li>-Coût de fabrication: peu onéreux par rapport aux autres technologies</li> <li>-Puissance: 50 Wc/m<sup>2</sup> - 16 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</li> <li>-Peu sensible aux températures élevées.</li> <li>-Utilisables en panneaux souples.</li> <li>-Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</li> <li>-Rendement faible en plein soleil.</li> <li>-Performances diminuant avec le temps.</li> <li>-Fabrication: couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide</li> </ul>

**Tableau I.2.** Comparaison entre les trois principales technologies des cellules [DEL07].



## I.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque:

### I.7.1. Cellule photovoltaïque idéal:

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure I.11 qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad [I.1]$$

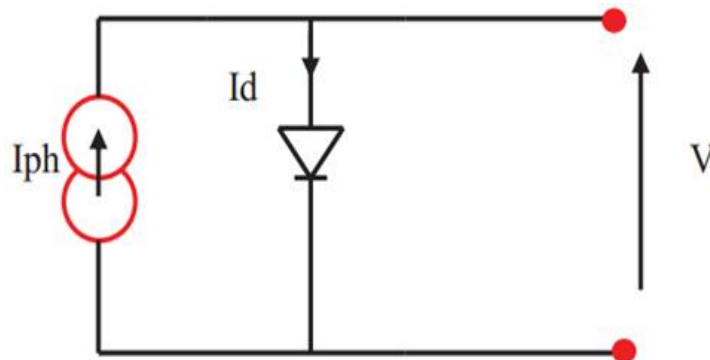


Figure I.11. Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :  $V = V_d$ .

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique  $I$  et  $V$  est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad [I.2]$$

Avec :

$I_0$ : Le courant de saturation inverse de la diode.

$V_d$ : La tension au borne de diode.

$V_t = KT/q$  potentielle thermique.

Donc la relation [I.1] sera:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad [I.3]$$

### I.7.2. Cellule photovoltaïque réel:

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$  [SIN10].

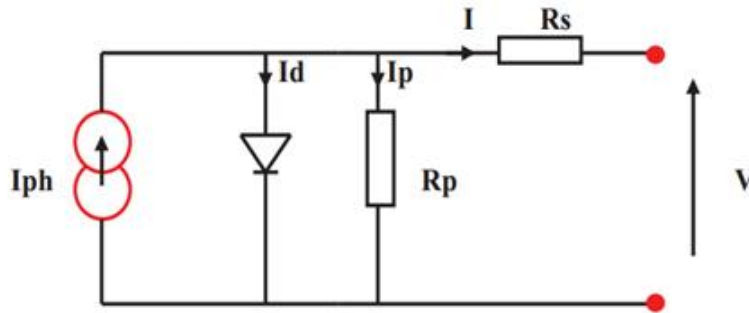


Figure I.12. Modèle de cellule photovoltaïque réel.

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad [I.4]$$

$$I_p = \left( \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad [I.5]$$

$$I_d = I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) \quad [I.6]$$

Avec:

I: Le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \cdot \left( \frac{G}{1000} \right)$ : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

$I_0$ : Le courant de saturation de la diode.

K: Constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

q : Charge d'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

n: Le facteur de qualité de diode.

T: La température de cellule en kelvin.

Donc [I.4] sera:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad [I.7]$$

**I.8. Conclusion:**

Le monde a besoin ce jour une énergie renouvelable non polluée, l'énergie solaire assure un monde avec énergie propre et économique malgré il n'a pu couvrir le demande mondial mais le développement technologique dans ce domaine met les panneaux photovoltaïques l'énergie du futur.

C'est vrai que l'exploitation de la technologie PV est récente (environ 50 ans) mais a connu plusieurs phases pour atteindre à ce niveau, et reste beaucoup de chose à faire pour améliorer le rendement des cellules et trouver des solutions au problèmes actuelles.

Le soleil est indispensable dans l'opération de la production d'électricité à travers la lumière, il est le plus proche étoile de la terre (environ 8 minute lumière), il est la source de la vie sur notre planète.

Les panneaux PV ont plusieurs types, chaque type a des avantages comme a des inconvénients, et l'effet PV se base sur la transformation de l'énergie solaire à l'énergie électrique via des composants et opération complexe.

*Chapitre*

II

# Traitement d'images

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous donnons une idée générale sur le traitement d'images et son développement par le temps.

Nous présenterons quelques notions sur l'image ainsi que les outils d'analyse, de segmentation et de classification.

## II.1. Introduction:

L' image est considéré comme l'un des outils le plus utilisable à notre époque, d'une part, les différents médias (Télévision, Computers, Smartphones..), d'autre part, elle est un élément essentiel pour la publicité afin de vendre les différents produits, en fin et au niveau des usines, l'image est indispensable au processus de la production à travers de spécifiques matériels, ce qui est entrer dans le contexte de la vision industrielle.

Le traitement d'images est né de la nécessité de remplacer l'observateur humain par la caméra. Les images ont alors été captées et numérisées pour pouvoir être traitées par l'ordinateur à travers l'analyse de caractéristiques à partir des pixels qui se composent l'image numérique.

La compréhension du traitement d'images commence par la compréhension de ce qu'est une image. Le mode et les conditions d'acquisition et de numérisation des images traitées conditionnent largement les opérations qu'il faudra réaliser pour extraire de l'information.

Alors, le traitement d'images est une discipline de l'informatique et des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information.

Dans le contexte des panneaux photovoltaïques (PV), le traitement d'images assurant l'analyse des panneaux pour faire le diagnostic grâce à une image spéciale qui est l'image thermique.

L'image thermique représente une carte de distribution de l'énergie rayonnée, tel que chaque pixel de l'image thermique a une information, et par conséquent, on peut y extraire les températures au niveau de panneau PV avant prendre la discision, et il y a plusieurs méthodes utilisées dans ce domaine.

## II.2. Historique du traitement d'images:

Le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérants sur celles-ci, dans le but de rendre cette opération possible, plus simple, plus efficace et plus agréable, d'améliorer l'aspect visuel de l'image et d'en extraire des informations jugées pertinentes [RIC94].

Le traitement d'images commence à être étudié dans les années 1920 pour la transmission d'images par le câble sous-marin allant de New York à Londres. Harry G. Bartholomew et Maynard D. Mc Farlane effectuent la première numérisation d'image avec compression de données pour envoyer des fax de Londres à New York. Le temps de

transfert passe ainsi de plus d'une semaine à moins de trois heures. Il n'y a pas vraiment d'évolution par la suite jusqu'à la période d'après-guerre [GON08].

Le traitement du signal prend de l'importance vers la fin de la seconde guerre mondiale avec l'arrivée du radar. La prospection pétrolière participe aussi beaucoup au développement des techniques de traitement du signal.

Le véritable essor du traitement d'images n'a lieu que dans les années 1960 quand les ordinateurs commencent à être suffisamment puissants pour travailler sur des images. Peu après, la redécouverte de la transformée de Fourier rapide révolutionne le domaine, en rendant possible les manipulations du contenu fréquentiel des signaux sur ordinateur. Cependant, l'essentiel des recherches porte encore, à cette époque, sur l'amélioration des images et leur compression.

En 1980, David Marr formalise le premier la détection de contours de manière précise. Au cours des années 1980, un véritable engouement se fait jour pour le traitement de l'image et surtout pour la compréhension de l'image par des systèmes experts. Les ambitions étaient beaucoup trop grandes, l'échec fut d'autant plus cuisant.

Les années 1990 sont témoin de l'amélioration constante des opérateurs. La recherche médicale devient un très gros demandeur en traitement d'images pour améliorer les diagnostics faits à partir des nombreuses techniques d'imagerie médicale. Les publicitaires, puis le grand public se familiarisent avec la retouche d'image grâce au logiciel Photoshop, et le traitement d'images dans un objectif esthétique se répand avec l'apparition d'autres logiciels. Enfin, la décennie s'achève sur l'engouement pour les ondelettes et les images multimodales.

Le traitement de l'image thermique a connu aussi un développement considérable depuis la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale jusqu'à ce jour en parallèle avec le traitement de l'image thermique, aujourd'hui et à travers le traitement d'une image thermique on peut savoir la température à chaque point de l'image et par conséquent prendre la décision juste.

### **II.3. Des notions sur l'image:**

L'image est une représentation d'une personne ou d'un objet par la peinture, la sculpture, le dessin, la photographie, le film, ...etc. C'est aussi un ensemble structuré d'informations qui, après affichage sur l'écran, ont une signification pour l'œil humain [RIC94].

### II.3.1. L'image numérique:

Contrairement aux images obtenues à l'aide d'une sculpture, ou dessinées sur le papier, les images manipulées par un ordinateur sont numériques (représentées par une série de bits).

Il existe plusieurs définitions d'une image numérique, elle peut être définie comme suit: Une image numérique est un signal fini bidimensionnel échantillonné et composée d'unités élémentaires (appelé pixel) représentant chacun une portion de l'image [ZEG09].

Ou bien: L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de tailles fixes appelés cellules ou pixels, ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleurs prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle, ou calculé à partir d'une description interne de la scène à représenter [RIC94].

### II.3.2. Pixel:

Si le bit est la plus petite unité d'information que peut traiter un ordinateur, le pixel est le plus petit élément que peut manipuler matériels et logiciels d'affichage ou d'impression.

Un pixel (contraction du mot anglais "Picture element") est le nom associé à une unité de base de l'image qui correspond à un pas de discrétisation. Il est le plus petit point de l'image et est caractérisé par sa position et sa valeur [ZEG09].

### II.3.3. Dimension:

C'est la taille de l'image. Cette dernière se présente sous forme de matrice dont les éléments sont des valeurs numériques représentatives des intensités lumineuses (pixels). Le nombre de lignes de cette matrice multiplié par le nombre de colonnes nous donne le nombre total de pixels dans une image [RIC94].

### II.3.4. Résolution:

C'est la clarté ou la finesse de détails atteinte par un moniteur ou une imprimante dans la production d'images. Sur les moniteurs d'ordinateurs, la résolution est exprimée en nombre de pixels par unité de mesure (pouce ou centimètre). On utilise aussi le mot résolution pour désigner le nombre total de pixels affichables horizontalement ou verticalement sur un moniteur; plus grand est ce nombre, meilleure est la résolution [RIC94].

**II.3.5. Contours et textures:**

Les contours représentent la frontière entre les objets de l'image, ou la limite entre deux pixels dont les niveaux de gris représentent une différence significative. Les textures décrivent la structure de ceux-ci.

L'extraction de contour consiste à identifier dans l'image les points qui séparent deux textures différentes [RIC94].

**II.3.6. Luminance:**

C'est le degré de luminosité des points de l'image. Elle est définie aussi comme étant le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface, pour un observateur lointain, le mot luminance est substitué au mot brillance, qui correspond à l'éclat d'un objet [RIC94].

**II.3.7. Contraste:**

C'est l'opposition marquée entre deux régions d'une image, plus précisément entre les régions sombres et les régions claires de cette image. Le contraste est défini en fonction des luminances de deux zones d'images [RIC94].

**II.3.8. Les niveaux de gris:**

Le niveau de gris est la valeur de l'intensité lumineuse en un point. La couleur du pixel peut prendre des valeurs allant du noir au blanc en passant par un nombre fini de niveaux intermédiaires. Donc pour représenter les images en niveaux de gris, on peut attribuer à chaque pixel de l'image une valeur correspondant à la quantité de lumière renvoyée. Cette valeur peut être comprise par exemple entre 0 et 255. Chaque pixel n'est donc plus représenté par un bit, mais par un octet. Pour cela, il faut que le matériel utilisé pour afficher l'image soit capable de produire les différents niveaux de gris correspondant [RIC94].

**II.3.9. Images en couleur:**

Même s'il est parfois utile de pouvoir représenter des images en noir et blanc, les applications multimédias utilisent le plus souvent des images en couleurs. La représentation des couleurs s'effectue de la même manière que les images monochromes avec cependant quelques particularités. Les couleurs sont composées d'un mélange de rouge, vert et bleu [RIC94].



Il existe différentes méthodes pour définir les couleurs projetées sur le moniteur d'un ordinateur. Les modèles les plus usuels sont le RVB, Lab, YCbCr, CMJN et enfin le TSL.

### II.3.9.1. Le modèle RVB (RGB):

C'est un mode de composition des couleurs basé sur le principe des couleurs additives. Le rouge, le vert et le bleu sont les trois primaires utilisés dans la constitution de couleurs à partir de la source lumineuse. Une image RGB est composée de trois couches où chacune est codée comme une image en niveau de gris avec des valeurs allant de 0 à 255 [ZEG09].

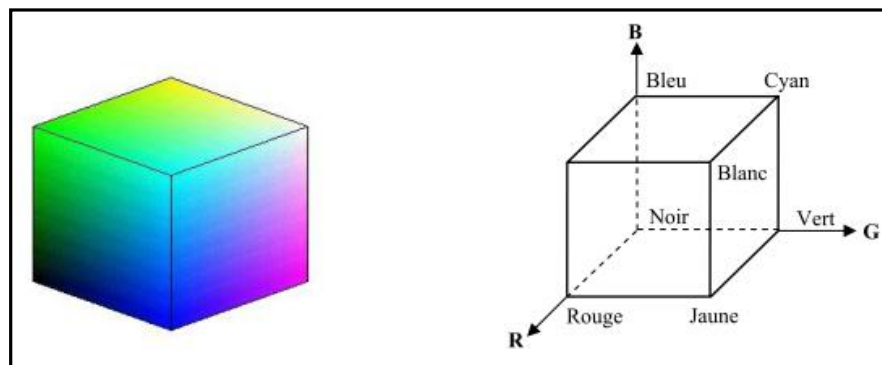


Figure II.1. L'espace du couleur RGB [ZEG09].

### II.3.9.2. Le modèle Lab:

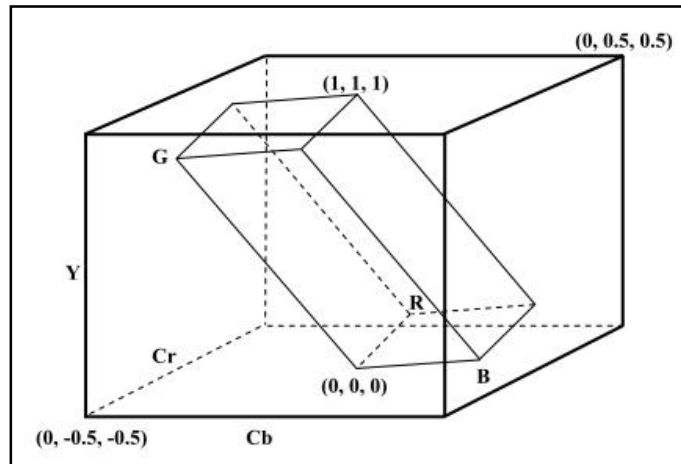
Les couleurs sont définies par trois valeurs: Luminosité codée en pourcentages, a et b correspondent à l'information colorée (chrominance) où la couleur est définie à partir d'un mélange de vert à magenta (a) et un mélange de bleu à jaune (b). Les valeurs sont comprises entre -120 et +120 pour a et b [RIC94].

### II.3.9.3. Le modèle YCbCr:

La représentation des couleurs dans l'espace YCbCr est une transformation linéaire donnée par les équations (II.1). Ce système appartenant aux systèmes luminance-chrominance, a été développé à l'origine pour assurer la compatibilité entre téléviseurs couleur et téléviseurs noir et blanc [POU03], puisque la composante luminance correspond aux nuances de gris, et les composantes de chrominance correspondent aux informations sur la couleur. Une simple transformation linéaire permet de passer d'un système RVB à un système YCbCr:

$$\begin{cases} Y = rR + vG + bB \\ Cb = a1(R - Y) + b1(B - Y) \\ Cr = a2(R - Y) + b2(B - Y) \end{cases} \quad [\text{II.1}]$$

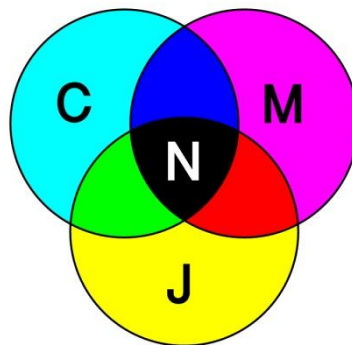
Sachant que:  $r, v, b, a_1, b_1, a_2$  et  $b_2$  sont des constantes.



**Figure II.2.** Espace de couleur YCbCr [ZEG09].

#### II.3.9.4. Le modèle CMJN (CMYK):

Cyan Magenta Yellow black (K pour Key black). Le cyan, le magenta, le jaune et le noir sont les quatre couleurs d'encre utilisées dans le procédé d'impression quadrichromique et dans tout procédé de reproduction à base de pigments ou de colorants. Sur chaque couche le pixel est défini par un pourcentage de la couleur correspondante. Le mode CMJN est la norme pour l'imprimerie. Les imprimeurs ajoutent une composante noire pour améliorer le rendu des aplats noirs. (Même si le noir peut aussi être obtenu par le mélange des trois autres composantes, il est plus économique à l'impression de n'appliquer qu'une couleur au lieu de trois [RIC94]).



**Figure II.3.** Les quatre couleurs de base de la quadrichromie.

### II.3.9.5. Le modèle TSL (HLS):

Le modèle TSL spécifie chaque couleur en termes de Teinte (Hue), Saturation et Luminosité [RIC94].

**Teinte:** C'est la longueur d'onde de la lumière réfléchie, ou transmise par un objet. Correspond à son emplacement sur la roue chromatique, dans un angle compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . Le spectre circulaire part du rouge, passe par le vert et le bleu pour revenir au rouge.

**Saturation:** Indique la pureté ou intensité de la couleur (de couleurs grisées 0%; aux couleurs vives 100%).

**Luminosité:** Indique la variation d'intensité lumineuse d'une couleur, entre 0% noir et 100% blanc.

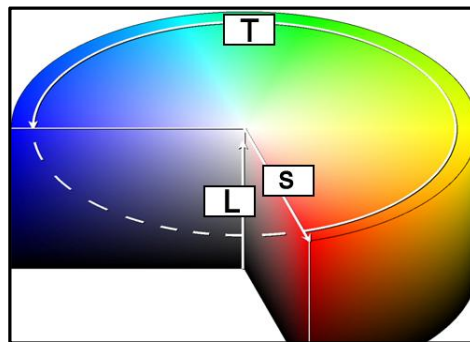


Figure II.4. Cercle TSL.

### II.3.10. L'image thermique:

L'image thermique représente est une image numérique spéciale, parce qu'elle a la propriété d'afficher l'énergie rayonnée au niveau de chaque pixel de l'image, L'image thermique est obtenu à partir d'un capteur thermique comme la thermographie infrarouge, cette dernière est une capture d'images à distance qui permet une analyse d'informations thermiques, elle est possible grâce à l'utilisation d'une caméra thermique infrarouge et cette image thermique représente une carte de distribution de l'énergie rayonnée de la cible.

### II.3.11. Les formats d'images:

Il existe plus d'une centaine de formats d'images, les plus couramment utilisés sont le BMP, le GIF, le JPEG, PNG, TIFF et le PSD. Certains de ces formats sont compressés afin de réduire l'espace physique nécessaire au stockage du fichier ou pour diminuer le temps de transfert sur le réseau [RIC94].

Format	Description
BMP	(Bitmap) Format matriciel non comprimé utilisé par Microsoft Windows. Il supporte un code de couleurs jusqu'à 24 bits par pixel.
GIF	(Graphics Interchange Format) Marque de commerce de CompuServe, avec compression de données LZW (Lempel, Ziv, Welch) brevetée par Unisys. L'image GIF est de couleurs indexées 8 bits et supporte la transparence. Le format GIF supporte aussi les animations et les commentaires, mais est rarement utilisé en vision artificielle.
JPEG	(Joint Photographic Experts Group) Ce format de données supporte la compression et fonctionne pour tous les niveaux de couleurs. La compression de l'image est ajustable mais avec perte d'information. Souvent utilisé pour créer des graphiques couleurs pour l'internet, il est rarement utilisé en vision artificielle parce que la compression soustrait des informations et introduit des artéfacts qui peuvent diminuer sensiblement les performances des algorithmes de reconnaissance de forme.
PNG	(Portable Network Graphics) Format devant remplacer le format GIF et régler tous les problèmes inhérents aux marques de commerce/brevets. Les couleurs indexées, les niveaux de gris et les images couleurs sont supportés, additionnés d'un canal alpha supplémentaire. PNG utilise également la compression de données mais, contrairement à JPEG, il ne perd pas d'informations.
TIFF	(Tagged Image File Format) Format conçu pour devenir un standard. Il existe plusieurs variations de format TIFF, si l'on considère le fait que le format TIFF supporte 6 différentes routines d'encodage et 3 différents modèles d'images: Noir et blanc, niveaux de gris et couleurs. L'image TIFF non comprimée est de l'ordre de 1, 4, 8, 24 bits par pixel. L'image TIFF comprimée avec l'algorithme LZW est de l'ordre de 4, 8, 24 bits par pixel.
PSD	C'est un format natif au logiciel Adobe Photoshop, mais, vu la grande diffusion des produits Adobe dans le domaine de l'image, le PSD est reconnu par plusieurs logiciels de traitement d'image. C'est surtout un format de travail, car il permet de conserver les calques, les masques et les couches de transparence. Il peut coder la couleur sur 8, 16, 24 ou 32 bits. Ce format est capable de gérer le noir et blanc, le RVB, et le CMJN.

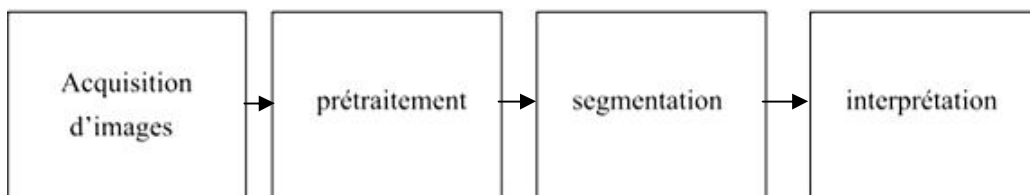
**Tableau II.1.** Principaux formats d'images [CRIM99].

## II.4. Les outils d'analyse:

Les outils d'analyse permettent d'extraire et d'analyser l'information utile dans l'image afin de déterminer, par exemple, si une pièce présente un défaut ou non à partir de la segmentation de l'image. La segmentation consiste soit à déterminer des régions dont les pixels sont connexes soit à déterminer la position des contours fermés. L'analyse d'images regroupe plusieurs disciplines, illustrées dans la figure II.5, que l'on classe en deux catégories:

*Les processus de bas-niveaux:* Qui nécessitent très peu d'informations sur le contenu des images. Il s'agit ici des processus de filtrage, d'amélioration et de restauration d'images, processus que nous regroupons sous le terme traitement d'images, ainsi que d'extraction d'indices.

*Les processus de haut-niveaux:* Qui fonctionnent en aval de ceux de bas-niveaux, et qui peuvent nécessiter des informations sur le contenu des images. Il s'agit de la construction tridimensionnelle, la reconnaissance de formes, les processus cognitifs de façon générale.



**Figure II.5.** Chaîne de traitement de l'image numérique [EDM09].

## II.5. Prétraitements:

Un des prétraitements que subie l'image est le filtrage. Il est destiné à appliquer des traitements locaux à celle-ci, c'est-à-dire que la valeur numérique d'un point va être réaffectée en fonction de ses voisins, et donc en fonction de la répartition spatiale des points et non plus exclusivement en fonction des valeurs numériques des points. Le filtrage est pour restaurer et améliorer l'image et aussi pour mettre en évidence les zones d'intérêt afin de préparer à l'analyse, on peut distinguer trois différents types de filtrage [NIC10]: Filtrage linéaire, non linéaire et morphologique.

### II.5.1. Filtrage linéaire:

Le filtrage linéaire est le produit de convolution discret à 2 dimensions entre une image  $I$  et une fonction représentée par un noyau (ou masque) de convolution  $N$ . Le résultat est une image  $J$ .

$$j(p, q) = \sum_i \sum_j N(p - i, q - j) I(i, j) \quad [\text{II.2}]$$

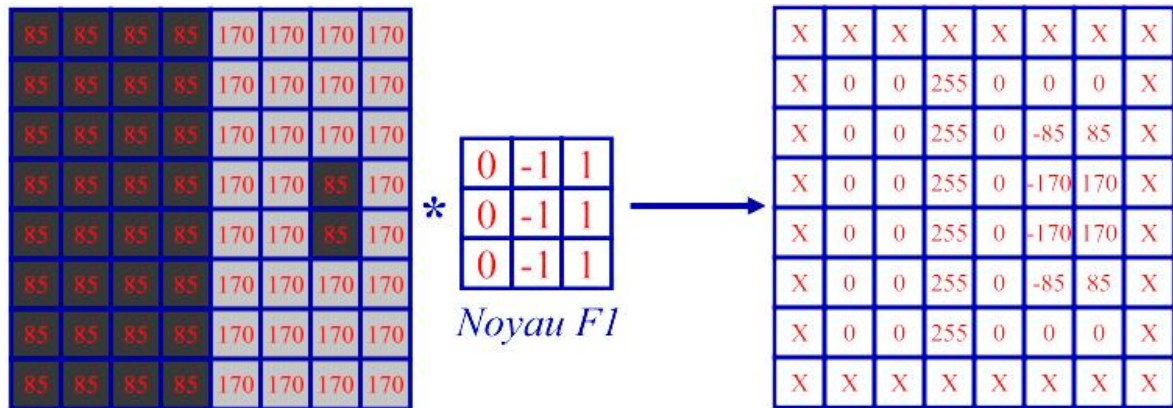


Figure II.6. Exemple de produit de convolution entre image 8 bits et un noyau [NIC10].

**II.5.2. Filtrage non linéaire:**

Le filtrage non linéaire a été développé pour pallier aux insuffisances des filtres linéaires. Ils permettent d'éliminer la présence de valeurs aberrantes et élimine aussi les perturbations impulsionnelles.

Le filtre médian est un des filtres non linéaires. Il permet de stocker des niveaux de gris dans un voisinage donné par le choix d'une valeur centrale qui est affectée au pixel median.

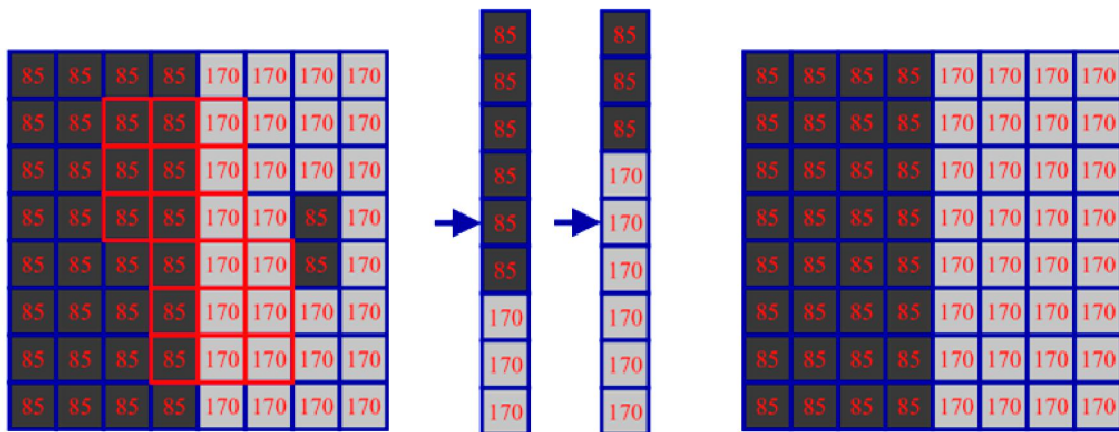


Figure II.7. Principe du filtre médian sur une image de 8 bits [NIC10].

### II.5.3. Filtrage morphologique:

Le filtrage morphologique modifie les formes dans l'image à l'aide d'éléments structurant. Il change un ensemble géométrique à travers l'application d'un élément de morphologie de géométrie connue appelé élément structurant centré en chaque pixel. Il y a plusieurs opérateurs de la théorie des ensembles comme: L'union, intersection, inclusion, exclusion, min et max pour les images binaires (les pixels en blanc "état logique 1" représentent les formes et les pixels en noir "état logique 0" représentent le fond) complémentation de l'élément ...etc.

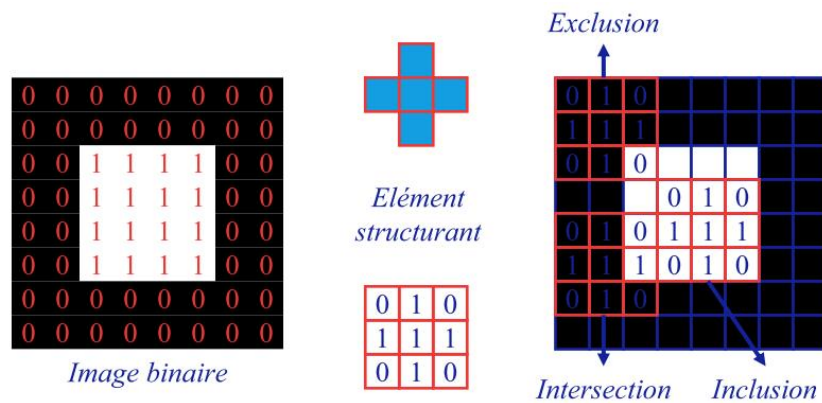


Figure II.8. Principe de la morphologie binaire [NIC10].

## II.6. Segmentation des images:

### II.6.1. Définition:

La segmentation consiste à diviser l'ensemble des pixels en régions connexes, homogènes et bien séparées. Ces régions possèdent une certaine uniformité pour une ou plusieurs caractéristiques (intensité, couleur, texture, ...). La segmentation est une étape importante pour l'extraction des informations qualitatives de l'image. Elle fournit une description de haut niveau. Chaque région est connectée à ses voisins dans un graphe et chaque région porte une étiquette donnant des informations qualitatives comme sa taille, sa couleur, sa forme, son orientation...etc. On regroupe généralement les algorithmes de segmentation en trois grandes classes [BAI03]:

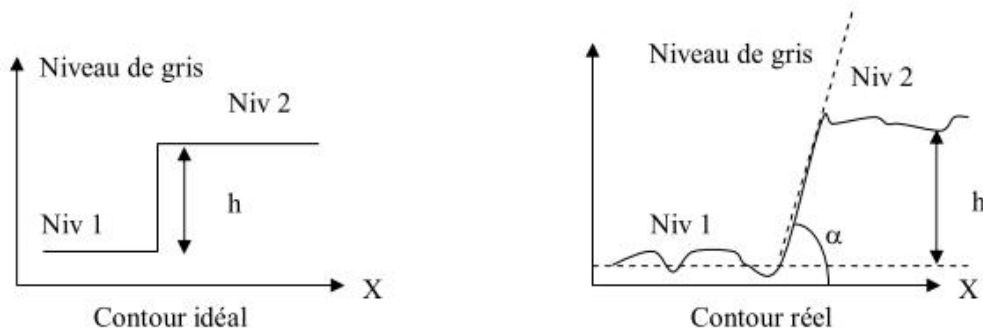
- Segmentation basée sur les pixels;
- Segmentation basée sur les régions;
- Segmentation basée sur les contours.



Figure II.9. Objectif de la segmentation [ZEG09].

### II.6.2. Extraction des contours:

Un contour est défini comme une brusque variation de niveau de gris dans l'image. Cette variation peut être caractérisée par son amplitude et sa pente.



**Figure II.10.** La différence entre contour idéal et réel [POU03].

La détection du contour dépend du choix du seuil qui va être comparé à l'amplitude  $h$ . Le processus d'extraction de contours peut être décomposé en plusieurs étapes:

- Mise en évidence des contours;
- Amincissement des contours;
- Binarisation des contours.

### II.6.3. Extraction des régions:

Ces méthodes se basent sur les propriétés intrinsèques de la région, le choix de ces propriétés détermine le critère de la segmentation qui peut être [ALA10]:

- Niveau de gris.
  - Couleur.
  - Texture.
  - Mouvement.
- **Segmentation selon le critère de la couleur:** Un bon exemple de cette segmentation est la segmentation des images aériennes:
- Végétation est extraite selon sa couleur verte ou jaune.
  - Labours est extraite selon sa couleur brun.
  - Forêts est extraite selon sa couleur vert.
  - Routes est extraite selon sa couleur gris.
  - Toits de maisons est extraite selon sa couleur rouge.



- **Segmentation selon le critère de mouvement:** Ce critère est appliqué sur les images dynamiques, donc une séquence d'images est indispensable, généralement on calcule la différence entre deux images successives. Les objets fixes seront éliminés et ils ne restent que les objets mobiles. Un signe peut être attribué selon que l'objet a bougé dans un sens ou dans autre.

Une estimation de la vitesse des objets peut être tirée en faisant le rapport entre le déplacement d'un objet entre deux images et la différence de temps de point de vue acquisition, une bonne estimation sera obtenue si cette différence de temps est très faible.

- **Segmentation selon le critère de texture:** Ce critère caractérise les motifs répétitifs qui apparaissent sur les surfaces d'objets, par exemple: Les tissus, un mur en brique. Cette répétition peut être régulière ou aléatoire tel que le gazon ou le sable.

#### II.6.4. Méthodes de segmentation en régions:

Il existe trois méthodes principales de segmentation en régions [ALA10]:

- Segmentation par séparation (Split).
- Segmentation par fusion (Merge).
- Segmentation par séparation-fusion (Split and Merge).

- **Méthode de segmentation par séparation:**

Cette méthode est classée dans la catégorie des méthodes de segmentation globales. Elle prend l'image entière comme point de départ et l'algorithme associé à cette méthode porte le nom «Quad trees».

On teste la validité du critère choisi pour la segmentation de manière globale sur une large zone de l'image (ça peut être l'image entière). Si le critère est valide donc l'algorithme s'arrête, sinon cette large zone va être décomposée en quatre sous zones et le critère sera testé sur chacune des quatre zones. Les zones vérifiant le critère vont rester entières et les autres seront décomposées en d'autres sous zones ...etc, jusqu'à ce que le critère est valide sur chaque région. À la fin de l'algorithme nous aurons toutes les régions homogènes.

- **Méthode de segmentation par fusion:**

Cette méthode est locale, elle démarre à partir d'une région de départ ensuite cette région commence à s'agrandir (growing) en intégrant tous les pixels voisins selon un critère d'appartenance à cette région. Cette méthode peut être utilisée pour intégrer un pixel à une région ou pour fusionner une région avec une autre. Les pixels doivent être des

voisins aux pixels constituant cette région de départ ou dans le cas des régions elles doivent être adjacentes.

- **Méthode de segmentation par séparation-fusion:**

Chacune des deux méthodes de segmentation précédentes possède des avantages et des inconvénients. Les méthodes de séparation fournissent une structure hiérarchisée permettant d'établir des relations de proximité entre les régions mais fractionnant une même région en sous régions distinctes.

La méthode de fusion permet d'obtenir un nombre minimal de régions mais elle ne précise pas les relations de proximité entre les régions, d'où l'intérêt d'associer les deux méthodes dans une seule méthode appelée séparation-fusion.

## **II.7. L'interprétation:**

L'interprétation en traitement d'images se réduit à un problème de classification qui est un processus de reconnaissance des formes. Elle peut être interprétée comme un problème de données incomplètes. En chaque site (pixel) s'expriment des données de deux types différents: La donnée observée et l'autre cachée (la classe que l'on cherche à trouver). Ainsi, la classification vise à attribuer aux pixels des étiquettes dont l'origine est thématique. Elle est divisée en deux classes: L'une est supervisée et l'autre est non supervisée [DAN05].

### **II.7.1. Classification non supervisée (ou non dirigée):**

La classification non supervisée ou non dirigée détermine automatiquement les classes. Les algorithmes des K-moyennes, centres mobiles, (nuées dynamiques appliquées au centre de gravité) et des distances adaptatives sont des méthodes itératives qui à chaque itération calculent respectivement les centres de gravité ou les distances associées aux classes. Les fonctions discriminantes dépendent, soit des paramètres des densités de probabilité, soit d'un jeu de coefficients qui peuvent être évalués théoriquement par des études physiques, la classification est alors totalement non supervisée.

Elle peut être semi-supervisée quand certains paramètres sont fixés par l'utilisateur en fonction du type d'image et de scène, ou que certains objets sont reconnus par l'utilisateur qui peut ainsi initialiser le processus de recherche des classes pour certaines d'entre elles.

### II.7.2. Classification supervisée ou dirigée:

Les classes sont définies à partir des besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image, ce qui nécessite une étape d'apprentissage préalable à la classification. La classification supervisée, comme dans certains réseaux neuronaux, consiste à déterminer les classes par un apprentissage qui peut être effectué soit sur chaque scène traitée, soit pour chaque type d'application ou encore à chaque type de capteur utilisé. Cette étape influence fortement les résultats de la classification.

Pour l'estimation dirigée (avec apprentissage), on dispose pour chaque classe de l'image des vecteurs caractéristiques de plusieurs pixels de l'image (échantillons des classes) dont on connaît a priori la classe d'appartenance. En supposant le processus ergodique, les paramètres sont estimés à l'aide des méthodes classiques d'estimation telles que la méthode du maximum de vraisemblance.

Les échantillons sont sélectionnés sur des observations faites sur le terrain (vérités terrain) en repérant au sol des parcelles représentatives des différents éléments devant être présent dans la classification de la zone étudiée, si possible à une date idéalement identique à celle des prises de vues. À ces vérités terrain peuvent s'ajouter des connaissances thématiques obtenues auprès d'un expert. Les échantillons de classes stables temporellement, peuvent être sélectionnés sur la base de cartes précises de la région.

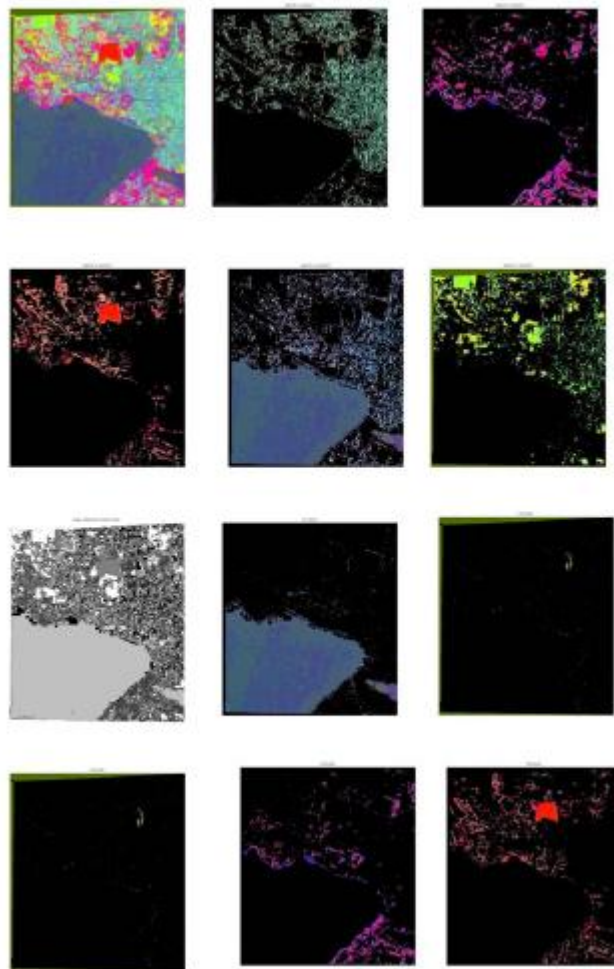
Les classifications supervisées sont nécessaires lorsque les besoins thématiques sont pointus. En effet les techniques non supervisées se limitent souvent à la reconnaissance de grandes classes thématiques.

### II.8. Segmentation en vue d'une classification par la méthode des K-moyennes:

La méthode des K-moyennes (K-means), qui est une méthode itérative, est un outil de classification classique permettant de répartir un ensemble de données en classes homogènes. C'est un algorithme de quantification vectorielle, et est l'un des algorithmes les plus connus en classification non supervisée.

En traitement d'images couleurs, la plupart des images vérifient localement des propriétés d'homogénéité, notamment en termes d'intensité lumineuse. L'algorithme des K-means permet donc d'apporter une solution à la segmentation d'images couleurs.

Un des travaux se basant sur le K-means est celui de Anil Z Chitade et S. K. Katiyar, Ils utilisent les K-moyennes sur des images satellitaires après plusieurs prétraitements. Les résultats des différentes classes sont en figure II.11.



**Figure II.11.** Résultats de la classification par K-means sur une image satellitaire [ANI10].

## II.9. Conclusion:

L'homme ne connaît pas le traitement d'images qu'au début de siècle XX, il cherchait toujours de développer les outils d'analyse pour profiter le maximum de l'image dans les plusieurs domaines.

L'image a plusieurs de caractéristiques qui se distingue, dont: Le format de l'image, sa taille, la résolution, les démentions, le type de l'image (noir et blanc, niveaux de gris ou couleur), ..etc. Mais pour faire l'analyse d'une image il faut la convertir à une image numérique.

On utilise des techniques pour améliorer, extraire ou restaurer l'image, pour cela on applique le filtre adéquat et utilise la segmentation pour séparer l'image aux régions.

Le but du traitement d'images est à la fois simple dans son concept et difficile dans sa réalisation. Simple en effet, puisqu'il s'agit de reconnaître des objets que notre système visuel perçoit rapidement, du moins pour la majorité d'entre eux. Difficile cependant, car dans la grande quantité d'information contenue dans l'image, il faut extraire des éléments pertinents pour l'application visée et ceci indépendamment de la qualité de l'image.

Le traitement d'image s'est donc doté d'outils et de méthodes puissants issus de domaines aussi variés que les mathématiques, le traitement du signal, ou l'informatique.

Le traitement d'image touche à l'heure actuelle de nombreux domaines, avec des objectifs aussi variés que l'aide au diagnostic pour les images médicales, la vision artificielle ou l'analyse des ressources terrestres à partir des images prises par satellite.

## Détection automatique les zones de défauts dans les panneaux PV

Le Troisième chapitre présente l'essentiel de notre travail sur la détection des zones de défauts dans les panneaux photovoltaïques via le traitement des images thermiques. Ce chapitre est organisé en deux grandes parties:

Dans la première nous essayons de situer le problème du traitement automatique de l'image thermique par des connaissances acquises dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar. Nous exposons les techniques d'analyses les plus utilisées dans ce domaine à travers le logiciel FLIR QuickReport qui est commercialisé par le premier constructeur mondial de caméras infrarouges FLIR Systems.

Nous consacrons la deuxième partie à notre travail qui est basé sur l'approche des K-moyennes pour la classification de l'image thermique. Nous essayons de simuler une des fonctions du logiciel FLIR qui est la détection des zones à température élevée dans les panneaux photovoltaïques.

### **III.1. Introduction:**

Le domaine de la vision est vaste. Nous avons donc décidé d'axer cette étude sur les images captées par la thermographie infrarouge. Un nombre croissant d'applications nécessitent des logiciels d'analyse d'images pour prendre certaines mesures.

L'analyse d'image traditionnelle a atteint un stade mature et un nombre significatif de produits logiciels de qualité qui sont maintenant disponibles sur le marché. Un des outils les plus populaires dans le domaine d'imagerie thermiques est FLIR Quick Report de l'entreprise FLIR, mais il entre en compétition directe ou indirecte avec quelques produits similaires.

Le but de ce chapitre est de prendre en charge l'image thermique pour une maintenance préventive et essayer de simuler une des fonctions du logiciel FLIR qui est la détection des zones de défauts. Pour atteindre ce but nous avons divisé ce chapitre en deux grandes parties. Dans la première nous présentons quelques fonctionnalités de ce logiciel pour situer le problème. La seconde partie est consacrée à notre étude ainsi qu'aux résultats pratiques obtenus

### **III.2. Partie I:**

#### **III.2.1. Techniques d'analyse d'images thermiques:**

Les images thermiques sont totalement différentes des images visibles, donc il faut assimiler de nouvelles techniques d'analyse.

L'analyse d'images thermiques se traduit souvent par la recherche de zones singulières dont le comportement diffère du reste de l'image. C'est la raison pour laquelle les appareils disposent de nombreuses fonctions permettant d'augmenter artificiellement les contrastes locaux. Le maniement de ces fonctionnalités nous permettra de trouver plus facilement ce que nous cherchons à mettre en évidence dans une image.

Nous allons présenter quelques techniques éprouvées pour se familiariser avec l'analyse d'image. Toutes ces méthodes reposent sur des processus de développement long ainsi que sur de nombreuses expérimentations pratiques. La thermographie n'est pas une science figée. Elle nous permet au contraire d'apprendre toujours davantage, c'est ce qui la rend si passionnante.

Les trois fonctions les plus importantes pour l'amélioration des images thermiques sont: Le cadrage thermique, l'isotherme et les palettes. [ITC04]:

### III.2.1.1. Cadrage thermique:

Le cadrage thermique est l'ajustement de l'échelle de l'image permettant d'optimiser le contraste pour les besoins de l'analyse.

Le cadrage thermique suppose l'utilisation des contrôles de niveau et de gain de la caméra. Lorsque la zone d'intérêt de l'image est choisie, il faut ajuster ces deux paramètres de telle sorte que les couleurs de la palette couvrent au plus juste cette partie de l'image. Les zones moins intéressantes de l'image peuvent, quant à elles, se situer en dehors de l'échelle. Elles seront alors généralement représentées en noir ou blanc.

En utilisant la fonction réglage automatique présente sur la plupart des caméras, quasiment toutes les zones de l'image seront couvertes par l'échelle de couleur. Les extrémités de l'image peuvent parfois se situer légèrement en dehors de l'échelle. Nous obtenons ainsi une vue d'ensemble de l'objet cible nous permettant de discriminer correctement la zone d'intérêt. L'intégralité de l'image est dite: Cadrée thermiquement (Voir la figure III.5).

### III.2.1.2. Isotherme:

L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons opposés. Il marque un intervalle de température apparente égale.

Nous savons déjà que les couleurs au sein d'une image ne représentent pas la température réelle. L'isotherme remplace uniquement ces couleurs par une autre contrastant plus avec les couleurs utilisées dans l'image. L'isotherme peut être déplacé de haut en bas sur l'échelle et élargi ou réduit selon vos besoins.

Le contraste est encore une fois l'élément clé. Lorsque nous observons des images thermiques faibles, il est nécessaire d'apporter une assistance à notre vue. Il est possible d'utiliser l'isotherme pour suivre le flux de chaleur, ou repérer la présence d'un éventuel flux de chaleur. Si l'isotherme est placée à plat sur une surface ou un objet cible, cela signifie qu'il n'y a pas de flux de chaleur traversant cette surface ou cet objet (Voir la figure III.6).

### III.2.1.3. Palettes:

Une palette assigne différentes couleurs pour marquer des niveaux de température apparente définis. Elle peut être plus ou moins contrastée selon les couleurs utilisées.

Une image thermique peut être généralement affichée avec un maximum de 256 nuances de couleur ou de gris simultanément. Sur une échelle de gris, la couleur noire se trouve à l'une des extrémités et elle s'éclaircit progressivement à chacun des 256 pas



jusqu'à devenir blanche. L'image couleur permet, quant à elle, d'utiliser une large gamme de couleurs pour obtenir un meilleur contraste. Les couleurs doivent être judicieusement assorties les unes aux autres, pour donner un semblant de lissé à l'image, et pour qu'elle ne soit pas pénible à observer.

Ne choisissez pas simplement une palette parce que nous la trouvons jolie, et n'utilisez pas la même palette pour toutes vos opérations. Changez de palette au cours de l'analyse pour voir apparaître d'éventuelles modifications. Nous obtiendrons parfois des résultats surprenants. En définitive, si une seule palette suffisait, votre appareil ne serait équipé que de celle-ci.

Pour choisir une palette adéquat il faut respecter la règle suivante: Utilisez des palettes très contrastées sur des objets cible peu contrastés. Utilisez des palettes peu contrastées sur des objets cible très contrastés (Voir la figure III.7).

### **III.2.2. Analyse d'une image thermique par FLIR QuickReport:**

La plupart des caméras thermiques comportent un logiciel avec des fonctions de base d'analyse et de création des rapports. Elles possèdent des outils de mesure élémentaires comme la mesure en un point.

Pour obtenir d'un plus grand nombre d'outils d'analyse et de documentation, le fabricant doit nous proposer un pack logiciel plus étendu. Par exemple, ce pack doit comporter de puissantes fonctions d'analyse des températures en plusieurs points, sur des zones, calcul de différences, être capable de suivre les tendances, armé de bons résultats d'analyse et d'un bon rapport d'inspection. Le logiciel FLIR QuickReport répond à toutes ces propriétés.

### **III.2.3. Le logiciel FLIR QuickReport:**

FLIR QuickReport est un logiciel qui permet d'afficher, analyser, modifier les images thermique captées par une caméra infrarouge, il permet aussi de création des rapports d'inspection.

Par ce logiciel, on peut savoir la température de chaque point (Pixel) de l'image thermique.

Le logiciel est une partie soft des caméras thermiques fabriqués par l'entreprise FLIR, plus de ça, il prend en charge les formats de fichiers radiométriques (IMG et JPG) et non radiométriques (JPG et BMP).

### III.2.3.1. Les éléments de la fenêtre:

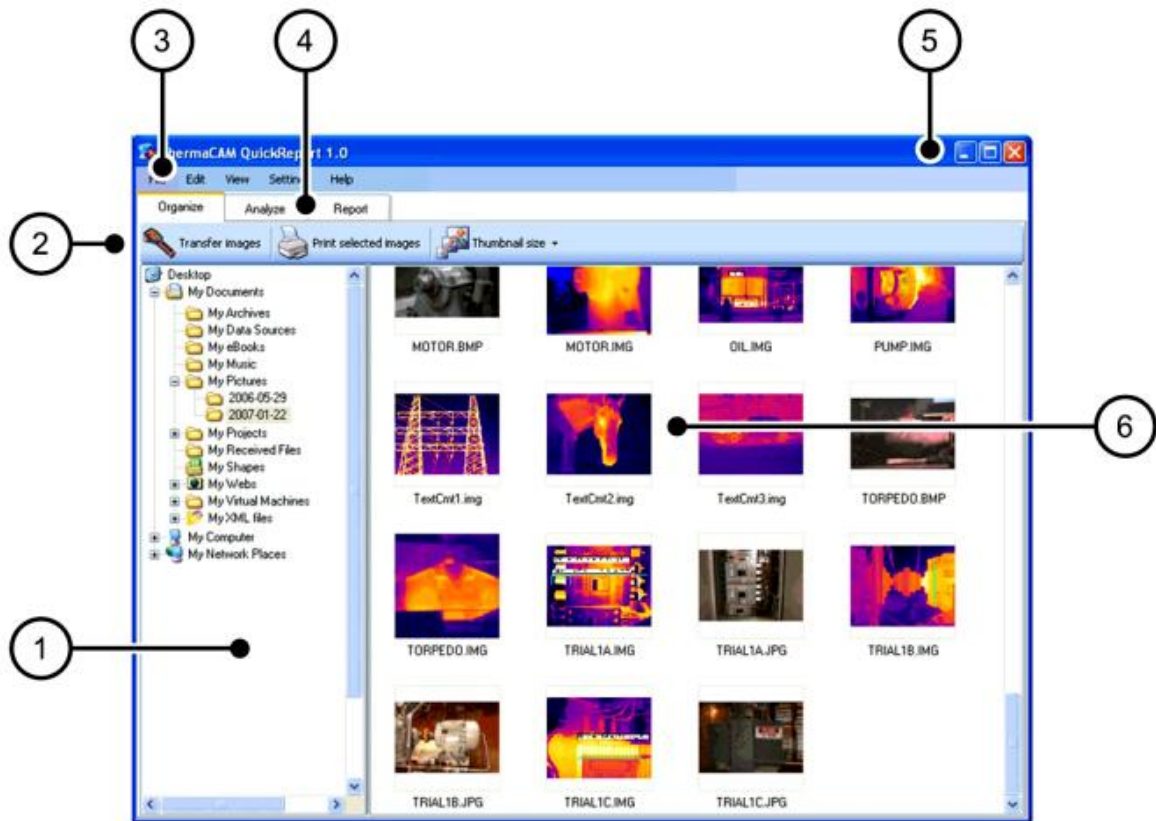


Figure III.1. Les éléments de la fenêtre (Onglet Organiser) [MUF08].

- 1) Volet dossiers.
- 2) Boutons (de gauche à droite): Transférer les images, imprimer les images sélectionnées et taille de miniature.
- 3) Barre de menus.
- 4) Onglet (de gauche à droite): Organiser, analyser et créer un rapport.
- 5) Bouton réduire, agrandir et fermer.
- 6) Volet image.

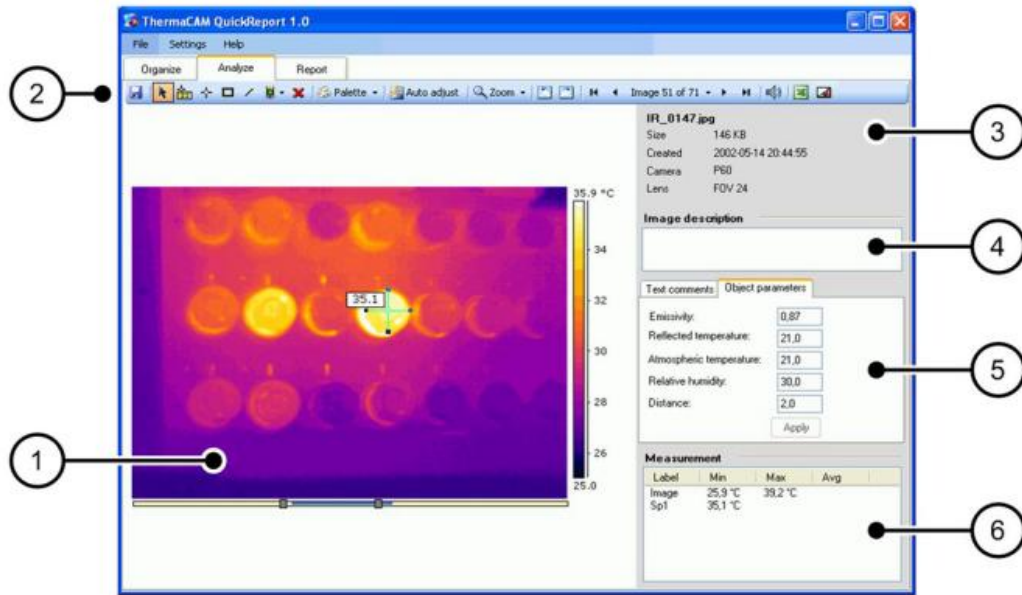


Figure III.2. Les éléments de la fenêtre (Onglet Analyser) [MUF08].

- 1) Image infrarouge avec outils de mesure.
- 2) Barre d'outils de l'image.
- 3) Informations caméra.
- 4) Zone de texte et de description d'image.
- 5) Les onglets: Commentaires texte et paramètres objet.
- 6) Tableau de résultats de mesure.

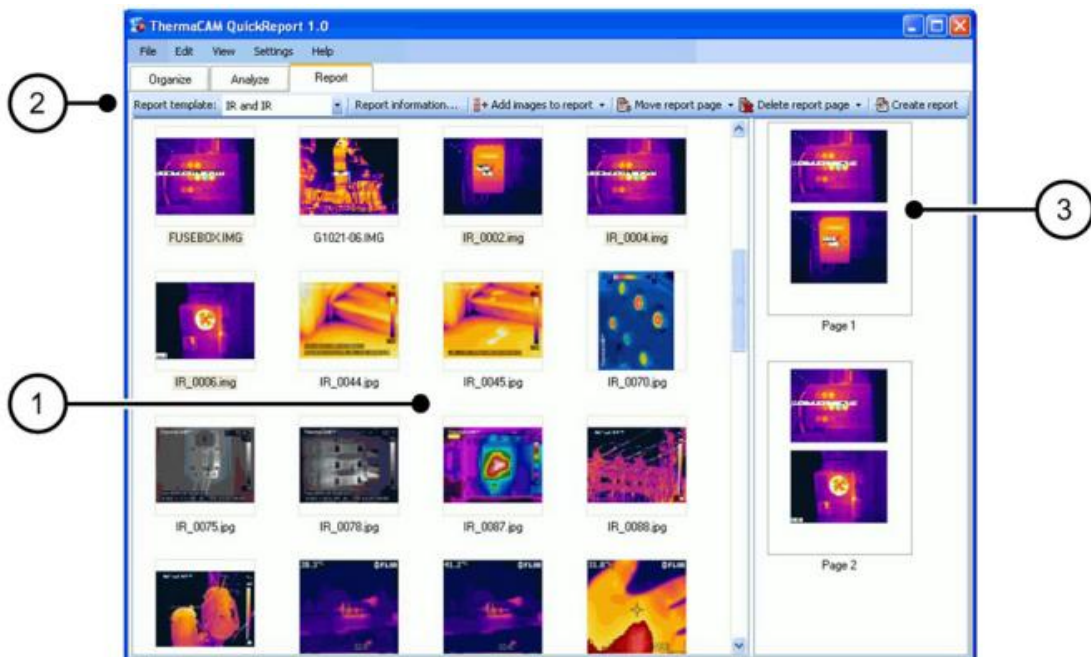


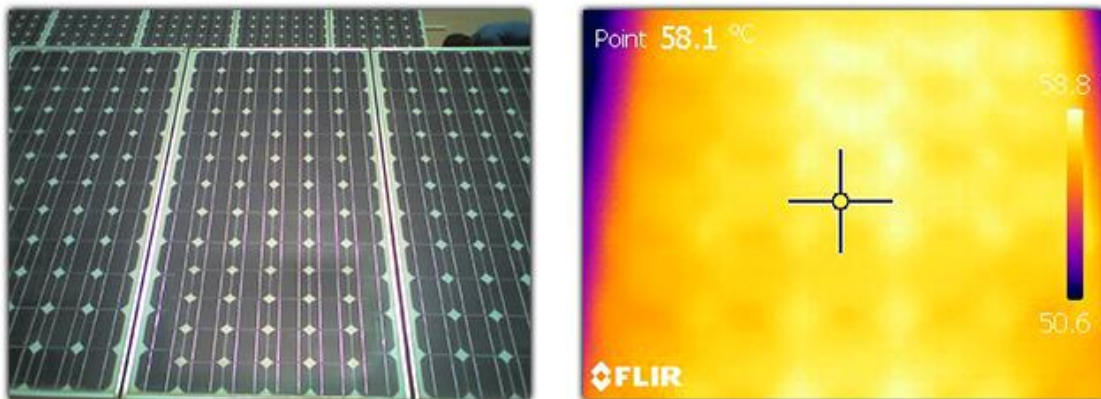
Figure III.3. Les éléments de la fenêtre (Onglet Créer un rapport) [MUF08].

- 1) Volet image.
- 2) Boutons qui permet de configurer votre rapport d'inspection (de gauche à droite):  
Créer un rapport sur un modèle, Créer un rapport d'informations, ajouter des images au rapport, Déplacer une page de rapport, supprimer une page de rapport, créer un rapport.
- 3) Volet aperçu de rapport.

### III.2.4. L'application d'un cas:

Appliquons ces techniques d'analyse sur une image thermique prise avec la caméra infrarouge "FLIR T400" durant notre recherche au sein de URERMS (l'unité de recherche en énergies renouvelable en milieu saharien) à Adrar.

L'image est captée pour des panneaux photovoltaïques en Mellouka-Adrar, l'image numérique de ces panneaux n'indique rien pour l'observateur, mais lorsqu'on prend l'image thermique du même scène on remarque qu'il y a des défauts au niveau de quelques panneaux.



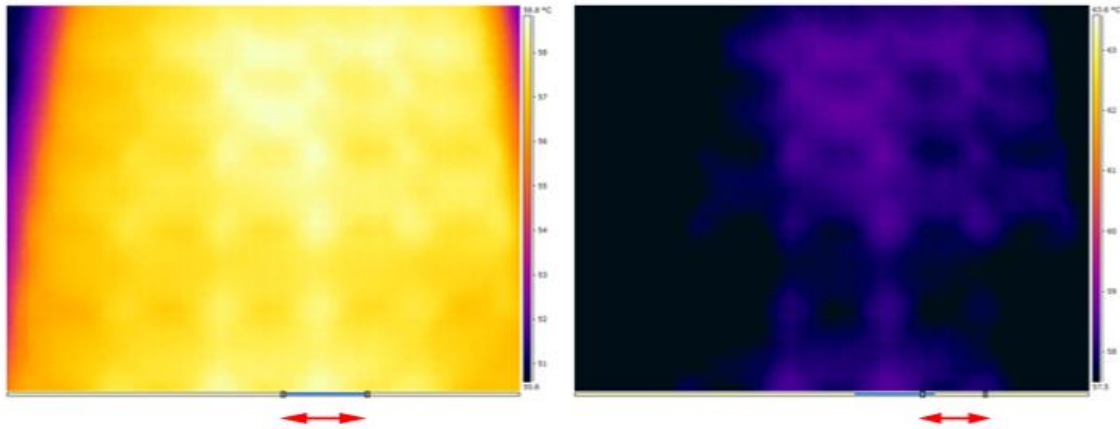
**Figure III.4.** L'image numérique des panneaux PV à gauche et l'image thermique à droite.

Après l'exécution du logiciel, on ouvre 'PV thermique.JPG', puis on applique les techniques d'analyse d'une image thermique.

Pour la technique de cadrage thermique, on remarque que l'échelle de l'image à gauche est réglée automatiquement par le logiciel de la caméra, qui a déterminé que la température la plus basse était de 50.8 °C et la température la plus haute était de 58.6 °C.

On réduit l'échelle de l'image thermique de [50.8 °C , 58.6 °C] à [57.1 °C , 63.2 °C]. Le résultat est un meilleur contraste, cette image est plus facile à analyser car la zone

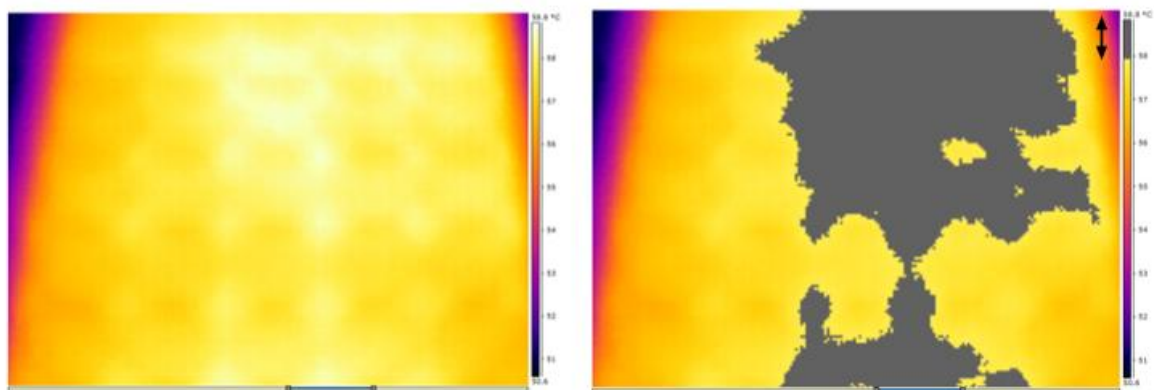
thermique est mieux mise en évidence, et on remarque précisément que le centre de panneaux est chauffé plus que les autres zones.



**Figure III.5.** Réglage automatique à gauche et cadrage thermique à droite.

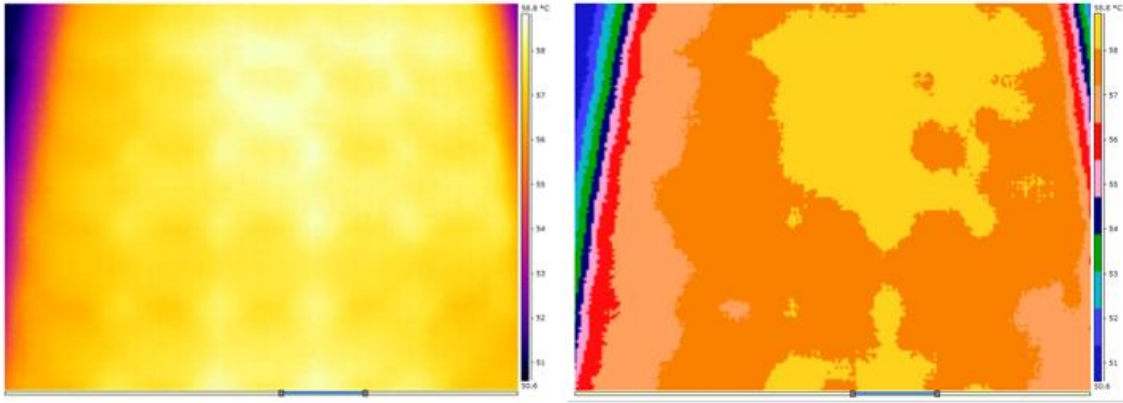
Pour appliquer la technique isotherme sur l'image thermique, toujours dans l'onglet analyser, on prend l'outil isotherme, cet outil permet de créer des isothermes, c'est à dire d'affecter des couleurs spécifiques pour des plages de température données. L'outil sélectionné nous permet de déplacer les isothermes dans l'échelle de température.

L'outil contient plusieurs options qui sont: Supérieur, intervalle, inférieur, alarme point de rosée et alarme d'isolation avec sa configuration. On prend comme exemple l'isotherme supérieure telle qu'on déplace l'isotherme dans l'échelle de température jusqu'à 57.9°C pour déterminer la zone la plus chaude dans l'image. Le résultat est une zone de couleur différente (Gris).



**Figure III.6.** L'image référence à gauche et l'isotherme supérieure à droite.

Pour appliquer la technique palette on choisit l'outil palette, cet outil permet de modifier la palette de couleurs dans une image. L'objectif principal étant de créer des effets de contraste différents au sein de l'image. Il y a dix palettes dans notre logiciel qui sont: Iron, Grey, medical, yellow, rain, greyred ...etc.



**Figure III.7.** L'image référence à gauche et l'image à palette medical à droite.

### III.3. Partie II: Approche proposée pour la détection des zones danger sur l'image thermique:

Le but de notre travail est de traiter l'image thermique d'une manière automatique et ce afin de détecter les zones de défauts présentes sur celle-ci. Notre objectif principal est la maintenance préventive dans les panneaux photovoltaïques. Tous nos essais et résultats des traitements ont été menés avec l'outil de développement MATLAB R2008a.

Matlab est un outil de programmation de calcul scientifique permettant de développer des solutions à des problèmes techniques. Il permet de réaliser du calcul numérique et de tracer des graphiques pour visualiser et analyser les données.

Il dispose d'un langage et d'un environnement de programmation interactifs ainsi que d'outils pour concevoir des interfaces utilisateur graphiques. Matlab est associé à des boîtes à outils appelé: Toolbox, permettant d'accéder à des fonctions spécifiques à un domaine d'application comme le traitement d'images par exemple.

Les opérations d'analyse d'images réalisées avec Matlab nécessitent ainsi la toolbox Image Acquisition et la toolbox Image Processing. Les fonctions de cette dernière peuvent être listées en tapant la fonction « help images » dans l'éditeur de commande de Matlab.

Matlab supporte 4 formats d'images qui sont: Les images binaires, les images d'intensités (à niveaux de gris), les images couleurs RGB et les images couleurs indexées.

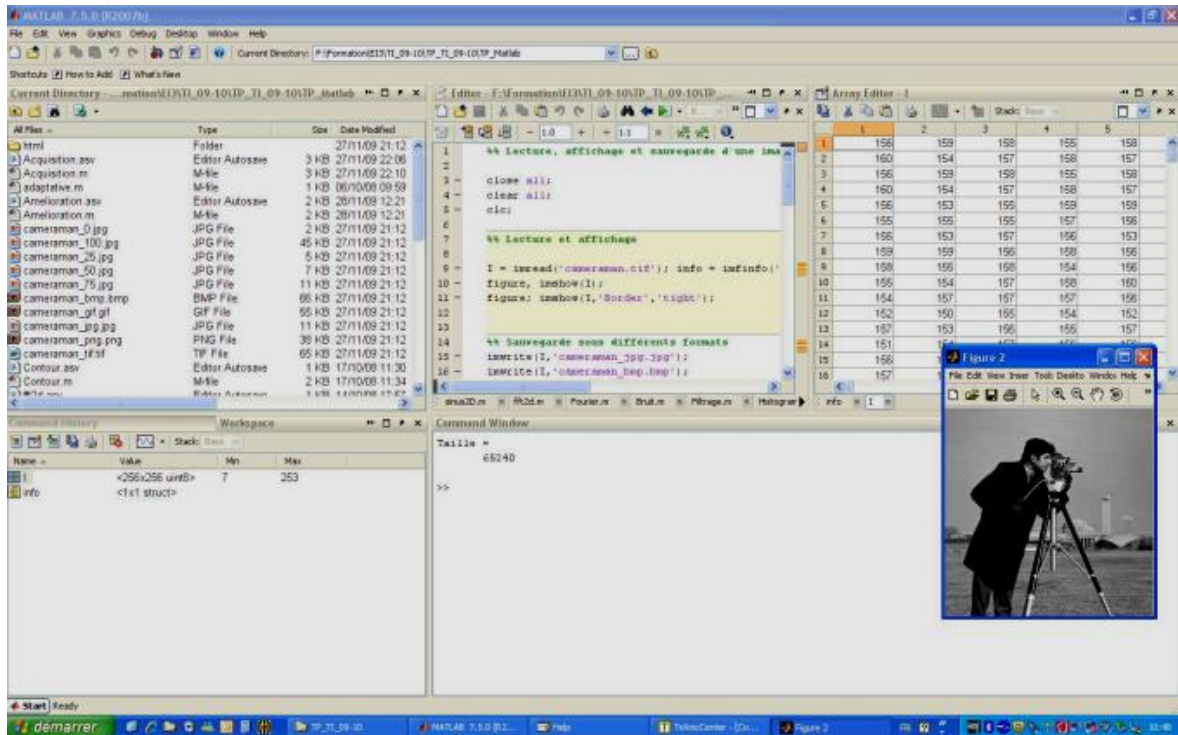


Figure III.8. Interface Matlab.

### III.3.1. Acquisition des images thermiques:

Les images thermiques sur lesquelles nous allons appliquer notre approche ont été obtenues d'une seule source. Puisque notre objectif principal est la maintenance préventive dans les panneaux photovoltaïques, nous avons opté pour URERMS (l'unité de recherche en énergies renouvelable en milieu saharien) à Adrar.

Notons que l'acquisition de l'image thermique, qui est une étape importante et qui doit se dérouler dans les meilleures conditions, repose sur plusieurs paramètres.

### III.3.2. Étape de classification de l'image thermique par application de l'algorithme des K plus proches voisins:

#### III.3.2.1. Problématique:

Ce travail rentre dans le cadre de la maintenance préventive en milieu industriel en particulier dans les panneaux photovoltaïques où le rendement est un paramètre très important dans la production de l'énergie électrique.

Prévenir ce problème revient à le contrôler à temps par élimination de causes susceptibles d'engendrer de lourds coups économiques. Une de ces causes est le surchauffage dans les panneaux PV.

L'apport de la thermographie dans ce domaine a été très bénéfique puisque cette technique permet une bonne maintenance préventive de ces installations à travers le traitement de son image.

Le traitement automatique de l'image thermique se réduit en vision artificielle à une simple tâche de classification de l'image couleur et donc à un problème de reconnaissance des formes en intelligence artificielle.

Nous avons décidé de mener cette tâche à l'aide d'un algorithme très simple de classification de l'image couleur qui est le K-means et comparer ses résultats avec le logiciel FLIR. Les détails de la démarche sont présentés dans la section suivante.

### III.3.2.2. K-means sur l'image thermique:

Comme nous l'avons vu dans le deuxième chapitre, le K-means est une approche basée sur segmentation et classification de groupes de pixels à des classes couleurs.

On va appliquer cette méthode sur l'image thermique nommée 'PV thermique.jpg' en utilisant le Matlab pour détecter le segment le plus chaud dans l'image.

L'algorithme est le suivant:

- Choisir  $k$  points aléatoires qui représentent la position moyenne des partitions  $\mathbf{m}_1^{(1)}, \dots, \mathbf{m}_k^{(1)}$  initiales.
- Répéter jusqu'à convergence ou jusqu'à atteindre le nombre d'itération donné:
  - assigner chaque observation  $x$  (pixel) à la partition  $S$  la plus proche selon une métrique:

$$S_i^{(t)} = \left\{ X_j : \left\| X_j - m_i^{(t)} \right\| \leq \left\| X_j - m_{i^*}^{(t)} \right\| \text{ for all } i^* = 1, \dots, k \right\} \quad \text{[III.1]}$$

- mettre à jour la moyenne de chaque classe:

$$m_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \times \sum_{X_j \in S_i^{(t)}} X_j \quad \text{[III.2]}$$

La convergence est atteinte quand il n'y a plus de changement. Le véritable problème dans cette méthode est de déterminer la valeur  $K$  (nombre de classes) qui nous permet de donner exactement les différentes classes sur l'image.



Pour cette raison nous allons procéder à un jeu d'essai à travers des valeurs aléatoires pour obtenir un résultat conforme visuellement.

### III.3.2.3. Étapes de traitement par K-means sur l'image thermique sous Matlab:

#### Étape 1: Lecture l'image:

Pour la lecture de l'image qui représente un panneau photovoltaïques en Matlab on utilise l'instruction 'imread'. Sur cette image la défauts (zone surchauffée) est indiqué en blanc (résultats du FLIR).

```
PV = imread('PV thermique.jpg');
image(PV), title('panneau photovoltaïque');
text(size(PV,2),size(PV,1)+15,...
'Image is created by thermography, UREMS2014', ...
'FontSize',10,'HorizontalAlignment','right');
```

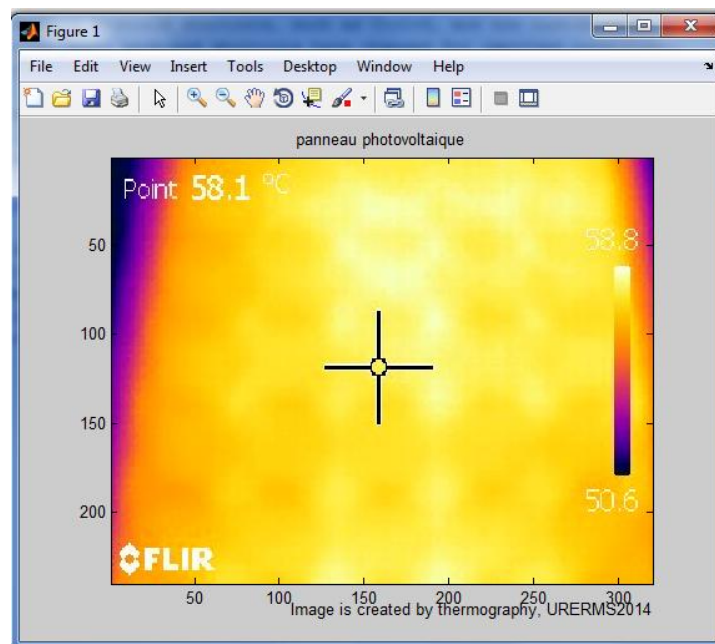


Figure III.9. Chargement de l'image «PV thermique.jpg».

#### Étape 2: Convertir l'image du modèle RVB au modèle Lab:

Dans cette étape on va convertir l'image du modèle RVB au modèle Lab. Ce dernier (modèle Lab) est composée de 'L' qui est la luminosité, avec 'a' qui est un mélange de vert et de magenta et 'b' qui est un mélange de bleu et jaune. Pour réaliser ça on utilise la fonction : 'makecform('srgb2lab')'.

```
cform = makecform('srgb2lab');
lab_PV = applycform(PV,cform);
```

**Étape 3: Classifier les couleurs à travers la méthode K-means:**

K-means représente chaque pixel par sa position dans le modèle de couleurs. Il faut spécifier le nombre de groupes ou de partitions, le type de distance métrique (euclidienne par exemple) entre les classes et le nombre d'itérations. La fonction K-means de Matlab prend en charge cette partie. Pour commencer on porte le K à 2 classes.

```
ab = double(lab_PV(:, :, 2:3));
nrows = size(ab,1);
ncols = size(ab,2);
ab = reshape(ab,nrows*ncols,2);

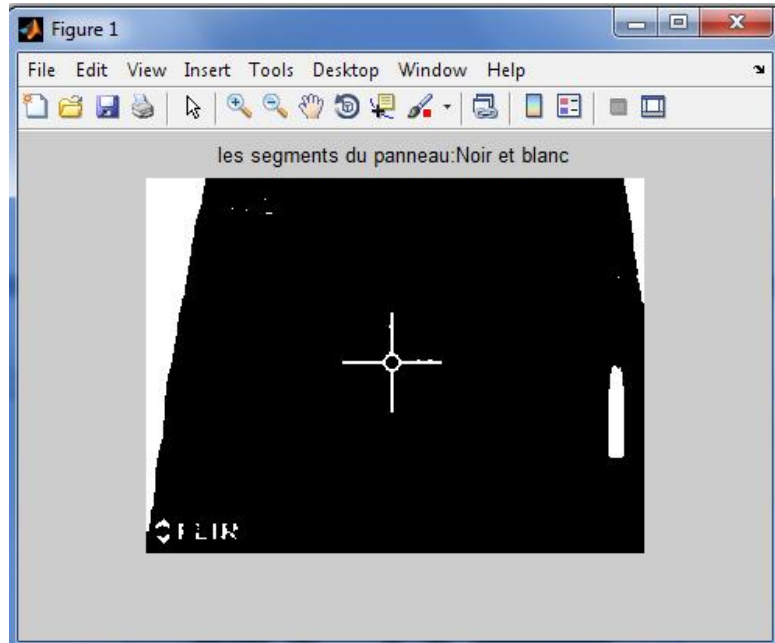
nColors = 2;
% repeat the clustering 3 times to avoid local minima
[cluster_idx cluster_center] =
kmeans(ab,nColors,'distance','sqEuclidean', ...
'Replicates',3);
```

**Étape 4: Distinguer chaque pixel de l'image après exécution du K means:**

Après classification par K-means chaque classe est caractérisée par un niveau de gris moyen et chaque pixel de l'image appartient à une classe résultat. Avec 2 classes (K=2) le pixel est soit dans la classe 1 soit dans la classe 2 qui sont labelisées et indexées.

Sur notre image thermique *PV thermique.jpg* le nombre 2 du K engendre 2 classes objets et fond de l'image (voir Figure III.10). En analysant l'image nous remarquons que nous avons perdu une grande partie de l'information à rechercher d'où un choix non conforme du K.

```
pixel_labels = reshape(cluster_idx,nrows,ncols);
imshow(pixel_labels,[]), title('les segments du panneau:Noir
et blanc');
```



**Figure III.10.** Décomposition de l'image en deux segments  $K=2$  (Noir et blanc).

Pour remédier à ce problème nous allons augmenter le nombre de classes à 4 et répéter les instructions précédentes :

```
ab = double(lab_PV(:,:,2:3));
nrows = size(ab,1);
ncols = size(ab,2);
ab = reshape(ab,nrows*ncols,2);

nColors = 4;
% repeat the clustering 3 times to avoid local minima
[cluster_idx cluster_center] =
kmeans(ab,nColors,'distance','sqEuclidean', ...
        'Replicates',3);
pixel_labels = reshape(cluster_idx,nrows,ncols);
imshow(pixel_labels,[]), title('les segments du
panneau:Niveaux de gris');
```

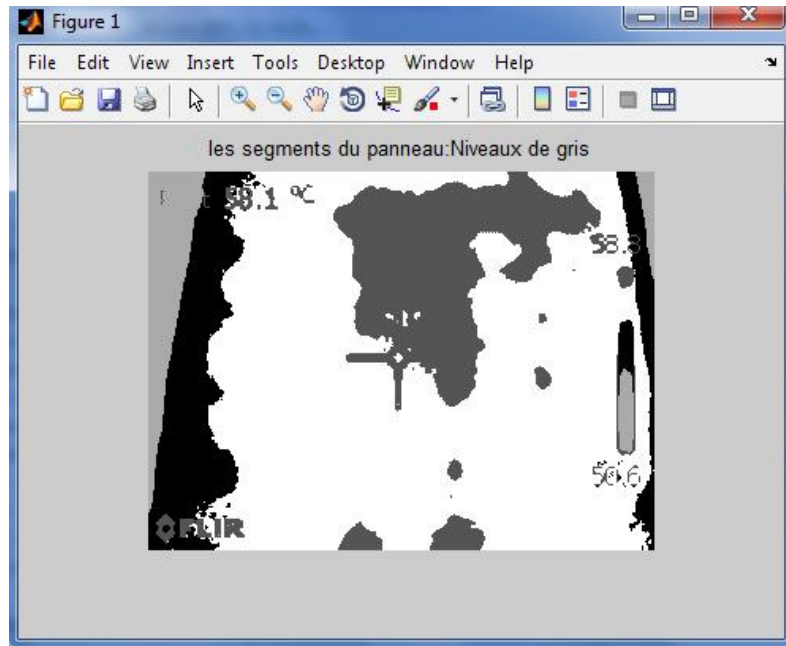


Figure III.11. Résultats pour  $K=4$ .

On remarque que l'image est segmentée en quatre groupes. Nous pouvons observer clairement que la partie désirée est bien déterminée par un niveau de gris spécifique. On peut dire que la meilleure valeur pour  $K$  est 4, car il détecte précisément la zone de défaut qui apparaît clairement à l'image de référence.

#### Étape 5: Séparer l'image labélisée en niveaux de gris en images classes en couleur:

Dans cette étape à chaque classe est affectée une couleur et chaque classe est affectée séparément à une image indépendante suivant ces instructions:

```
segmented_images = cell(1,3);
rgb_label = repmat(pixel_labels,[1 1 3]);

for k = 1:nColors
color = PV;
color(rgb_label ~= k) = 0;
segmented_images{k} = color;
end

imshow(segmented_images{1}), title('le segment 1');
```

Les résultats sont illustrés sur les figures (Figure III.12,...,15)

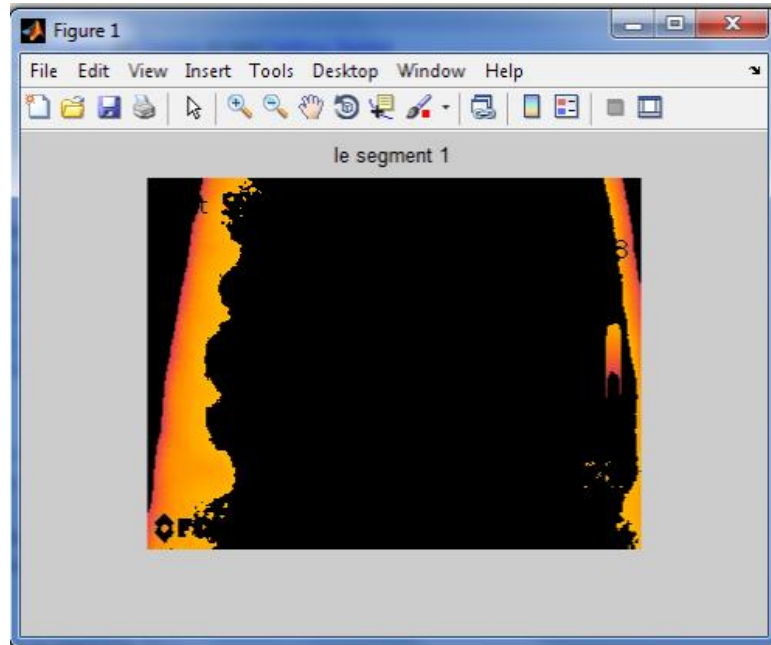


Figure III.12. Le segment 1.

```
imshow(segmented_images{2}), title('le segment 2');
```

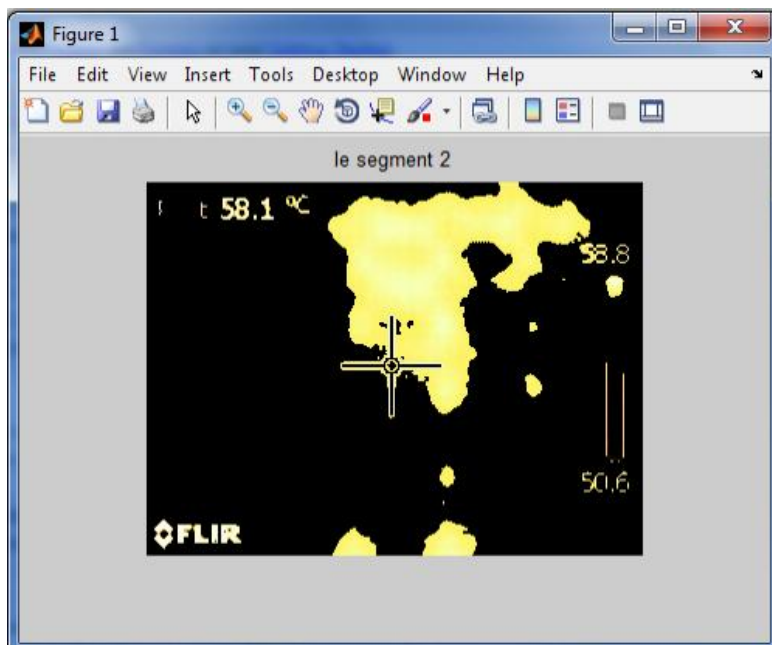


Figure III.13. Le segment 2.

```
imshow(segmented_images{3}), title('le segment 3');
```

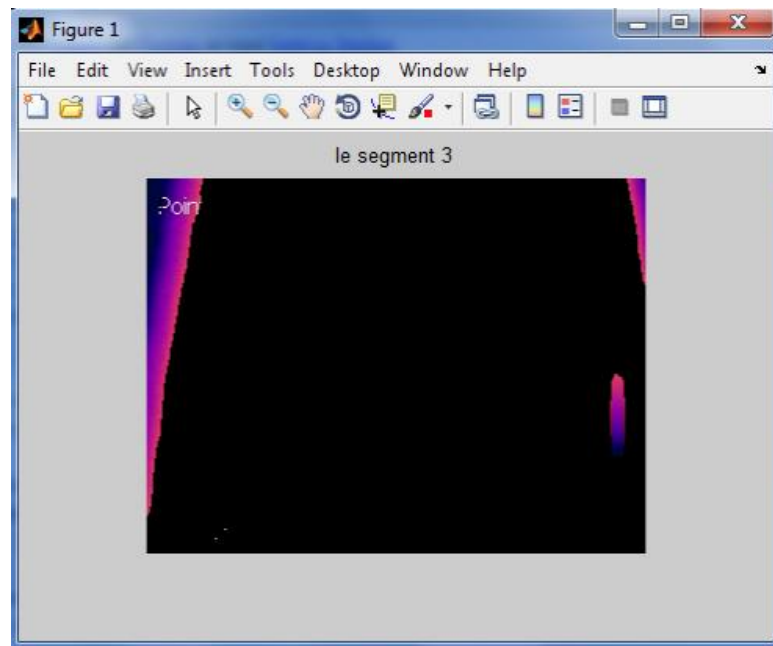


Figure III.14. *Le segment 3.*

```
imshow(segmented_images{4}), title('le segment 4');
```

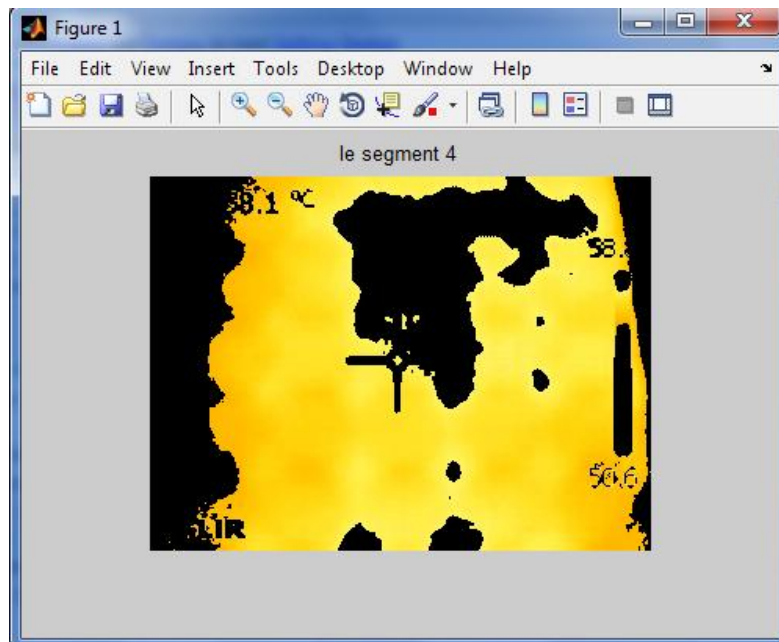


Figure III.15. *Le segment 4.*

On remarque que chaque segment est représenté dans une image, puisqu'on a 4 segments on a 4 images selon la valeur de K.

Le segment désiré est représenté dans la figure III.13 qui est la zone chaude dans l'image thermique.

#### **III.4. La conclusion:**

On conclut qu'il y a des techniques spécifiques pour analyser les images thermiques. Le but de ces techniques est de détecter facilement les zones de défauts à travers des logiciels aptes d'analyser et modifier et sauvegarder les images.

Nous avons implémenté une de ces méthodes qui a pour base la segmentation et la classification d'images couleurs.

Nous avons choisi comme méthode le K-means. Les résultats étaient encourageants par rapport au logiciel commercial FLIR. Les zones de danger ont pu être détectées sur l'image de panneau PV . Le seul problème à définir est le choix du paramètre K.

### **Conclusion générale:**

Nous avons présenté dans ce mémoire l'essentiel de notre travail sur la détection des zones de défauts dans les panneaux photovoltaïques. Nous nous sommes basés sur l'algorithme des K-moyennes pour la segmentation et la classification ainsi que sur les outils de traitement d'images du Matlab.

Pour comparer nos résultats à une référence commerciale en thermographie nous avons utilisé aussi FLIR Quick Report qui est le logiciel de la caméra thermique FLIR T400 manipulée pendant notre recherche à URERMS à Adrar.

Les résultats obtenus par le logiciel FLIR Quick Report (Cadrage thermique, isotherme et palettes) et la segmentation par l'algorithme des K-moyennes sont des résultats plus ou moins semblables puisque dans les deux on arrive à notre fin qui est la détection des zones de défauts.

Ce travail a été effectué après une synthèse résumée dans les deux premiers chapitres. L'application a été faite sur des images réelles de panneaux photovoltaïques de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar.

Loin d'être parfaits, nous jugeons que nos résultats sont très satisfaisants et encourageants. Ils démontrent l'intérêt des approches de segmentation et de classification dans l'automatisation de la tâche de détection des zones de défauts. Cependant l'approche que nous avons utilisée présente un inconvénient important qui est le choix du K. Nous proposons d'autres de combler cette lacune en essayant d'autres approches intelligentes tels que les réseaux neuronaux.

Rappelons que la thermographie infrarouge est considérée comme un outil très efficace pour les applications de la maintenance préventive grâce à ses avantages comme la réduction des frais de maintenance et les dégradations des équipements et les arrêts de production. Nous avons déjà pu constater son importance sur le terrain lors de notre recherche au sein de URERMS.



**Bibliographie:**

- [ALA10] Alain Boucher, "Traitement d'image: Segmentation", 2010.
- [ANI10] Anil ZChitae, Dr. S. K. Katiyar, "Colour based image segmentation using k-means clustering", international journal of engineering science and technology, 2010.
- [BAI03] JC. Baillien, "Segmentation: Traitement d'image et vision industrielle" France, 2003.
- [BEL09] H. BELGHITRI; H. "Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque", mémoire de magister, 2009.
- [BER04] J. Bernard, "Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing, 2004.
- [BER79] R. Bernard; G. menguy; M. Schwartz, "Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications", Technique et Documentation, 1979.
- [BIL06] A. Bilbao "Réalisation d'un commande mppt numérique", université de Rovirai virgili, 2006.
- [CRIM99] Centre de recherche informatique de Montréal, "Vision artificielle et traitement d'image", Novembre 1999.
- [DAN05] DanieleDucrot, "Méthode d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources: Extraction de caractéristiques du paysage", Mémoire de recherche à CESBIO, Décembre 2005.
- [DEL07] D. Delagnes; B. Flèche, "Energie solaire photovoltaïque.doc", juin 2007.
- [DUF80] J. A. Duffie; W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes", John Wiley and Sons, 1980.
- [EDM09] Edmond Boyer, "Analyse d'images: Pré-traitement", 2009.
- [GON08] C. Gonzalez Rafael, Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Pearson Prentice Hall, 2008.
- [ITC04] Infrared training center, Manuel de cours niveau I, Chapitre 9, 2004.

- [KHE03] A. H. Khedim, "Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque", Centre de Publication Universitaire, 2003.
- [MUF08] Manuel de l'utilisateur du programme "FLIR Quick Report", Ed. FLIR, Septembre 2008.
- [NIC10] Nicolas Vandebroucke, "Vision industrielle", 2010.
- [PER82] Ch. Perrin de Brichambaut; C. Vauge, "Le gisement solaire, Technique et Documentation", Paris, 1982.
- [POU03] P. Pouliquen, R.E. Cummings, M. Anthony Lewis, "A vision chip for color segmentation and pattern matching", Eurasip Journal on applied signal processing, 2003.
- [RIC94] Richard Dapoigny, "Traitement d'images et architectures parallèles", Ed. Addison, Wesley France, December 1994.
- [SAA10] Saadi Souad, "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan", Mémoire de magister d'université de Constantine, 2010.
- [SEN08] Z. Sen, "Solar energy fundamentals and modeling techniques", Springer, 2008.
- [SFE81] A. Sfeir; G. Guarracino, "Ingénierie des systèmes solaires", Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [SIN10] A. T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [VIL09] M. G. Villalva and J. R. Gazoli; E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays", Journal of power electronics, Mai 2009.
- [ZEG09] Zeghlache Samir, "Asservissement visuel d'un robot mobile sur une cible en mouvement", Mémoire de magister d'université de M'sila, Janvier 2009.

**Site internet:**

- [TPE14] <http://global-educationafrica.org/Files/Other/TPE%20Energie%20solaire%20photovoltaique.docx>, 22 Mai 2014, 08:30.