

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE POLYTECHNIQUE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME**

**LABORATOIRE : ARCHITECTURE ET ENVIRONNEMENT**



Mémoire  
Pour l'obtention du diplôme de  
MASTER EN ARCHITECTURE  
Option : Architecture et Environnement

Thème

**Essai de diagnostic thermographique de l'efficacité énergétique : Cas  
d'étude la maison prototype du CNERIB/CDER**

**Présenté et soutenu par  
REBZANI Esma**

**Mémoire dirigé par : Dr K. DAKHIA**

**Jury :**

Président de jury : Dr A. BOUSSOUALIM

Examineur : Dr S. KACHER (LVAP)

Examineur : M. M.SOUICI (CNERIB)

### **Résumé**

Cette recherche a pour cœur la performance énergétique des bâtiments et leur efficacité. Pour appréhender cette notion nous avons étudié ses différentes facettes les moyens de l'atteindre. Des outils sont désormais en place pour règlementer la performance énergétique du bâtiment et réduire leurs impacts sur l'environnement. Et c'est là que notre problématique de recherche vient questionner l'incidence de l'actuel règlement thermique algérien sur les bâtiments qui le respecte. C'est cette réflexion qui nous a menés vers les moyens d'audit énergétique en général et la thermographie en particulier.

Véritable discipline à part entière, elle permet diagnostiquer les erreurs de conception et de réalisation et de déterminer les stratégies nécessaires pour améliorer la performance énergétique.

Son application sur le projet pilote réalisé par le consortium CNERIB/CDER a permis de démontrer que le respect de la réglementation thermique combiné avec une conception bioclimatique et une bonne mise en œuvre permet de réaliser une enveloppe performante énergétiquement.

**Mots clés :** Efficacité énergétique, thermographie du bâtiment, caméra thermique, audit énergétique, projet pilote MED ENEC.

**Abstract**

This research has for main purpose the energy consumption of buildings and their efficiency. In order to apprehend this notion we have studied its different sides and the many ways to achieve it.

There are, nowadays, several laws surrounding the notion of energy efficiency in the building sector to lessen their impact on the environment. It's there that our problem took roots questioning the influence of the actual Algerian thermal legislation in the building that truly respect it. This line of thoughts led us to the tools of energy auditing in general and infrared thermal imaging (also known as thermography) in particular.

A real science in itself, the infrared thermal imaging can detect envelopes inconsistencies (either caused by a bad design or building defect) and define useful strategies to lower the energy consumption (and thus improve the energy efficiency).

Its application on the pilot project of the consortium CNERIB/CDER has allowed us to prove that the respect of the thermal legislation added to a bioclimatic design and constructing of quality permit the erecting of an energy efficient building.

**Keywords:** Energy efficiency, Infrared thermal imaging of building, energy audit, Pilot project MED ENEC.

المخلص:

هذا البحث له كهدف أساسي الفعالية الطاقية للمباني وكفاءتهم. لفهم هذا المبدأ قمنا بدراسة مختلف أبعاده كذا الطرق اللازمة لتحقيقه.

في يومنا هذا، هناك الكثير من الانظمة والقوانين التي تسير الاستهلاك الطاقوي للمباني، والهدف من ذلك التخفيض من اثارهم على البيئة. انطلاقا من هذه الملاحظة تجسدت لنا إشكاليتنا لتتساءل على مدى تأثير وفعالية القانون الحراري الحالي الخاص بالجزائر، على المباني المحترمين له في تصميمهم.

هذا التساؤل أدى بنا إلى الاهتمام بالتدقيق الطاقوي عامة والتصوير الحراري بصفة خاصة. كونه علم بحد ذاته، التصوير الحراري يمكننا من الكشف عن شوائب غلاف المباني (سواء كانت بسبب التصميم أو البناء) وتحديد الكيفيات والخطط المستحقة للتقليل من استهلاكهم للطاقة.

إن تطبيقه على المنزل النموذجي المبني من طرف الفريق BIRENC و REDC قد سمح لنا بإثبات أن احترام القانون الحراري بازدواج مع التصميم البيئوي وحسن البناء، يؤدي الى الحصول على مبنى متكافئ طاقيًا.

الكلمات الرئيسية: الكفاءة الطاقوية، التصوير الحراري للمباني التدقيق الطاقوي، المنزل النموذجي MED ENEC.

## **Remerciements**

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je souhaite remercier mon encadreur, Mme K. DAKHIA qui m'a suivi tout le long de l'élaboration de cette recherche, en m'aidant à repousser les limites de la réflexion, M. CHENAK qui sans le savoir a été d'un très grand secours dans la compréhension des principes de base qui sont au cœur de cette recherche, M. SOUICI et tous les membres du CNERIB qui m'ont permis l'accès au projet pilote et qui m'ont facilité l'intervention sur le terrain.

Je tiens aussi à remercier mes amis qui m'ont soutenue et encouragée lors de cette période de travail acharné.

Enfin un grand merci à ma famille qui a toujours été là pour moi et m'a supportée dans les moments les plus durs : mon père, mon grand frère et surtout ma mère sans laquelle je ne serais jamais arrivée là où je suis.

A tous et à toutes, merci.

**Table des matières**

|   |    |
|---|----|
| Résumé .....  | 2  |
| Abstract .....  | 3  |
| Remerciements .....   | 5  |
| Introduction : .....  | 14 |
| I. La problématique : .....   | 16 |
| II. Les hypothèses : .....  | 17 |
| III. Les objectifs : .....  | 17 |
| IV. Méthodologie de travail .....   | 18 |
| V. Structure du mémoire : .....   | 20 |
| <br>  |    |
| Chapitre I: L'efficacité énergétique.....                                       | 21 |
| I.1 Introduction : .....  | 21 |
| I.2 Définition de l'efficacité et la sobriété énergétique .....                 | 21 |
| I.3 Les moyens pour atteindre l'efficacité énergétique dans le bâtiment : ..... | 22 |
| I.3.1 L'efficacité énergétique passive ou la conception bioclimatique .....     | 23 |
| I.3.1.1 Les conditions climatiques .....  | 23 |
| I.3.1.2 Géométrie de l'enveloppe .....  | 25 |
| I.3.1.3 Matériaux de l'enveloppe .....  | 26 |
| I.3.1.4 Les protections solaires : .....  | 29 |
| I.3.2 L'efficacité énergétique active.....                                      | 30 |
| I.3.3 L'efficacité énergétique interactive .....                                | 31 |
| I.4 Le contexte réglementaire : .....   | 31 |
| I.4.1 Règlementation en vigueur DTR C3-2 : .....                                | 32 |
| I.4.2 Règlementation française : RT 2012.....                                   | 33 |
| I.4.3 Synthèses sur les réglementations : .....                                 | 33 |
| I.5 L'audit énergétique : .....   | 34 |
| I.6 Outils d'audit énergétique : .....  | 34 |
| I.6.1 Mesure de la consommation énergétique.....                                | 34 |
| I.6.2 Mesure in situ de coefficients K de la paroi.....                         | 35 |
| I.6.3 Mesure en laboratoire.....  | 35 |
| I.6.4 Simulation logicielle .....   | 35 |
| I.6.5 Le test d'étanchéité à l'air .....  | 36 |
| I.6.6 Thermographie : .....   | 36 |

|  |   |    |    |
|--|---|----|----|
| I.7  | Conclusion :.....   | 36 |    |
| Chapitre II: La thermographie du bâtiment..... 37  |   |    |    |
| II.1   | Introduction :.....   | 37 |    |
| II.2   | Définition .....  | 37 |    |
| II.3   | Principes de la thermographie :.....                                | 38 |    |
| II.3.1   | Le transfert de chaleur : .....                                     | 38 |    |
| II.3.2   | Spectre des rayonnements :.....                                     | 38 |    |
| II.3.3   | La loi de Planck : .....  | 40 |    |
| II.3.4   | La loi de Kirchhoff – émissivité : .....                            | 40 |    |
| II.3.5   | La Loi de Stefan-Boltzmann .....                                    | 41 |    |
| II.4   | Historique .....  | 41 |    |
| II.5   | Application de la thermographie dans différents domaines .....      | 42 |    |
| II.6   | Définition de la thermographie du bâtiment : .....                  | 44 |    |
| II.7   | Les usages de la thermographie : .....                              | 44 |    |
| II.8   | Avantages de la thermographie : .....                               | 45 |    |
| II.9   | Les limites de la technique .....                                   | 45 |    |
| II.10  | Les types d’approches thermographiques : .....                      | 45 |    |
| II.11  | Protocol thermographique : le contexte normatif international ..... | 46 |    |
| II.11.1  | ASTM C 1060-90(Usa) .....   | 46 |    |
| II.11.2  | NF EN 13187 (Europe) :.....   | 47 |    |
| II.11.3  | Synthèse des normes :.....  | 47 |    |
| II.12  | Les outils de la thermographie.....                                 | 48 |    |
| II.12.1  | La caméra thermique :.....  | 48 |    |
| II.12.1.1  | La bande spectrale :.....   | 48 |    |
| II.12.1.2  | Résolution spatiale .....   | 48 |    |
| II.12.1.3  | Fréquence d’image .....   | 48 |    |
| II.12.1.4  | La résolution thermique ou sensibilité thermique .....              | 49 |    |
| II.12.1.5  | Ce que détecte la caméra thermique :.....                           | 49 |    |
| II.12.2  | Logiciel de traitement thermographique .....                        | 50 |    |
| II.13  | Exemples d’application .....  | 51 |    |
| II.14  | Conclusion :.....   | 54 |    |
| Chapitre III: Application sur le cas d’étude ..... |   |    | 55 |
| III.1  | Introduction :.....   | 55 |    |

|   |  |    |
|---|--|----|
| III.2                                   | Présentation du cas d'étude et du contexte de sa réalisation : | 55 |
| III.3                                   | Description technique de la maison                             | 56 |
| III.4                                   | Méthodologie expérimentale :                                   | 59 |
| III.4.1                                 | Paramètres intérieurs :  | 59 |
| III.4.2                                 | Paramètres extérieurs  | 59 |
| III.5                                   | Les outils de l'intervention :                                 | 60 |
| III.5.1                                 | Caméra thermique :   | 60 |
| III.5.2                                 | Appareil photo   | 60 |
| III.6                                   | Le déroulement de l'inspection                                 | 61 |
| III.6.1                                 | Conditions climatiques et intérieures                          | 61 |
| III.6.2                                 | Les moyens utilisés  | 62 |
| III.6.3                                 | Inspection extérieure :  | 66 |
| III.6.4                                 | Inspection intérieure  | 66 |
| III.6.5                                 | Traitement des images :  | 68 |
| III.7                                   | Conclusion :   | 68 |
| Chapitre IV: Discussion des résultats : |  | 69 |
| IV.1                                    | Introduction :   | 69 |
| IV.2                                    | Les résultats extérieurs :                                     | 69 |
| IV.2.1                                  | Façade Est :   | 69 |
| IV.2.2                                  | Façade sud :   | 70 |
| IV.3                                    | Les résultats intérieurs :                                     | 70 |
| IV.3.1                                  | Le séjour  | 70 |
| IV.3.2                                  | La chambre 1   | 72 |
| IV.3.3                                  | La chambre 2   | 73 |
| IV.3.4                                  | La salle d'eau   | 74 |
| IV.3.5                                  | Cuisine  | 75 |
| IV.4                                    | Conclusion :   | 76 |
| Conclusion générale et perspectives :   |  | 78 |
| Bibliographie                           |  | 80 |
| Les Annexes                             |  | 85 |

**Liste des figures :**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Le développement durable à l'intersection des trois dimensions sociale, économique et environnementale. (Gendron 2004) p22 .....  | 15 |
| Figure 2 : Méthodologie de travail. Source : Auteur.....   | 19 |
| Figure 3 : Structure du chapitre 1. Source : Auteur. ....  | 21 |
| Figure 4 : L'habitat compacte et groupé est plus économe en énergie (Source : Info Energie en Bourgogne. Bâtiment économe en énergie : Les clés pour réussir son projet de construction ou de rénovation. Bourgogne, Janvier 2014. p05.....  | 25 |
| Figure 5: Spectre électromagnétique (Ibarra-Castanedo C. 2013).....  | 39 |
| Figure 6 : Longueur d'onde des rayonnements émis par un corps noir en fonction de sa température, selon la loi de Plank (Source : (Ibarra-Castanedo C. 2013)).....   | 40 |
| Figure 7 : Image thermique 'un flux de CO <sub>2</sub> , observé grâce à une caméra thermique à bande étroite (SC6000 avec filtre) (Source : (Vollmer et Möllmann 2011)).....  | 42 |
| Figure 8 : Image thermique d'un flux de méthane pur observé grâce à une caméra thermique FLIR GasFind (Source : (Vollmer et Möllmann 2011)). ....  | 42 |
| Figure 9 : Détection du matériau de construction de la partie saillante du bâtiment, (les parties en retrait sont trop éloignées ou la couche de plâtre est trop épaisse pour déceler son matériau) grâce à l'imagerie thermique. (Source : (Pleșu, Teodoriu et Țaranu 2012) ..... | 43 |
| Figure 10 : Analyse thermographique pour détecter les failles et les anomalies technique avant la restauration de l'église de Sant Eusanio Forconese suite aux dégâts causés par le séisme de 2009 (source : (Bianco et Ceradini 2010)) .....                                      | 44 |
| Figure 11 : Les approches de la thermographie (Source : (Kylili, et al. 2014)).....  | 46 |
| Figure 12 Caméra thermique (Source : testo.fr).....  | 48 |
| Figure 13 Thermogramme d'un bâtiment en béton armé où on voit clairement l'absence d'une portion d'isolation (Source : Flir.com).....  | 49 |
| Figure 14 : Image thermique qui représente une infiltration de l'air à travers une fenêtre (Source : Flir.com) .....   | 49 |
| Figure 15: Thermogramme décelant un problème d'humidité (Source : Flir.com) .....  | 49 |
| Figure 17 : Image thermique de ponts thermiques entre les poutres et le mur extérieur (Source : Flir.com) .....  | 50 |
| Figure 17 : Thermogramme de ponts thermiques à travers le plancher (Source : Flir.com) ...   | 50 |
| Figure 18 : Plan de situation de l'opération d'investigation (Source : (Woerner 2006)).....  | 51 |
| Figure 19 : plan d'intervention thermographique sur le tribunal fédéral Byron White et ordre d'exécution (Source : (Woerner 2006)) .....   | 52 |
| Figure 20 : Tribunal fédéral Byron White vu du point 1 (Source : (Woerner 2006)).....  | 52 |
| Figure 21 Thermogramme du tribunal fédéral Byron White position 08 (Source : (Woerner 2006)) .....   | 53 |
| Figure 22 Thermogramme du tribunal fédéral Byron White position 08 (Source : (Woerner 2006)) .....   | 53 |
| Figure 23 : Situation du projet pilote dans l'enceinte du CNERIB (Source : Google map) ....  | 57 |
| Figure 24 : Comparaison entre la consommation énergétique d'une maison conventionnelle et le projet pilote. Source : (MED ENEC s.d.).....  | 58 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 25 : Comparaison entre le cout d'une maison conventionnelle et le projet pilote. Source : (MED ENEC s.d.).  | 58 |
| Figure 26 : Le projet pilote du consortium CDER/CNERIB : photo à gauche et plan à droite. Source : (Imessad, et al. 2014)  | 58 |
| Figure 27 : Météo du jour d'examen thermographique Source : google météo   | 61 |
| Figure 28 : Flir i7 Source : Flir.fr   | 62 |
| Figure 29 : Interface de FLIR Tools, onglet Bibliothèque. Source : Auteur  | 63 |
| Figure 30 : les modifications possibles sur le niveau de couleurs, les palettes et les paramètres de prise de vue. Source : Auteur   | 65 |
| Figure 31 : Ajouts d'outils de mesure que le classique point de mire. Source : Auteur  | 65 |
| Figure 32 : Ordre des prises de thermogrammes extérieurs. Source : Auteur  | 66 |
| Figure 33 : Ordre de prise de thermogrammes intérieurs. Source : Auteur  | 66 |
| Figure 34 : Suite de prise des images thermiques de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur  | 67 |
| Figure 35 : Photo de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur   | 67 |
| Figure 36 : Montage photo a titre explicatif des différents thermogramme de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur  | 67 |
| Figure 37 : Thermogramme d'une partie de la façade est du séjour avant traitement avec FLIR Tools. Source : Auteur   | 68 |
| Figure 38 Thermogramme d'une partie de la façade est du séjour après traitement avec FLIR Tools. Source : Auteur   | 68 |
| Figure 39 : Thermogramme traité e de la façade est de la maison prototype  | 69 |
| Figure 40 Thermogramme traité de la façade sud du de la chambre 1. Source : Auteur   | 70 |
| Figure 41 : Thermogramme traité de la façade sud du côté du séjour. Source : Auteur  | 70 |
| Figure 42 : Thermogramme séjour, paroi orientée est, au niveau de la porte fenêtre. Source : Auteur  | 70 |
| Figure 43 Thermogramme traité de la paroi contenant la porte fenêtre. Emissivité= 0.86 et distance=3m. Source : Auteur   | 70 |
| Figure 44 : Thermogramme de la paroi sud du séjour au niveau de la fenêtre. Source : Auteur  | 71 |
| Figure 45 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre du séjour. Emissivité : 0.86 et distance : 3m. Source : Auteur   | 71 |
| Figure 46 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre. Emissivité =0.86 et distance=3m. Source : Auteur  | 72 |
| Figure 47 : Thermogramme de la paroi orientée sud de la chambre1 au niveau de la fenêtre. Source : Auteur  | 72 |
| Figure 49 : : Thermogramme de la façade ouest aveugle de la ch1 au niveau de la jonction mur est mur ouest et plancher haut. Source : Auteur                                   | 72 |
| Figure 49 : Thermogramme traité de la façade aveugle de la chambre1 au niveau de la liaison mur est mur ouest et plancher haut. Emissivité= 0.9 et distance=3m Source : Auteur | 72 |
| Figure 50: Thermogramme de la paroi aveugle orientée ouest de la chambre 2 au niveau de la jonction mur, plancher haut. Source : Auteur  | 73 |
| Figure 51 : Thermogramme traité du mur aveugle de la chambre 2 au niveau de la liaison mur, plancher haut. Emissivité= 0.9 et distance=3m. Source : Auteur                     | 73 |

Figure 52 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre de la chambre2.  
Emissivité=0.86 et distance=3m. Source : Auteur. .... 74

Figure 53 : Thermogramme de la paroi orientée nord de la chambre 2 au niveau de la fenêtre.  
Source : Auteur..... 74

Figure 54 : Thermogramme traité de la paroi de la salle d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la chambre2 et le plancher haut. Emissivité=0.9 et Distance=3m. Source : Auteur... 74

Figure 55 : Thermogramme de la paroi de la d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la chambre2 et le plancher haut. Source : Auteur. .... 74

Figure 56 : Thermogramme de la paroi orientée nord de la cuisine, au niveau de la chaudière murale. Source : Auteur. .... 75

Figure 57 : Thermogramme traité de la paroi aveugle de la cuisine, au niveau de la chaudière murale. Emissivité=0.9 et distance=3m. Source : Auteur..... 75

Figure 58 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre au niveau de la cuisine.  
Emissivité=0.86 et distance=3m. Source : Auteur ..... 76

Figure 59 : Thermogramme de la paroi orientée est de la cuisine au niveau de la fenêtre.  
Source : Auteur..... 76

**Liste des tableaux :**

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des différentes parois du projet. Source : (CHENAK, et al. 2008)..... | 57 |
| Tableau 2 : Caractéristiques de la FLIR i7 Source : FLIR.fr .....   | 62 |
| Tableau 3 : Caractéristiques du Sony DSC-W730. Source : Sony.fr .....   | 63 |
| Tableau 4 : Récapitulatif des observations et résultats. Source : Auteur .....                                | 77 |

**Liste des photographies :**

|   |    |
|---|----|
| Photographie 1 : Façade est de la maison prototype. Source : Auteur.....  | 69 |
| Photographie 2 : Façade sud du côté de la chambre1. Source : Auteur. ....   | 70 |
| Photographie 3 : Façade sud du côté du séjour. Source : Auteur.....   | 70 |
| Photographie 4 : photo de la porte fenêtre du séjour. Source : Auteur .....   | 70 |
| Photographie 5 : Photo de la paroi sud du séjour au niveau de la fenêtre. Source : Auteur. ...  | 71 |
| Photographie 6 : Photo de la paroi orientée sud de la chambre1 au niveau de la fenêtre.<br>Source : Auteur.....                                   | 72 |
| Photographie 7 : Photo de la façade ouest aveugle de la ch1 au niveau de la jonction mur est<br>mur ouest et plancher haut. Source : Auteur. .... | 72 |
| Photographie 8 : Photo de la paroi aveugle orientée ouest de la chambre 2 au niveau de la<br>jonction mur, plancher haut. Source : Auteur. ....   | 73 |
| Photographie 9 : photo de la paroi orientée nord de la chambre 2 au niveau de la fenêtre.<br>Source : Auteur.....                                 | 74 |
| Photographie 10 : photo de la paroi de la d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la<br>chambre2 et le plancher haut. Source : Auteur. .... | 74 |
| Photographie 11 : photo de la paroi orientée nord de la cuisine, au niveau de la chaudière<br>murale. Source : Auteur. ....                       | 75 |
| Photographie 12 : photo de la paroi orientée est de la cuisine au niveau de la fenêtre. Source :<br>Auteur.....                                   | 76 |

## Introduction :

L'économie d'énergie est un concept directement lié au mouvement du développement durable qui a envahi la planète à la fin du siècle dernier. En effet même si plusieurs actions visant à protéger l'environnement furent déployées vers la première partie du XXème siècle<sup>1</sup> (Un comité provisoire pour la protection universelle de la nature en 1910 à Bâle, une conférence à Berne en 1913, le premier « Congrès international pour la - protection de la nature, faune et flore, sites et monuments naturels » à Paris en 1923.)<sup>2</sup> Ce souci de l'environnement se concrétise plus vers la moitié et la fin du siècle dernier, par la création sous l'égide de l'UNESCO de l'Union Internationale pour la protection de la Nature (U.I.P.N.)<sup>3</sup>. Cette dernière publie en 1951 le premier rapport sur l'état de l'environnement et la nécessité de l'harmonisation entre économie et écologie : « *Il est vrai qu'après la Seconde Guerre mondiale, la croissance industrielle se fit au détriment du milieu ; cela fut d'ailleurs confirmé par Buffon dans son ouvrage intitulé « La gloire de consommer »* »<sup>4</sup>. C'est aussi dans cette période, précisément en 1963, que Rachel Carson publia son fameux livre « Le printemps silencieux » (qui parle de conservation de la nature, de protection de l'environnement et de sa durabilité), suivie en 1968 par la conférence de l'UNESCO sur l'utilisation rationnelle et la conservation de la biosphère, et du rapport de la rencontre de Founex de 1971 sur l'intégration des stratégies de développement et de protection de l'environnement. Les publications en faveur du développement durable ne se s'en arrêtaient pas là. Puisque en 1972 le livre-manifeste de la conférence de Stockholm, de Barbara Ward et René Dubos intitulé « Nous n'avons qu'une terre » fut publié suivi la même année du rapport du Club de Rome de Meadows intitulé « Halte à la croissance », qui insistait sur la nécessité de viser une croissance zéro sur le plan économique et sur le plan démographique, ont lancé un débat sur l'environnement et le développement économique qui se poursuit encore.

C'est comme cela qu'est né le concept d'écodéveloppement qui sera repris plusieurs fois durant la décennie qui suivit notamment par le français Ignacy Sachs<sup>5</sup> : « Qui y voit le moyen de réconcilier le développement humain et l'environnement, indissociables l'un de l'autre, en

<sup>1</sup> Berg, Linda, Peter Raven, et David Hassenzahl. *Environnement*. De Boeck Supérieur, 2009, p28

<sup>2</sup> Guay, Louis. *Les enjeux et les défis du développement durable: connaître, décider, agir*. Québec: Presses Université Laval, 2004, p40.

<sup>3</sup> Qui devint en 1957 l'union internationale pour la conservation de la nature U.I.C.N

<sup>4</sup> Saffache, Pascal, et Lise Moutamalle. *Le développement durable: entre espoirs et illusions.*, chap. 11 dans *Etudes Caribéennes, Volume 4*, de Michel Desse, Pascal Saffache, Olivier Dehoorne et Anaïs Favre, 88. Paris: Publibook, 2006, p81.

<sup>5</sup> Guay, Louis. *Les enjeux et les défis du développement durable: connaître, décider, agir*. Québec: Presses Université Laval, 2004, p39.

affirmant la nécessité de remettre en cause les modes de développement du Nord et du Sud, générateurs de pauvreté et de dégradations environnementales »<sup>6</sup>. Ces bases du développement durable furent consolidées par la publication du rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement (commission Brundtland, 1987) qui introduit un concept novateur, le « sustainable development » traduit d'abord en français par « développement soutenable », puis « développement durable » qui répond à la définition : « *développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ». (CMED, 1987, p. 51).

A partir de cette conférence le développement durable a commencé à véhiculer les principes tripolaires qu'on lui connaît aujourd'hui<sup>7</sup> : protection de l'environnement, équité sociale et efficacité économique.

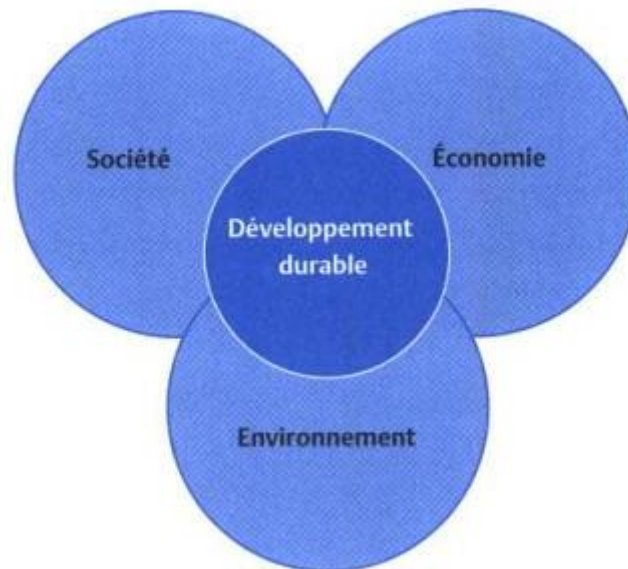


Figure 1 : Le développement durable à l'intersection des trois dimensions sociale, économique et environnementale. (Gendron 2004) p22

Depuis plusieurs sommets et conférences ont été tenus pour entériner l'existence de cette pensée environnementaliste (voir annexe n°1 : évènements environnementaux de 1970 à 2005). En 2002, lors du sommet mondial du développement durable en Afrique du sud, l'efficacité énergétique et l'économie d'énergie ont clairement été désigné comme principes

<sup>6</sup> Ministère français de l'environnement et développement durable, *Historique du développement durable*, 2002 accessible sur : [http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd\\_historique\\_dd.pdf](http://www.fnh.org/francais/fnh/uicn/pdf/smdd_historique_dd.pdf)

<sup>7</sup> Legardez, Alain, et Laurence Simonneaux. *Développement durable et autres questions d'actualité: questions socialement vives dans l'enseignement et la formation*. Dijon: Educagri Editions, 2011, p24.

du développement durable et son plan d'action insiste sur leur instauration<sup>8</sup>. Lors de cette recherche nous tenterons d'aborder cette notion d'efficacité énergétique à travers son évaluation via l'outil de de la thermographie.

## **I. La problématique :**

« L'homme et la société dégradent et détruisent les composantes de la planète »<sup>9</sup>, cette idée est au cœur de tous les discours précurseurs à la conception du développement durable, elle est encore plus d'actualité puisque d'après Global Footprint Network le monde a actuellement besoin d'une Terre et demie pour satisfaire la demande en ressources naturelles. L'empreinte carbone, diminutif de la quantité de cet élément engendrée par la combustion d'énergie fossile nécessaire aux activités humaines, représente plus de la moitié de l'empreinte écologique (53 % en 2010)<sup>10</sup>.

Avec des émissions de gaz à effet de serre (GES) représentant environ 20% des émissions dues à la consommation d'énergie mondiale finale (hors électricité), le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) contribue fortement au changement climatique. A lui seul il représente aujourd'hui un peu plus du tiers de la consommation mondiale en énergie. Dans l'ensemble des pays en développement, la part de sa consommation dépasse 40%<sup>11</sup>.

En Algérie, le domaine du bâtiment est le secteur le plus énergivore (41% de la consommation énergétique nationale devant le transport avec 33% et l'industrie et le BTP 19%)<sup>12</sup>, la répartition par usage démontre que 89% de la consommation est d'ordre thermique dont 8% est consacré au chauffage. Diminuer cette consommation revient à diminuer l'empreinte carbone du secteur. Pour atteindre cet objectif tout en garantissant un confort thermique un règlement thermique du bâtiment a été mis en place en 1997 par le Ministère de l'Habitat (DTR C3-2 chauffage : Règles

---

<sup>8</sup> *Plan of Implementation of the World Summit on Sustainable Development*, adopté le 04 septembre 2002, Johannesburg, Afrique du sud, p05.

<sup>9</sup> Veyret, Y., 2004. Education à l'environnement pour un développement durable. Rouen, s.n.

<sup>10</sup> WWF. 2014. Rapport Planète Vivante © 2014 : Des hommes, des espèces, des espaces, et des écosystèmes [McLellan, R., Iyengar, L., Jeffries, B. et N. Oerlemans (édit.)]. WWF International, Gland (Suisse).

<sup>11</sup> Agence Nationale de maîtrise de l'énergie (Tunisie), 2010. La mise en place de la réglementation thermique et énergétique en Tunisie: Efficacité énergétique dans le bâtiment. [En ligne]

Available at:

[http://www.ffem.fr/jahia/webdav/site/ffem/shared/ELEMENTS\\_COMMUNS/U\\_ADMINISTRATEUR/5-PUBLICATIONS/Changement\\_climatique/Plaquette\\_Tunisie\\_ReglThermique\\_fr.pdf](http://www.ffem.fr/jahia/webdav/site/ffem/shared/ELEMENTS_COMMUNS/U_ADMINISTRATEUR/5-PUBLICATIONS/Changement_climatique/Plaquette_Tunisie_ReglThermique_fr.pdf)

[Accès le 06 Février 2015].

<sup>12</sup> APRUE, 2007. Consommation Énergétique Finale de l'Algérie: Chiffres clés Année 2005. [En ligne]

Available at: <http://www.aprue.org.dz/documents/consommation-energetique.pdf>

[Accès le 3 Février 2015]

de calcul des déperditions calorifiques, DTR C3-4 climatisation : Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments.) avec pour objectif de diminuer de 40 % la consommation énergétique d'usage des bâtiments<sup>13</sup>. Pourtant les réalisations qu'on connaît aujourd'hui sont loin d'atteindre l'efficacité énergétique prônée<sup>14</sup>. Depuis 2005 en Algérie, l'audit énergétique est obligatoire pour les grandes entreprises. Parmi les outils permettant ce diagnostic, la thermographie est une nouvelle discipline très pertinente dans le domaine du bâtiment, mais pourtant très rarement utilisée en Algérie.

- **Qu'est-ce que l'efficacité énergétique dans le bâtiment? Le respect du règlement thermique en vigueur en Algérie est-il une garantie pour une efficacité énergétique du bâtiment ?**
- **Quel est l'apport du diagnostic thermique du bâtiment par l'analyse thermographique dans un objectif d'efficacité énergétique ?**

## **II. Les hypothèses :**

Afin de répondre à cette problématique, nous posons donc les hypothèses suivantes :

- L'efficacité énergétique est un processus itératif qui n'est pas traité dans une seule phase de la conception mais est présent tout le long de la vie d'un bâtiment.
- Le respect de la réglementation ne garantit pas l'efficacité énergétique des bâtiments.
- La mise en œuvre des constructions est le principal facteur de l'efficacité énergétique.
- Les outils de diagnostic thermique ne sont pas codifiés. Parmi ces outils, l'analyse thermographique est un moyen intrinsèque de l'efficacité énergétique, du fait de sa capacité à détecter sans destruction et détérioration du bâtiment, les défauts de l'enveloppe des bâtiments et d'isoler les déficiences thermiques.

## **III. Les objectifs :**

L'objectif à travers cette recherche est la fois théorique et pratique avant tout il s'agit de comprendre la notion d'efficacité énergétique, de comprendre ses modalités d'application (de prise en charge) dans le processus conceptuel.

---

<sup>13</sup> Kamel, D., 2006. Mise en Application de la Réglementation Thermique. Lettre de l'APRUE, Issue 10, p. 2.

<sup>14</sup> Kadri, N. & Mokhtari, A., 2011. Contribution à l'étude de réhabilitation thermique. Revue des Energies Renouvelables, 14(2), pp. 301-311.

Notre recherche se veut aussi être une initiation à la thermographie du bâtiment, afin de connaître ses principes pour pouvoir les mettre en pratique au service de l'efficacité énergétique.

#### **IV. Méthodologie de travail**

Pour notre recherche nous avons suivi une méthodologie qui se décline en trois phases :

En premier lieu : une approche théorique, qui par une recherche bibliographique vise à comprendre ce qu'est :

- l'efficacité énergétique, ses concepts de base, son contexte d'apparition, ses outils, ainsi que la réglementation thermique algérienne et sa position face aux exigences de l'efficacité énergétique ;
- l'analyse thermographique ; ses principes, ses outils ses standards ainsi que les différentes approches et usages qu'elle connaît dans le bâtiment ;
- le projet pilote du CNERIB et du CDER comme exemple de bâtiment respectant la réglementation thermique algérienne, qui est notre cas d'étude.

Cette recherche a abouti à la mise en place d'un protocole de diagnostic thermographique que nous avons appliqué dans la deuxième partie de notre recherche.

En second lieu, nous avons adopté une approche pratique sur terrain qui est le diagnostic thermographique de la maison rurale du CNERIB suivant le protocole que nous avons élaboré et à l'aide de la caméra FLIR.

Enfin, à l'aide du logiciel FLIR Tools, nous avons analysés et interprétés les résultats obtenus pour en tirer des observations.

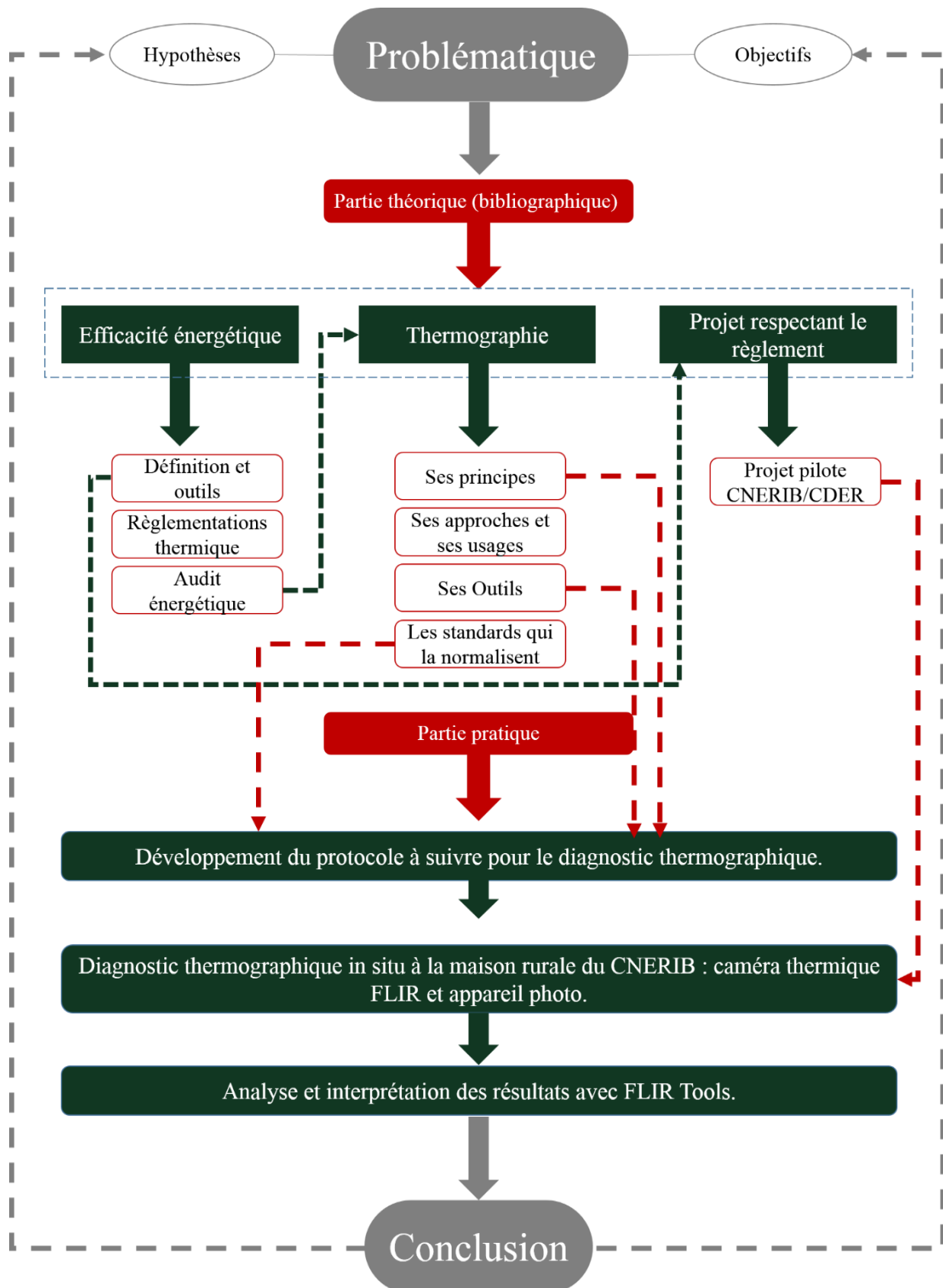


Figure 2 : Méthodologie de travail. Source : Auteur

## **V. Structure du mémoire :**

Notre mémoire est structuré en cinq parties comme suit :

- Un chapitre introductif qui présente la problématique de recherche, ses hypothèses ses objectifs et la méthodologie choisie pour mener à cette recherche.
- Un premier chapitre qui traite globalement de l'efficacité énergétique, l'introduit et fait l'inventaire des moyens conceptuels, techniques et humains pour l'atteindre ainsi que les instruments pour la contrôler : réglementation thermique et audit énergétique.
- Un deuxième chapitre qui introduit la thermographie en général ses principes et ses applications puis la thermographie du bâtiment en particulier, ses usages, ses approches et les modalités d'application sur le bâtiment.
- Un troisième chapitre présente et décrit le diagnostic thermographique in situ. Il présente, d'abord le cas d'étude : la maison rurale du CNERIB/CDER, ainsi que l'outil de diagnostic : la caméra FLIR. Puis, il décrit le protocole suivi lors du diagnostic thermographique ainsi que les moyens utilisés et la préparation des données récoltées pour le traitement.
- Le quatrième et dernier chapitre présente une interprétation des résultats obtenus lors de diagnostic et tire des observations liées aux thermogrammes traités.

## Chapitre I: L'efficacité énergétique

### I.1 Introduction :

Nous traiterons tout le long de ce chapitre de la notion d'efficacité énergétique et les moyens pour l'atteindre ainsi que les instruments mis en œuvre pour la règlementer. De ce fait nous procéderons d'abord par définir ce concept ainsi que ses dérivés, puis les moyens qu'on doit utiliser pour atteindre cette performance. Cette performance a besoin d'un objectif, un seuil réglementaire fixé en amont représenté par le règlement thermique, donc on traitera du règlement thermique en vigueur en Algérie puis pour un but de comparaison nous traiterons d'une autre réglementation étrangère. En fin l'efficacité énergétique d'un bâtiment doit être évaluée pour être avérée de ce fait nous aborderons aussi les outils d'audit énergétique.

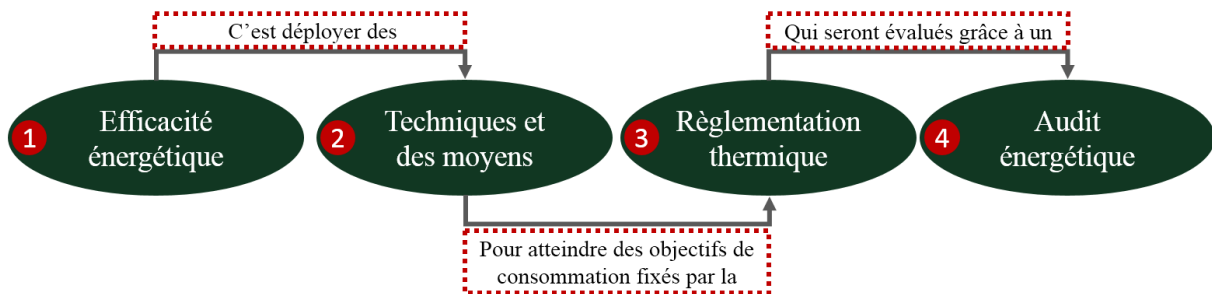


Figure 3 : Structure du chapitre 1. Source : Auteur.

### I.2 Définition de l'efficacité et la sobriété énergétique

En général, l'efficacité énergétique signifie la diminution de la consommation énergétique d'un système pour un même service rendu, cette définition très globale se rapproche de celle adoptée par le parlement européen en 2006 qui l'explique comme suit : « *le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet* »<sup>15</sup>. Au sens plus large elle devrait inclure l'écoconception et l'économie des matériaux utilisés (recyclage réutilisation). Donc pour n'importe quel domaine l'efficacité énergétique est la diminution du rapport consommation sur production, avec un facteur constant de qualité de service <sup>16</sup>(du confort pour le bâtiment) et est évaluée par rapport aux objectifs fixés en amont<sup>17</sup>. L'efficacité énergétique est souvent confondue avec l'économie d'énergie (ou la

<sup>15</sup> Le parlement européen et le conseil de l'union. «Directive 2006/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques.» s.d. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0032&from=FR>, p04.

<sup>16</sup> Béthencourt, Anne de, et Jacky Chorin. *Efficacité énergétique : un gisement d'économies ; un objectif prioritaire*. JOURNAL OFFICIEL, Paris: JOURNAUX OFFICIELS, 2013.

<sup>17</sup> Fabbri, Julie. *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle :le pari de l'innovation #2 L'efficacité énergétique*. Paris: Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, 2014.

sobriété économique). L'efficacité énergétique s'accompagne de l'adoption des technologies pour produire de l'énergie et réduire la consommation globale sans changement du comportement de l'utilisateur, alors que l'économie d'énergie appelle à la transformation de cette conduite<sup>18</sup>. Ainsi la différence entre efficacité et sobriété réside dans la passivité ou l'activité du consommateur. Et Si l'on considère les moyens mis en œuvre selon les critères de coût et de comportement on parlerait plus d'efficacité énergétique<sup>19</sup>.

### **I.3 Les moyens pour atteindre l'efficacité énergétique dans le bâtiment :**

L'efficacité énergétique d'un bâtiment comme vu auparavant est sa capacité à gérer l'énergie consommée, l'optimiser et la renouveler, il vise un équilibre entre consommation et production d'énergie. Cette optimisation ne doit pas être au dépend du confort des usagers ni des capacités techniques propres au fonctionnement du bâtiment<sup>20</sup>. Au vu de cet objectif colossal plusieurs volets sont à traiter pour atteindre le but global. On peut distinguer trois (03) volets<sup>21</sup>:

- L'efficacité énergétique passive : qui est en relation avec l'enveloppe du bâtiment et ainsi se subdivise en deux parties :
  - La conception architecturale grâce à laquelle on peut diminuer considérablement la consommation énergétique en tirant partie de l'environnement immédiat de l'édifice, en d'autres termes la conception bioclimatique est une des clés de réussite de l'efficacité énergétique passive.
  - L'amélioration de l'enveloppe par son isolation qui permettra d'éviter les déperditions et ainsi que tous les dispositifs qui accentuent ses performances thermiques.
- L'efficacité énergétique active : qui a pour objectif de réaliser des économies d'énergie grâce à des équipements intelligents (chauffage, climatisation et éclairage) ainsi que l'amélioration des systèmes de production et de stockage d'énergie.

---

<sup>18</sup> Oikonomou, V., F. Becchis, L. Steg, et D. Russolillo. «Energy saving and energy efficiency concepts for policy making.» *Energy Policy*, 05 Juillet 2009: p4788.

<sup>19</sup> Op Cit : (Fabbri 2014).

<sup>20</sup> Schneider Electric. *Le livre blanc de l'Efficacité énergétique*. Grenoble: Schneiders Electric, 2011.

<sup>21</sup> Junginger, Martin, Wilfried van Sark, et Andr Faaij. *Technological Learning in the Energy Sector*. Massachusetts: Edward Elgar Publishing, 2010. P221.

- L'efficacité énergétique interactive : qui fait appel à l'être humain et va de la mise en œuvre à l'utilisation du bien.

### **I.3.1 L'efficacité énergétique passive ou la conception bioclimatique**

Avant même l'avènement du développement durable, l'habitat traditionnel usé de moyens et techniques de bon sens pour tirer profit de sa situation géographique. Ce savoir de faire de nos ancêtres a su atteindre un certain confort avec un habitat à basse énergie<sup>22</sup> (voire nulle).

Ces techniques dont les résultats sont scientifiquement prouvés sont regroupées dans la conception bioclimatique (appelée aussi parfois architecture solaire<sup>23</sup>). Elle est définie comme l'architecture qui rapproche au maximum les usagers aux conditions de confort en adoptant diverses stratégies pour s'intégrer aux éléments du climat à différentes saisons<sup>24</sup> : «Parler d'architecture bioclimatique, au-delà des questions d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, c'est avant tout se référer à l'homme-habitant et à son bien-être.» (Liébard et Herde 2005)

Nous allons aborder cette architecture à travers ses éléments :

#### **I.3.1.1 Les conditions climatiques**

Le climat est un facteur spatiotemporel dont les conditions varient selon et aussi bien au cours d'une journée qu'au long de l'année, est constitué de plusieurs phénomènes qui agissent directement sur la construction et déterminent son usage. Les facteurs dont l'architecte doit prendre en compte sont ceux qui servent principalement à modeler ses conceptions à savoir le rayonnement solaire, les vents et la température.

##### **I.3.1.1.a Le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire peut être aussi bien une bénédiction qu'une malédiction pour un habitant, la bonne orientation est le facteur qui détermine cela. Selon le climat et une période donnée, il peut faire chaud ou froid, et on aura besoin de se protéger du soleil ou s'y exposer.

---

<sup>22</sup> Gonzalo, Roberto, et Karl J. Habermann. *Architecture et efficacité énergétique: Principes de conception et de construction*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008. p08.

<sup>23</sup> Adolphe, Luc. *Ambiances architecturales et urbaines*. Marseille: Parenthèses, 1998. p120.

<sup>24</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. p119.

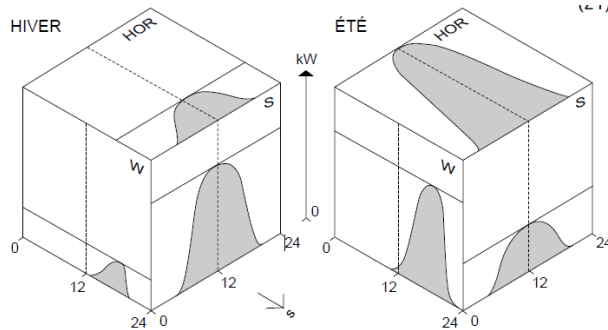


Figure 4 : Puissances de rayonnement solaire reçues sur des plans d'orientations différentes selon l'hiver et l'été (source : Weber, W. *Soleil et architecture : Guide pratique pour le projet*. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991. p11.

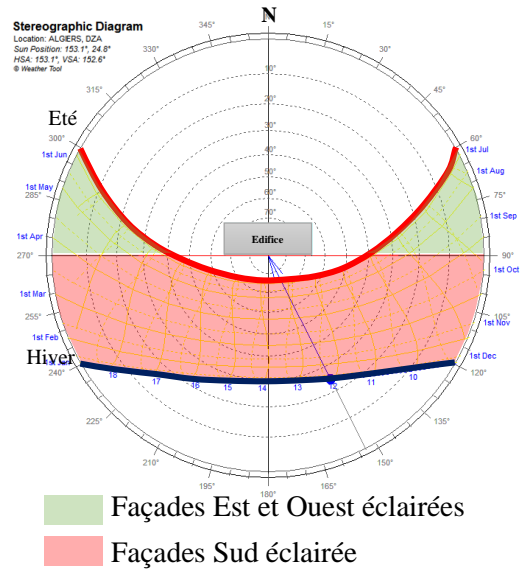


Figure 5 : Diagramme solaire d'Alger (réalisée avec Ecotect) (Source : Auteur)

La Figure 4 représente en général la puissance reçue par rayonnement du soleil sur des parois différemment orientées d'un bâtiment selon les saisons. On constate qu'en saison hivernale, où on a le plus besoin de chaleur dans notre hémisphère, la façade la plus exposée au soleil, et pendant la période la plus longue, est la façade sud. Les façades est et ouest ne sont que très peu exposées puisque qu'en hiver le soleil se lève au sud-est et se couche au nord-ouest, cette courte période donc ne permet pas le réchauffement de ces deux façades. Inversement en été, où on a besoin de se protéger du soleil, les façades est et ouest sont surchauffées (puisque le soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest). Arrivé à la façade sud, en été, le soleil est haut dans le ciel, par ce fait cette façade ne recevra pas beaucoup de rayonnement contrairement au plancher terrasse qui est exposée directement quasiment toute la journée et nécessite une très bonne isolation. Par exemple on peut voir dans la Figure 5 que dans le cas de la ville d'Alger, les façades est et ouest ne sont éclairées naturellement que de la fin mars (début de la saison printanière) à la fin de septembre (fin de l'été), période où il fait le plus chaud dans la capitale, alors que la façade sud est éclairée toute l'année sauf quand le soleil est haut.

Ainsi les ouvertures aux sud ont une meilleure capacité régulatrice de température alors que celle à l'est est à l'ouest ont plus de gains thermique en été et risquent la surchauffe<sup>25</sup>. L'orientation sud est l'orientation la plus favorable et bioclimatique.

<sup>25</sup> Weber, W. *Soleil et architecture: Guide pratique pour le projet*. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991. p11.

### I.3.1.1.b Les vents

La direction des vents et leurs fréquences est impératif à connaître avant toute conception.

En général on cherche à se protéger des vents d'hiver froids qui refroidissent les parois du bâtiment par convection et on recherche les vents d'été qui rafraichissent l'atmosphère (surtout en ambiance humide) et par frottement permettent la sudation. Pendant la conception la direction des vents permet de placer les ouvertures afin d'assurer la ventilation grâce aux brises naturelle tout en se protégeant des vents froids d'hiver et cela en réduisant les surfaces exposées directement ou en prévoyant a des écrans extérieurs (murs, végétation... etc.).<sup>26</sup>

### I.3.1.2 Géométrie de l'enveloppe

La compacité ou par son nom technique le facteur de forme<sup>27</sup>, est un paramètre déterminant dans l'efficacité énergétique d'un bâtiment directement lié à la géométrie de son enveloppe. Ce dernier mesure le rapport entre surface extérieure et volume, car plus la surface d'un même volume augmente, plus la relation avec l'extérieur et le risque de déperdition s'accroît.

Ce paramètre varie selon 03 éléments<sup>28</sup> :

- La forme : quand elle est complexe la surface en relation avec l'extérieur s'accroît, et inversement. C'est pour cela que la forme sphérique (l'un des volumes les plus basiques) est une forme de choix pour l'architecture bioclimatique.
- La taille : plus la taille augmente, plus le contact avec l'extérieur s'amplifie.
- Le contact : comme le montre la Figure 6, le contact entre les bâtiments favorise l'économie d'énergie car les surfaces mitoyennes ne sont plus déperditives, car elles ne sont plus en relation avec l'extérieur et ne risque plus une perte de température par conduction.

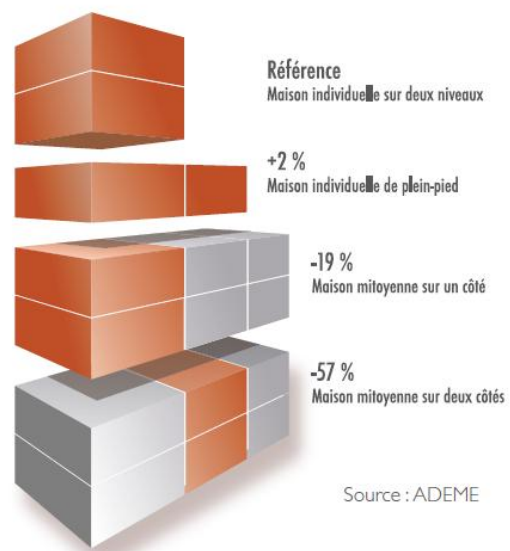


Figure 6 : L'habitat compacte et groupé est plus économe en énergie (Source : Info Energie en Bourgogne. Bâtiment économe en énergie : Les clés pour réussir son projet de construction ou de rénovation. Bourgogne, Janvier 2014. p05.

<sup>26</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. P35.

<sup>27</sup> Weber, W. *Soleil et architecture: Guide pratique pour le projet*. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991. p15.

<sup>28</sup> *Op cit* : Liébard, Alain, et André De Herde. p165.

### I.3.1.3 Matériaux de l'enveloppe

#### I.3.1.3.a Les Matériaux isolations

Toute paroi séparative de deux espaces représente un frein au transfert de chaleur. En saison hivernale, l'enveloppe du bâtiment doit empêcher les déperditions de chaleur pour limiter la consommation d'énergie pour le chauffage. En été c'est de l'effet inverse dont on doit se prévenir. C'est pour cela que l'isolation est primordiale dans l'efficacité d'un bâtiment.

L'isolation se place dans l'enveloppe, le sol, les façades et le toit entourant le bâtiment entièrement et est son rempart contre la rigueur du climat. Elle est constituée de matériaux isolants (pour les parois opaques) et de vitrages performants (pour les ouvrants) caractérisés par un coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  bas<sup>29</sup> (Flux thermique par mètre carré, traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour une différence de température d'un Kelvin entre les deux faces de ce matériau (W/m.K).)<sup>30</sup>

Les matériaux isolants sont souvent classés par leur nature et leur fabrication, on distingue<sup>31</sup> :

- **Matériaux fibreux inorganiques ou laines minérales** : La fibre de verre ou laine de roche, présentent une excellente résistance au feu et de bonnes qualités d'isolation thermique et d'absorption acoustique. Ils résistent à la pourriture, aux moisissures et à la vermine. D'une densité qui peut varier d'un facteur 10, ils sont utilisés ou bien en panneaux légers pour l'isolation des toitures inclinées et des parois verticales ou bien en panneaux dense où une résistance mécanique est nécessaire (dalle, toiture plate... etc.).
- **Matériaux fibreux organiques** : Laine, coton, paille, cellulose et autres fibres de plantes (ex. chanvre). Des mesures doivent être prises pour que ces matériaux résistent au feu à l'humidité et aux parasites.
- **Mousses inorganiques** :
  - o Mousse de verre (verre cellulaire) : est totalement étanche à l'eau et à la vapeur d'eau. Elle présente une bonne résistance à la compression mais est fragiles. Peut être utilisée en toiture plate et pour l'isolation de fondations et de dalles soumises à de fortes charges, ainsi que dans les endroits où l'étanchéité à l'eau

<sup>29</sup> Selon Le DTR C3-2 (p26), est considéré comme isolant un matériau dont  $\lambda < 0.12 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$ , selon la RT 2012 française,  $\lambda < 0.065 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$

<sup>30</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. P267.

<sup>31</sup> Roulet, Claude-Alain. *Éco-confort: pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. Lausanne: PPUR, 2012. p28-33.

et à la vapeur d'eau est essentielle. Résiste aux solvants, alcalis et aux acides ainsi qu'à la pourriture, aux moisissures et à la vermine.

- Le béton cellulaire : Utilisé comme béton léger ou pour construire des parois homogènes, il est caractérisé par une bonne résistance mécanique. Nettement moins isolant que les autres matériaux isolants spécifiques, il absorbe facilement l'eau et est sensible au gel.

- **Mousses organiques :**

- Polystyrène extrudé : Matériau par excellence pour l'isolation des toitures plates inversées pour sa capacité à supporter les intempéries. Résiste bien aux moisissures et à la pourriture mais vulnérable à la vermine.
- Le polyuréthane expansé : Bonne résistance à la compression. Résiste aux acides, aux solvants et à la moisissure. Très sensible aux ultraviolets et aux intempéries. En toiture, il est utilisé sous des dalles.
- La mousse d'urée formaldéhyde : Elle n'a pas de résistance mécanique malgré sa dureté. Elle est perméable à la vapeur d'eau et à l'humidité qui la rend plus fragile. Résiste à la moisissure et aux solvants (sauf les acides et les alcalis).

- **Matériaux ligneux :** Les bois légers, la paille agglomérée, les panneaux de fibre de bois légers. Possédant un coefficient de conductivité thermique plus élevé que les autres matériaux isolants spécifiques, les isolants ligneux sont sensibles à l'humidité qui les gonfle et les rend propice à la croissance de moisissures et à la pourriture.

- **Le liège :** Très bon isolant, le liège a souvent été utilisé pour isoler les toitures. Il n'absorbe que peu d'eau mais l'humidité qui le fait gonfler le rend propice à la croissance de moisissures et à la pourriture.

- **Isolation mince réfléchissante :** Elle a pour fonction de réfléchir le rayonnement infrarouge mais n'isole pas des autres modes de transferts de chaleur (conduction, convection). Nécessite une lame d'air de chaque côté de la surface.

- **L'air immobile et sec<sup>32</sup> :** L'air présente, en effet, une grande résistance thermique, puisque c'est lui qui confère leur capacité aux matériaux résistants poreux comme les mousses, pour autant que les mouvements de convection soient empêchés.

---

<sup>32</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. P179.

### I.3.1.3.b Applications des isolants thermiques

Ces matériaux isolants peuvent être appliqués de différentes manières on cite<sup>33</sup> :

- **Parois homogène** : les matériaux qui combinent conductivité faible et résistance mécanique peuvent être utilisés comme parois homogène par exemple le bois massif, le béton cellulaire, la paille comprimée... etc.
- **Dalles toitures** : Dans ce cas de figure l'isolation est placée au-dessus du parvapeur (lui-même au-dessus de la dalle) et en dessous du complexe d'étanchéité (qui peut être protégé par du sable ou du gravier. L'isolation doit avoir une bonne résistance mécanique (compression) et doit résister aux températures élevées (soleil ou pose de l'étanchéité).
- **Toiture inversée** : Cette fois ci c'est l'isolant qui est au-dessus de l'étanchéité et est souvent surplombée d'une forme de pente qui le protège du soleil. Seul le polystyrène extrudé peut convenir à cette situation grâce à la pellicule résistante à l'eau sur ses deux faces.
- **Les toitures vertes** : Stabilise la température et amortis les crues (rétention d'eau), cette technique permet aussi de refroidir la toiture en été. Elle nécessite néanmoins des précautions pour protéger l'isolation thermique (la toiture inversée est à éviter).
- **Toitures (en pente) et parois ventilées** : L'isolation est bien protégée des intempéries par les tuiles et une sous toiture ou par un bardage. L'humidité générée par la vapeur d'eau diffusée des parois ou la pluie est évacuée par ventilation sous le bardage. Il est nécessaire que toutes les parois soit étanches à l'air.
- **Dalles planchers** : Dans une situation idoine, l'isolation doit se placer sous la dalle (à l'extérieur) et donc doit résister à la compression.
- **Isolation entre deux parois (en sandwich)** : L'isolant étant bien protégé entre les parois n'importe quel matériau (isolant) peut convenir à ce cas de figure.
- **Isolation extérieure compacte** : le matériau isolant est fixé sur la façade extérieure du bâtiment avec une colle ou par des clous de matière plastique. Ce dernier est alors crépi, qui est armé d'un treillis, pour le protéger des intempéries. La plupart des isolants peuvent être appliqués dans cette situation. Permet facilement d'éviter les ponts thermiques (surtout pour les rénovations).

---

<sup>33</sup> Roulet, Claude-Alain. *Éco-confort: pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. Lausanne: PPUR, 2012. P34-39.

- **Isolation intérieure** : intéressante que dans les locaux où l'on désire réduire l'inertie thermique car elle a l'inconvénient de créer des ponts thermiques qui sont inévitables. Son utilisation provoque de la condensation de vapeur d'eau du côté froid de l'isolant thermique et diminue la surface habitable.
- **Isolation des ouvertures**<sup>34</sup> : en plaçant des vitrages performants comme le double vitrage, le triple vitrage, le double vitrage avec couche à basse émissivité ou encore un double vitrage isolé par un gaz noble permet de réduire les pertes à travers le vitrage de 30%.

### I.3.1.3.c L'inertie

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et à restituer de la chaleur avec un déphasage de temps. Une inertie thermique importante a un effet positif sur le confort climatique intérieur car elle permet de stabiliser les pics de températures en été et aide à éviter les grandes variations de températures en hiver. Elle dépend de la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur (chaleur spécifique et capacité thermique volumique), de la rapidité de la température du matériau à s'élever (la diffusivité thermique) et sa vitesse de stockage (l'effusivité thermique)<sup>35</sup>. Ainsi le choix des matériaux superficiel (en contact avec le rayonnement) doit se baser sur ces 3 facteurs, car si on a besoin d'une grande quantité de chaleur mais que celle-ci est échangée trop rapidement l'intérêt de l'inertie est perdue. Le transfert de chaleur de l'inertie est intimement lié au temps car c'est un processus dynamique.

### I.3.1.4 Les protections solaires :

Les protections solaires sont tous les éléments et les moyens d'empêcher le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on ne veut pas exposer au soleil.<sup>36</sup> En été la surchauffe liée au rayonnement est considérable. Diminuer cette surchauffe permet d'économiser l'énergie nécessaire au rafraîchissement.

On peut distinguer plusieurs protections :

- **Les protections solaires extérieures** : c'est des protections intégrées à l'architecture (brise soleil, porche, véranda) ou appliquées (stores, persiennes volets). Elles sont

---

<sup>34</sup> Vittone, René. *Bâtir: manuel de la construction*. Lausanne: PPUR Presses polytechniques, 2010. p443.

<sup>35</sup> Trachte, Sophie. *Matériau, matière d'architecture soutenable: Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable*. Louvain: Presses univ. de Louvain, 2010. p69.

<sup>36</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. P137.

généralement verticales pour protéger les façades est et ouest et horizontales pour les façades sud.

- **Les films solaires** : des films à appliquer sur un vitrage existant, qui réduisent les apports solaires énergétiques tout en laissant passer la lumière. Plus efficaces si appliqués sur la face extérieure du vitrage, ils doivent être changés chaque 5 ans.
- **Vitrage avec un bon facteur solaire**<sup>37</sup> : choisir un vitrage avec un bon facteur solaire permet de diminuer jusqu'à 70% de l'énergie par rayonnement tout en laissant passer 60% de la lumière. Néanmoins il faut choisir avec soin ce facteur solaire car trop bas il peut diminuer les gains de chaleur en hiver.
- **La végétation**<sup>38</sup> : Les plantes peuvent constituer un écran naturel au rayonnement, les arbres caduques ainsi permettent un ombrage naturel et saisonnier, laissant passer les rayons en hiver les bloquer ou filtrer en été. Le choix judicieux se porterait sur des essences avec peu de branchages (minimum d'ombre en hiver) et un feuillage dense pour l'été.

### **I.3.2 L'efficacité énergétique active**

Il s'agit ici d'utiliser tous les moyens et les innovations technologiques pour mieux produire et stocker de l'énergie. Ces derniers, sont impossibles à dénombrer au vue de la productivité et créativité que connaît le secteur. On peut néanmoins citer les techniques incontournables qui ont déjà fait leur beurre. On peut distinguer :

- **Le système photovoltaïque**<sup>39</sup> : Grâce à ses capteurs solaires, cette technologie permet de convertir 10 à 20% du rayonnement solaire incident en énergie électrique propre. Ce système durable dont la durée de vie des pièces dépasse les 20 ans sans entretien (sauf le nettoyage) est avantageux dans le sens où il produit de l'énergie tout en se libérant des contraintes liées à la distribution tout en s'intégrant au bâtiment en couverture où protection solaire.
- **Le chauffage solaire actif**<sup>40</sup> : est un système permettant d'utiliser l'énergie solaire à travers des capteurs solaires thermiques (à ne pas confondre avec les capteurs solaires photovoltaïques) pour chauffer de l'eau grâce au liquide contenu dans le collecteur

---

<sup>37</sup> Cockelenbergh, Cody. *Optimisation énergétique d'un nouveau bâtiment tertiaire*. Waterloo: Wolters Kluwer Belgium, 2009. p24.

<sup>38</sup> Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005. P137.

<sup>39</sup> *Op cit* : Liébard, Alain, et André De Herde. p199.

<sup>40</sup> Berg, Linda, Peter Raven, et David Hassenzahl. *Environnement*. 6e. Bruxelles: De Boeck Supérieur, 2009. p300.

solaire. Cette eau est pompée vers un échangeur puis stockée dans un réservoir ou directement utilisée pour le chauffage ou l'eau chaude.

- **La géothermie superficielle<sup>41</sup>** : Elle désigne l'énergie renouvelable stockée dans la terre. Elle est connue pour son utilisation à grande échelle par des forages profonds mais elle peut être utilisée sous une forme plus superficielle à échelle humaine. Assistée de pompe à chaleur pour faire remonter le liquide caloporteur, les collecteurs de ce système peuvent être placés à 1.5m ou 2m du sol mais ils ont l'inconvénient de le refroidir en hiver. Elle peut aussi être utilisée comme réservoir saisonnier où la chaleur captée en été servira au chauffage en hiver.

On peut aussi d'autres techniques<sup>42</sup> comme : les planchers solaires directs, la climatisation réversible, les chaudières à basse ou à très basse température, les chaudières à condensation ... etc.

### **I.3.3 L'efficacité énergétique interactive**

Les performances attendues lors de la réalisation ainsi que les modalités de contrôle doivent être clairement mentionnés et décrits dans le dossier de consultation des entreprises<sup>43</sup>.

Pendant le chantier les procédures de suivis doivent être planifiées et scrupuleusement respectées.

L'organisation de chantier doit intégrer impérativement à chaque lot technique, son système d'étanchéité et d'isolation. Quel que soit les choix techniques opérés, l'étanchéité de l'enveloppe ne peut être atteinte que par une bonne mise en œuvre et un contrôle stricte pour éviter toutes les malfaçons. Après la réception, c'est à l'utilisateur ou au gestionnaire d'utiliser son bien en optimisant l'économie d'énergie pour ce fait un guide d'utilisation du bâtiment pour sensibiliser les habitants.

### **I.4 Le contexte réglementaire :**

L'efficacité énergétique dans sa définition vise à atteindre des objectifs fixés en amont. Ces objectifs peuvent être pour des raisons économiques, idéologiques, concurrentielle mais ils

---

<sup>41</sup> Geitmann, Sven. *Énergies renouvelables & carburants alternatifs: de nouvelles énergies pour l'avenir*. Berlin: Hydrogeit Verlag, 2007. p129.

<sup>42</sup> Fourret, Michèle. «Rentabilité assurée.» *Faire faire*, Juillet 2006: 56-60.

<sup>43</sup> Jobert, Romuald. *Perméabilité à l'air de l'enveloppe: réglementation, risques, mesure et amélioration*. Grenoble: CSTB, 2012. p72-73.

devront au moins répondre au minima fixé par la réglementation en vigueur. Ces standards changent d'un contexte à un autre, dans notre cas on parlera brièvement du contexte local représenté par les documents techniques règlementaires (DTR) C3-2 et C3-4, on essaiera aussi de voir le règlement duquel il a été inspiré à savoir la norme française qui est représentée par la réglementation thermique (RT) 2012. Ce choix a été guidé par le fait que la RT2012 impose un diagnostic de l'enveloppe, après la réalisation, qui peut être thermographique, c'est d'ailleurs ce protocole (NF EN 13187) qu'on appliquera en partie pratique.

### **I.4.1 Règlementation en vigueur DTR C3-2 :**

Mis en place en 1998 par le Ministère de l'Habitat (DTR C3-2 chauffage : Règles de calcul des déperditions calorifiques) la réglementation est obligatoire depuis l'année 2000 (Décret exécutif portant réglementation thermique des bâtiments (n° 2000-90 du 24/04/2000)).

Ce document technique vise le calcul des déperditions calorifiques (en régime stationnaire indépendamment du système de chauffage) des bâtiments, ainsi que le dimensionnement des installations chauffage. Elle n'est destinée qu'aux bâtiments neufs à vocation résidentielle.

Ce règlement propose une déperdition de référence qui varie selon la zone climatique en Algérie (cf. annexe02) et la typologie du logement (maison individuelle ou logement collectif). Elle est calculée par l'attribution d'un coefficient de transmission surfacique  $K$  global à chaque élément constructif de l'enveloppe pouvant avoir un rapport avec l'extérieur (toiture, plancher, murs, portes et fenêtres dont les coefficients sont notés respectivement : a, b, c, d et e). Le produit de ces coefficients et de leur surface en contact avec l'extérieur donne la déperdition de base. Ainsi on procède au calcul de la déperdition par transmission du logement (noté dans le DTR par  $D_T$ ) qui est la somme de toutes les déperditions (surfacique à travers les parties en contact avec l'extérieur, les ponts thermiques, les parois en contact avec le sol et toutes celle en contact avec des locaux non chauffés). Pour que le règlement soit respecté, la quantité de chaleur obtenue doit être inférieure à 105% de la déperdition de référence. Quant au dimensionnement du système chauffage, il est fait sur la base de d'une quantité de chaleur nécessaire. Cette dernière est calculée en multipliant un écart type de température à la somme des déperditions par transmission du logement (flanquées d'un coefficient de pertes calorifiques dues au réseau de tuyauteries ou un coefficient de surpuissance) et des déperditions par renouvellement d'air (flanquées d'un coefficient de pertes calorifiques dues au réseau de tuyauteries). Le DTR propose une autre méthode de calcul plus dynamique qui permet d'interpréter plus finement les besoins thermiques

puisqu'elle prend en compte le rayonnement solaire, l'inertie thermique des matériaux ainsi que les gains internes dues à l'occupation, elle permet donc de dimensionner ce système de manière plus économique<sup>44</sup>.

### **I.4.2 Règlementation française : RT 2012**

La réglementation thermique française instaurée en 2012 (RT 2012) a une application globale, c'est-à-dire qu'elle s'applique aussi bien pour une réalisation d'un logement que pour les opérations de rénovation<sup>45</sup>. La RT 2012 a des exigences qui concernent la consommation globale du bâtiment, comme la nécessité de limiter la consommation d'énergie primaire conventionnelle à 50 kWhep /m<sup>2</sup>.an, ou la fixation de trois grands coefficients liés à la consommation Cep, Le besoin bioclimatique en énergie Bbio et la température intérieure atteinte en été Tic. Cependant, elle adopte aussi une approche « élément par élément » où plusieurs éléments de construction défini en amont, ont leurs propres exigences (ex. : Pour les maisons individuelles ou accolées, la perméabilité à l'air de l'enveloppe sous 4 Pa doit être inférieure ou égale à : 0,60 m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>)). Chaque projet de conception doit être soumis à ce règlement par réalisation d'une étude réglementaire, à son issue une attestation thermique est attribuée pour être jointe au dossier du permis de construire. A la réception du projet un diagnostic de performance énergétique doit être effectué (test étanchéité à l'air ou thermographie) pour l'obtention de l'attestation d'achèvement et de conformité des travaux.

### **I.4.3 Synthèses sur les réglementations :**

La réglementation algérienne consiste à calculer précisément les pertes de chaleurs dues à l'enveloppe et a les limiter. Elle se base sur ces mêmes calculs pour créer un système de chauffage assez performant pour offrir une ambiance confortable sans surconsommation énergétique. La réglementation française RT 2012 fait de même en allant un peu plus dans les détails des éléments formant l'enveloppe. Mais elle ne se contente pas de la phase conceptuelle puisque son respect est obligatoire pour passer à la phase réalisation. Elle va encore plus loin en exigeant une bonne mise en œuvre avant de permettre la réception

---

<sup>44</sup> Si la quantité de chaleur obtenue est inférieure à 80% de la somme des déperditions par transmission du logement et des déperditions par renouvellement c'est elle qui servira au dimensionnement et donnera un réseau plus économe

<sup>45</sup> Molle, Dimitri, et Pierre-Manuel Patry. *RT 2012 et RT existant: réglementation thermique et efficacité énergétique*. Paris: Eyrolles, 2013.

définitive des travaux, ainsi l'efficacité énergétique n'est pas juste une feuille de calcul, mais plutôt un fait avéré grâce à son évaluation et son diagnostic en aval.

### **I.5 L'audit énergétique :**

Selon le Ministère de l'énergie et des mines (2010) l'audit énergétique est un examen qui contrôle les performances énergétiques des installations et des équipements d'un établissement. Ayant pour ultime but la rationalisation de la consommation énergétique, il permet de détecter les mesures d'économie applicables et les moyens de les atteindre.<sup>46</sup>

Il existe deux types d'audit énergétique<sup>47</sup> :

L'audit volontaire : qu'un habitant effectue pour baisser sa facture énergétique.

L'audit pour la certification : elle peut être volontaire ou obligatoire (comme dans le cas de la réglementation française RT 2012) afin d'obtenir un label ou attestation.

En Algérie l'audit énergétique des entreprises dépassant un certain seuil de consommation d'énergie fixé par voie réglementaire, est obligatoire depuis 2005 en application du Décret exécutif n° 05-495. La périodicité de l'audit dépend des secteurs des entreprises (3 ans pour l'industrie et le transport et 5 ans pour le domaine tertiaire). Elle est généralement effectuée en 03 étapes

- 1- Recueil d'informations (plans, matériaux, équipements, comportement des usagers, facture énergétique...etc.).
- 2- Analyse et traitement des données.
- 3- Réalisation de calcul et des rapports (coût d'investissement et la durée du retour sur investissement).

### **I.6 Outils d'audit énergétique :**

#### **I.6.1 Mesure de la consommation énergétique**

C'est la simple lecture de la consommation électrique par le biais des compteurs bien connu. Elle permet de diagnostiquer la performance des différentes installations techniques ainsi que

---

<sup>46</sup> Ministère de l'Énergie et des Mines. «Annexe II: Guide méthodologique.» <http://www.mem-algeria.org/>. 2010. [http://www.mem-algeria.org/legis/Energies/Annexe\\_II.pdf](http://www.mem-algeria.org/legis/Energies/Annexe_II.pdf) (accès le Aout 12, 2015).

<sup>47</sup> Seoud, S. *AUDIT ENERGETIQUE DE BATIMENTS TERTIAIRES -Cas de trois bâtiments existants à Alger-*. Thèse magister, Alger: Epau, s.d. p51.

le celle du bâtiment en entier. La différence de la consommation réelle et celle d'une consommation absolue peut démontrer une défaillance énergétique.<sup>48</sup>

### **I.6.2 Mesure in situ de coefficients K de la paroi**

C'est une technique qui mesure simultanément le flux de chaleur à travers une paroi à l'aide de fluxmètres et les températures intérieures et extérieures de surface à l'aide de thermocouples, ainsi que les températures d'air intérieur et extérieur. Connaître dans la quantité de flux traversant la paroi lors d'une stabilisation de la température permet ainsi de calculer la conductance K (abordée dans le chapitre I.3.1) et ainsi savoir la performance de l'enveloppe.<sup>49</sup>

### **I.6.3 Mesure en laboratoire**

Cette méthode est dite destructive puisque qu'elle nécessite un prélèvement d'échantillons. Elle concerne deux caractéristiques des parois<sup>50</sup> :

- La conductivité thermique : qui peut être testée grâce à la méthode des plaques chaudes gardées ou encore celle des sondes à choc thermique
- La résistance thermique : mesurée via la méthode de la boîte chaude gardée

### **I.6.4 Simulation logicielle**

La simulation thermique dynamique, STD, permet de choisir les actions à entreprendre avant un audit énergétique in situ<sup>51</sup>. Elle a la capacité de calculer la consommation réelle en modélisant l'exacte enveloppe d'un bâtiment (avec les caractéristiques des matériaux leurs inerties, les systèmes énergétique ainsi que le comportement des usagers) et de faire varier les éléments extérieurs tel que la température, la vitesse du vent, le rayonnement solaire... etc. Elle peut être incluse dans le processus conceptuel ou dans les opérations de rénovation. Il existe de multiple logiciels qui permettent de réaliser ce genre de simulation on peut en citer : TRNSYS, Pléiades + COMFIE, DOE-2, TAS, CODYBA (France), WUFI, Lesosai, SIMBAD, EnergyPlus, BLAST... etc.

---

<sup>48</sup> Denker, Astrid, and S.M.K El Hassar. *Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie*. Alger: GIZ, 2014.p86-87

<sup>49</sup> Op cit : (Denker et El-Hassar 2014, 90)

<sup>50</sup> Op cit : (Denker et El-Hassar 2014, 91)

<sup>51</sup> Op cit : (Denker et El-Hassar 2014, 92)

### **I.6.5 Le test d'étanchéité à l'air**

Ce test consiste à créer une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cette dépression génère un flux. Il suffira d'extraire les volumes d'air connus et de mesurer la différence de pression. Perméascope (placé directement dans la conduite VMC), porte soufflante ou poire à fumée (dont la fumée permet d'identifier le mouvement de l'air) le nom du test peut changer selon le matériel utilisé, mais le principe reste le même.<sup>52</sup>

### **I.6.6 Thermographie :**

La thermographie est un outil d'audit énergétique qui permet de détecter grâce à la caméra thermique infrarouge les fuites d'air et les défauts d'isolation. Elle fera l'objet du prochain chapitre.

### **I.7 Conclusion :**

Nous avons vu à travers ce chapitre que pour atteindre une certaine performance énergétique, il est nécessaire d'adopter une démarche efficace dès le début de la conception et se donner les moyens nécessaires à sa concrétisation. Guidé par les normes et standards mis en place l'efficacité énergétique, ne peut être réellement atteinte qu'après la réalisation du projet. En effet, c'est dans cette phase cruciale que la consommation énergétique du bâtiment est fixée et vérifiée par la mise en œuvre de son enveloppe. Et c'est là que la thermographie prend tout son sens que moyen d'audit énergétique.

---

<sup>52</sup> Durand-Pasquier, Gwénaëlle. *Bâtiments et performance énergétique: données techniques, contrats, responsabilité*. Paris: Lamy, 2011. P65

## Chapitre II: La thermographie du bâtiment

### II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons introduire l'analyse thermographique du bâtiment. Nous allons d'abord définir la notion de thermographie infrarouge en expliquant les principes scientifiques qui se cachent derrière. Nous aborderons en suite un bref historique de son développement et ses diverses application dans différents secteur jusqu'à son apparition dans le domaine du bâtiment en tant qu'outil d'audit énergétique. De là, nous verrons ses divers types d'approches, les protocoles thermographiques à suivre lors d'un sondage et ses outils. Nous terminerons sur ce qu'elle détecte, ses résultats et enfin des exemples de son application sur le bâtiment.

### II.2 Définition

La thermographie est une technique qui met en évidence le phénomène de rayonnement, permettant son analyse et sa visualisation directe, au moyen d'un appareillage approprié. Elle permet aussi de voir les températures de surfaces des objets en établissant une cartographie des températures ou thermogrammes observées dans le domaine spectral infrarouge<sup>53</sup>. La thermographie infrarouge permet donc, une mesure globale de l'énergie émise par rayonnement et sans contact ni destruction des objets présents dans la scène thermique analysée.

Essentiellement, cette technique donne la possibilité de quantifier et qualifier un champ invisible de la nature qu'est la chaleur (Gaussorgues 1999).

L'appareillage nécessaire à cette discipline est diversifié mais il peut être classé en 3 catégories : les scanners, les radiomètres et l'imagerie thermique<sup>54</sup>:

- Les scanners qui procèdent par des mesures linéaires (par profil) et dont le principe ressemble un peu aux scanners mobiles d'écriture. Pour les utiliser il faut les mettre sur des supports déplaçables à une vitesse maîtrisée pour obtenir un thermogramme de la scène.
- Les radiomètres qui réalisent une mesure ponctuelle. Ils sont principalement utilisés pour les analyses nécessitant un suivi sur le temps d'une zone ou un point donné.

---

<sup>53</sup> A09-400, AFNOR. «Essais non destructifs- Thermographie infrarouge- Vocabulaire.». Paris, 1991.

<sup>54</sup> CHAFFAR, Khaled. *Thèse de doctorat : Thermographie active appliquée à la caractérisation in situ de parois de bâtiment*. Artois : UNIVERSITE D'ARTOIS, 2012.

- Les caméras et les imageurs thermiques qui réalisent des mesures d'une scène à travers le report des variations thermiques sous forme d'image. Les imageurs se différencient des caméras par le fait qu'ils permettent uniquement de visualiser des variations spatiales de la luminance, alors que les caméras sont des appareils de mesure de température.

### **II.3 Principes de la thermographie :**

Pour comprendre le fonctionnement de la thermographie, il est nécessaire d'appréhender les bases physiques qui la composent. Il sera plus aisé, alors, de comprendre ce qui peut être vu et de détecter les erreurs pouvant arriver lors d'une inspection thermographique dû à un mauvais positionnement ou à la présence de certains matériaux ou facteurs.

#### **II.3.1 Le transfert de chaleur :**

Il existe 3 principaux modes de transferts de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction est le transfert de chaleur au sein d'un même solide. La convection est l'échange entre un fluide et un solide. Quant au rayonnement c'est le transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique émis naturellement par les surfaces des corps. Ce dernier est au cœur du diagnostic thermographique.

Tout corps à température non nulle émet et absorbe des radiations électromagnétiques dont le spectre de fréquence dépend essentiellement de sa température.<sup>55</sup>

#### **II.3.2 Spectre des rayonnements :**

Tout corps ou objet dégage un rayonnement thermique lié à la matière dont il est composé, cette émission n'est visible que si elle est de nature électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 400nm et 700nm, dans les autres cas l'œil humain lui est insensible<sup>56</sup>. La Figure 7 représente tout le spectre électromagnétique selon la longueur d'onde, la fréquence et l'énergie émise.

On peut remarquer que la longueur d'onde  $\lambda$  [m] et la fréquence  $f$  [Hz] est inversement proportionnelle<sup>57</sup> selon l'expression :

---

<sup>55</sup> Radhouani, Mohamed Sassi, et Naouel Daouas. *Exercices résolus de thermique: Tome 1, Lois de base et conduction, Volume 1*. Paris: TECHNIP, 2008. P10-12.

<sup>56</sup> ROULET, Claude Alain. *Santé et qualité de l'environnement interieur dans les bâtiments*. 2e. Paris: PPUR, 2010.

<sup>57</sup> Ibarra-Castanedo C., Maldague Xavier P. V. "Infrared Thermography." In *Handbook of Technical Diagnostics*, by Horst Czichos, edited by Horst Czichos, 566. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

$c = \lambda \times f$  Où  $c$  exprime la vitesse de la lumière  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

L'énergie émise étant en relation avec la fréquence de radiation  $E = h \times f$  (où  $h$  est la constante de Planck  $h = 6,62606957 \times 10^{-34}\text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$ ), les corps ne disposant pas de beaucoup d'énergie ou de chaleur (le corps humain, les bâtiments...etc) émettent sur les plus longues ondes (infrarouge long LWIR) et inversement ceux qui disposent de beaucoup d'énergies (Le soleil) émettent sur un spectre plus élargi passant des petites ondes aux plus grandes.

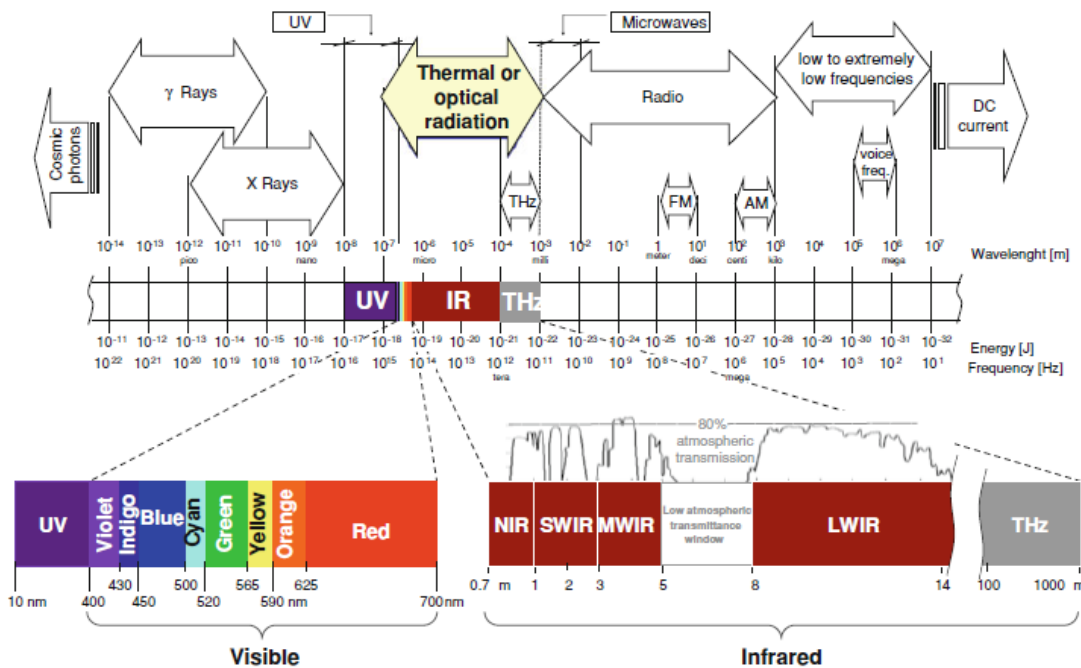


Figure 7: Spectre électromagnétique (Ibarra-Castaneda C. 2013)

Le rayonnement infrarouge est lié à une énergie moins élevée que celui de l'ultraviolet, plus l'objet est chauffé plus l'énergie utilisée est grande et la possibilité de voir le rayonnement grandit. Ainsi contrairement à ce qu'on peut croire l'infrarouge est relié au froid et non pas au chaud et son utilisation en bâtiment est des plus adaptée puisque les écarts de températures des éléments qui le composent sont réduits.<sup>58</sup>

La thermographie joue sur cette notion pour détecter les objets de « faibles » températures, ainsi la caméra thermique est conçue pour voir les objets à températures dites ordinaires.

<sup>58</sup> PAJANI, Dominique. *La thermographie du bâtiment*. 1ère. Paris: Eyrolles, 2012.

### II.3.3 La loi de Planck <sup>59</sup>:

Un corps noir dit « parfait » est un objet ou un système capable d'absorber entièrement le rayonnement électromagnétique incident quel que soit son angle, sa longueur d'onde ou sa fréquence, et ainsi réémet ce rayonnement uniformément dans toutes les directions.

L'émission d'un corps noir avoisinant les 310 K soit 37°C culmine à une longueur d'onde de 9,3µm c'est-à-dire dans le spectre des infrarouges longs. Ainsi un radiomètre ou un détecteur qui fonctionne dans ces longueurs d'ondes (comme la caméra thermique) est un choix pertinent pour détecter ces petites températures. La loi de Planck permet de connaître théoriquement l'émission maximale d'un objet cette dernière est en relation directe avec la température de sa surface. Donc le rayonnement infrarouge est directement lié à la propriété d'émissivité des surfaces des objets.

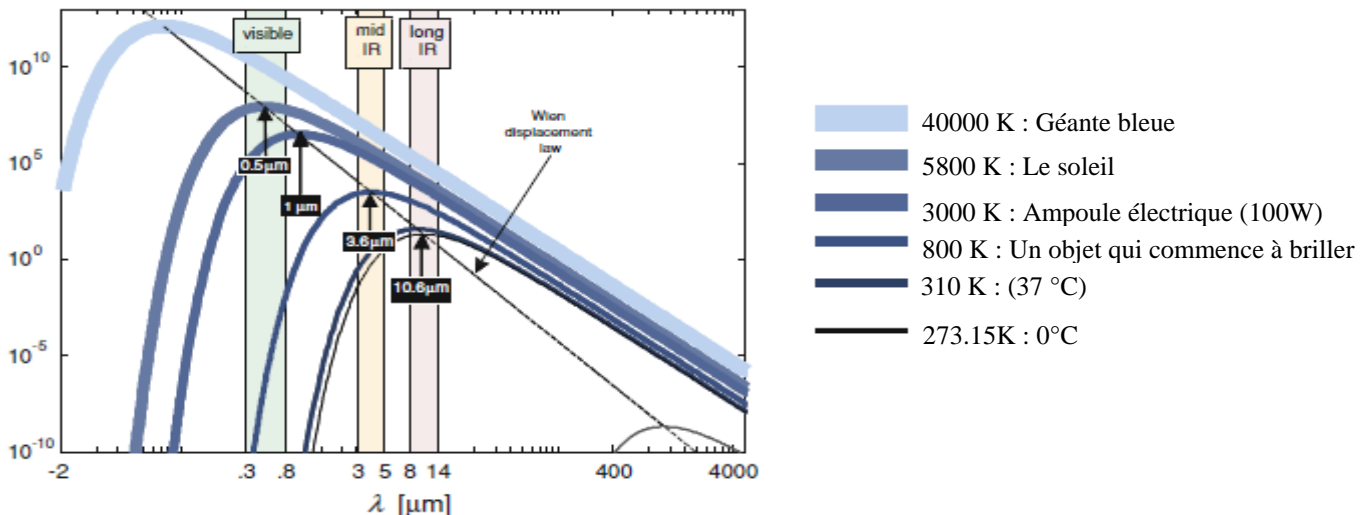


Figure 8 : Longueur d'onde des rayonnements émis par un corps noir en fonction de sa température, selon la loi de Planck (Source : (Ibarra-Castanedo C. 2013))

### II.3.4 La loi de Kirchhoff – émissivité :

La loi Kirchhoff décrit la relation qui existe entre l'émission et l'absorption d'un corps<sup>60</sup> en l'absence de mécanismes d'échange d'énergie autres que radiatifs<sup>61</sup>.

A l'équilibre thermodynamique l'énergie rayonnée par un corps, donc sa luminance,  $L(\lambda, T, \Omega \nu)$  à toute longueur d'onde  $\lambda$  et selon toute direction ( $\nu$ ), est égale à l'énergie absorbée par le corps  $\alpha d(\lambda, T, \Omega \nu)$ . Kirchhoff définit l'émissivité  $\epsilon$  comme le ratio entre le rayonnement

<sup>59</sup> Ibarra-Castanedo C., Maldague Xavier P. V. "Infrared Thermography." In *Handbook of Technical Diagnostics*, by Horst Czichos, edited by Horst Czichos, 566. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

<sup>60</sup> PEQUIGNOT, Eric. *Détermination de l'émissivité et de la température des surfaces continentales. Application aux sondeurs spatiaux infrarouges HIRS et AIRS/IASI*. Paris: Ecole polytechnique, 2006.

<sup>61</sup> GUILLEVIC, Pierre. *Modélisation des bilans radiatifs et énergétiques des couverts végétaux*. Toulouse: Université Paul Sabatier, 1999.

thermique d'une surface d'un corps réel en rapport à celle d'un corps noir dans les mêmes conditions (longueur d'onde, température et angle d'émission  $(\lambda, T, \Omega_v)$ )<sup>62</sup>.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \text{ OÙ } E : \text{émissivité d'un corps réel et } E_b : \text{émissivité d'un corps noir}^{63}$$

Cette valeur varie entre 0 et 1 : une surface ayant un  $\varepsilon=1$  est considéré comme un corps noir, et au contraire une surface caractérisée par  $\varepsilon=0$  est appelé corps blanc. Le reste des objets c'est-à-dire  $0 < \varepsilon < 1$  sont appelés des corps gris.

### **II.3.5 La Loi de Stefan-Boltzmann**<sup>64</sup>

La loi appliquée à l'émission des surfaces sur toutes les longueurs d'ondes, a intégré la loi de Plank et ainsi a déduit la puissance liée au rayonnement d'un corps noir  $I_b$  [W/m<sup>2</sup>].

$$I_b = \sigma \times (T_1 - T_2)^4 \text{ OÙ } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ est la constante de Stefan-Boltzmann et } T_1 - T_2 \text{ est la différence de température entre 02 surfaces en Kelvin.}$$

Pour un corps réel on introduit le facteur d'émissivité de Kirchhoff.

$$I = \varepsilon \times \sigma \times (T_1 - T_2)^4$$

## **II.4 Historique**

La thermographie n'aurait jamais existé sans la découverte du spectre infrarouge en 1800 par l'astronome William Herschel<sup>65</sup> en essayant de filtrer l'image du soleil à travers son télescope. C'est n'est qu'en 1840, que son fils John, a pu développer la première image thermique (infrarouge) qu'il appela thermogramme<sup>66</sup>. Mais il a fallu attendre 1880 pour l'invention du premier outil qui permet de détecter sensiblement les rayons infrarouge, le bolomètre (par le physicien Samuel Langley)<sup>67</sup>. Il sera suivi en 1929 de la première caméra infrarouge dont l'invention est attribuée au physicien hongrois Kalman Tihanyi commissionné par l'aviation britannique à des fins militaires<sup>68</sup>. Pendant la deuxième guerre mondiale, un

<sup>62</sup> Ibarra-Castanedo C., Maldague Xavier P. V. "Infrared Thermography." In *Handbook of Technical Diagnostics*, by Horst Czichos, edited by Horst Czichos, 566. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

<sup>63</sup> PLEȘU, RALUCA, GABRIEL TEODORIU, et GEORGE ȚĂRANU. *Infrared Thermography Applications For Building Investigation*. Iași: Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2012.

<sup>64</sup> Benson, Harris, et Marc Séguin. *Physique: 3. Ondes, optique et physique moderne*. Québec: De Boeck Supérieur, 2009. p314.

<sup>65</sup> Giancoli, Douglas. *Physique générale: Ondes, optique et physique moderne*. Montréal: De Boeck Supérieur, 1993. p294.

<sup>66</sup> Zhang, Zhuomin, Benjamin Tsai, et Graham Machin. *Radiometric Temperature Measurements: II. Applications*. Londres: Academic Press, 2009. p400.

<sup>67</sup> Meurant, Gerard. *Physical Principles of Far-Infrared Radiation*. Londres: Academic Press, 1973. p157.

<sup>68</sup> Saba, Luca, Warren Rozen, Alberto Alonso-Burgos, et Diego Ribuffo. *Imaging for Plastic Surgery*. Massachusetts : CRC Press, 2014. p130.

progrès considérable a été atteint dans le développement des détecteurs de lumière et de convertisseurs d'images d'imagerie (vision nocturne). Cependant ce n'est qu'en fin des années 60s que les caméras thermiques ont été commercialisées au grand public, devenant ainsi disponible à pour d'autres domaines que l'armée.

### **II.5 Application de la thermographie dans différents domaines<sup>69</sup>**

Du fait de son caractère non destructif (cf. définition), la thermographie est un outil très pertinent qui a été utilisé dès la démocratisation de la caméra thermique dans plusieurs domaines. Ceci n'est un bref listing non exhaustif du potentiel d'application de l'imagerie thermique :

- **Industrie, détection de gaz** : Même si les caméras standards ne peuvent pas détecter les gaz, certaines modifications de signaux de la caméra thermiques leurs donnent cette capacité. Cette application plutôt récente a commencé à voir le jour en 1985, est très utiles pour prévenir les incidents dus aux fuites de gaz. Aujourd'hui la thermographie permet de détecter la plupart des composants organiques volatils (COV comme le méthane le propane ... etc.) et dernièrement le CO<sub>2</sub>.

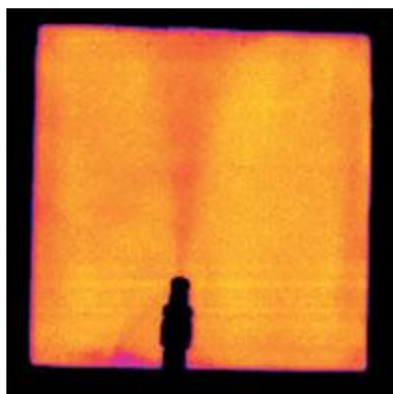


Figure 10 : Image thermique d'un flux de méthane pur observé grâce à une caméra thermique FLIR GasFind (Source : (Vollmer et Möllmann 2011)).

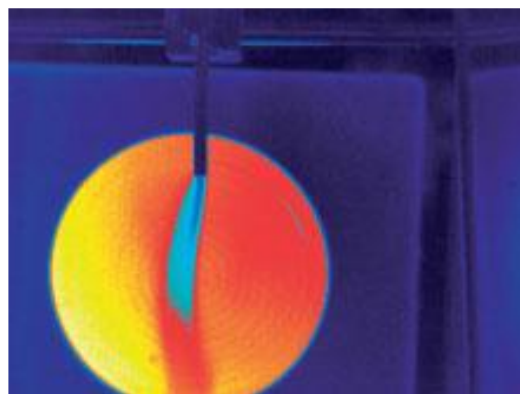


Figure 9 : Image thermique 'un flux de CO<sub>2</sub>, observé grâce à une caméra thermique à bande étroite (SC6000 avec filtre) (Source : (Vollmer et Möllmann 2011)).

- **L'industrie des microsystèmes** : la micro industrie est l'un des domaines les plus importants ces dernières années, au vue de la démocratisation des appareils électroniques. Les puces et les microsystèmes créés par cette industrie nécessite souvent pour fonctionner une distribution uniforme de la température. Or si on utilise des diodes ou des mini capteurs pour analyser thermiquement ces cartes, ils risquent de créer des déperditions de chaleurs et perturber la constance de température. C'est

<sup>69</sup> Vollmer, Michael, et Klaus-Peter Möllmann. *Infrared Thermal Imaging : Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim : John Wiley & Sons, 2011.

pour cela que la thermographie est la solution propice à l'analyse des microsystèmes. Mais au vue de la taille des objets observés, les caméras utilisées doivent avoir des lentilles qui permettent la micro observation.

- **Industrie Aérospatial** : L'imagerie thermique est souvent utilisée pour détecter les fuites d'air froid dans les avions ainsi que pour inspecter les systèmes électriques, hydrauliques et les fuselages. Les caméras utilisées doivent avoir la capacité de capter beaucoup d'image par seconde, car il parfois nécessaire que l'avion soit en mouvement lors d'un test.
- **Dans le bâtiment**<sup>70</sup> : l'usage de la thermographie en tant qu'outil d'audit énergétique fera l'objet du reste de ce chapitre. Néanmoins ce n'est pas la seule utilité de l'imagerie thermique dans le bâtiment. En effet, les thermogrammes peuvent être utilisés pour déceler les composantes structurelles d'un bâtiment sans destruction, ce qui s'avère utile dans le domaine du patrimoine pour préserver ou restaurer des anciens édifices.

La thermographie est utilisée dans d'autres domaines comme : l'industrie électrique, la médecine et sciences vétérinaires, le sport, la surveillance et sécurité, les sciences de la nature ... etc.<sup>71</sup>



Figure 11 : Détection du matériau de construction de la partie saillante du bâtiment, (les parties en retrait sont trop éloignées ou la couche de plâtre est trop épaisse pour déceler son matériau) grâce à l'imagerie thermique. (Source : (Pleșu, Teodoriu et Țăranu 2012)

<sup>70</sup> PLEȘU, RALUCA, GABRIEL TEODORIU, et GEORGE ȚĂRANU. *Infrared Thermography Applications For Building Investigation*. Iași: Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași, 2012.

<sup>71</sup> Vollmer, Michael, et Klaus-Peter Möllmann. *Infrared Thermal Imaging : Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim : John Wiley & Sons, 2011.

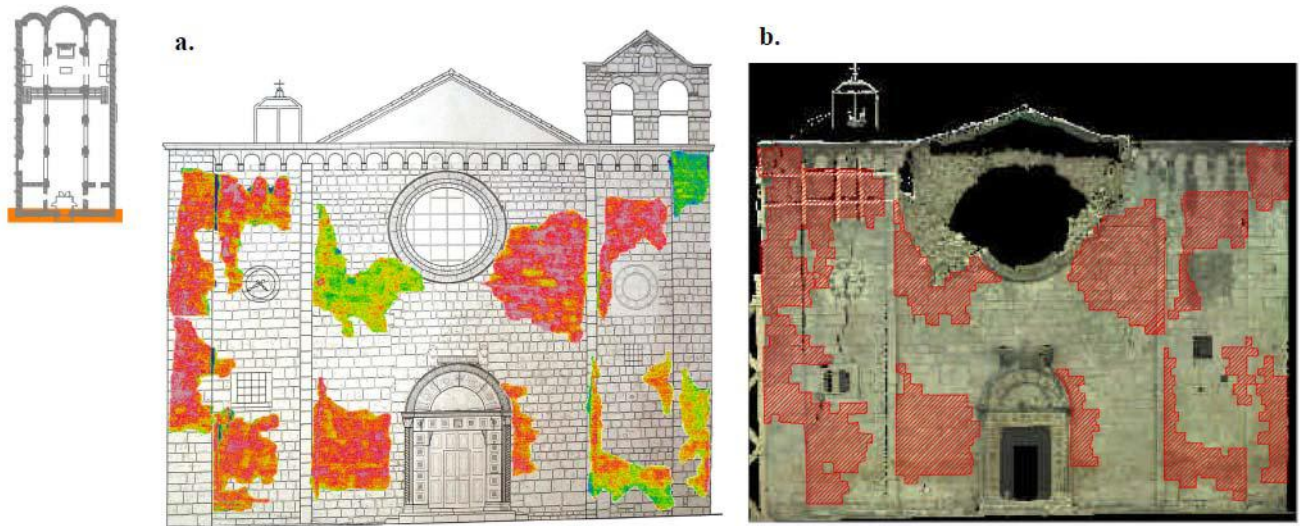


Figure 12 : Analyse thermographique pour détecter les failles et les anomalies technique avant la restauration de l'église de Sant Eusanio Forconese suite aux dégâts causés par le séisme de 2009 (source : (Bianco et Ceradini 2010))

## **II.6 Définition de la thermographie du bâtiment :**

La thermographie infrarouge est au bâtiment ce que la radiologie est à la médecine<sup>72</sup>. La thermographie infrarouge est la méthode la plus facile et la plus rapide, sans contact et sans perturbation du milieu, pour mettre en évidence les pertes d'énergie, irrégularités dans l'isolation thermique (parois et toiture), les ponts thermiques ; les défauts d'étanchéité à l'air, les infiltrations d'eau et la présence d'humidité. En ce sens elle constitue un outil d'aide à l'élaboration du bilan thermique ou énergétique du bâtiment en quantifiant les déperditions par rayonnement (pertes moins gains).

## **II.7 Les usages de la thermographie :**

La thermographie utilisée peut être différente selon l'objectif ciblé<sup>73</sup>. Si le but recherché est d'informer, de communiquer ou de montrer les déperditions énergétiques on a aura plus recours à la thermographie illustrative. Elle se doit d'être évocatrice car elle est non quantifiée et basée que sur l'imagerie thermique.

Si l'approche est plus technique et se base que sur les écarts de températures apparentes, c'est une thermographie comparative qui ne renseigne pas de façon absolue sur l'isolation thermique et les déperditions annuelles elle reste systémique et on l'appelle souvent « thermographie aérienne ».

<sup>72</sup> Op cit : Vollmer, Michael, et Klaus-Peter Möllmann. p329.

<sup>73</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

La thermographie peut être aussi utilisée dans toutes ses applications pour effectuer des états de lieux thermiques, ses résultats détermineront l'étendue des travaux à effectuer : de simples corrections de défauts ou des investissements à plus long terme tel que des rénovations.

Enfin cette technique est un moyen pour contrôler les travaux pendant la réalisation et dans certains pays, elle représente un instrument réglementaire qui permet aux professionnels de détecter les failles thermiques avant la réception des travaux.

### **II.8 Avantages de la thermographie :**

La thermographie a de nombreux avantages liés à sa nature d'imagerie thermique et ses outils d'application. Du fait d'observer avec la caméra thermique avec un œil extérieur rend la procédure non intrusive et non destructif. Comme les caméras sont de plus en plus pratiques et facile a, elles simplifient la mise en œuvre de la thermographie. Elle permet des contrôles globaux à condition d'avoir la place pour prendre des prises de vues<sup>74</sup>.

### **II.9 Les limites de la technique**

La thermographie a aussi des limites qui sont générées. Elle est dépendante de la météo car le rayonnement solaire, l'humidité, les transmissions thermiques générées par un vent puissant, peuvent fausser les résultats obtenues. L'interprétation des données thermographiques est plus ou moins complexe. La thermographie ne permet pas de calculer les déperditions par exfiltrations de l'air. Ce n'est pas une analyse de la qualité de la construction mais une étude de son impact thermique<sup>75</sup>.

### **II.10 Les types d'approches thermographiques :**

Il existe deux sortes d'approches thermographiques selon les objectifs <sup>76</sup>: l'approche passive qui consiste à observer l'objet dans son environnement et sa température ambiante sans élément perturbateur. Cette technique vise un but qualitatif comme le diagnostic des anomalies dans des circuits électriques ou de mal façon dans l'enveloppe de bâtiments.

---

<sup>74</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

<sup>75</sup> *Op cit* : PAJANI, Dominique.

<sup>76</sup>Ibarra-Castaneda C., Maldague Xavier P. V. "Infrared Thermography." In *Handbook of Technical Diagnostics*, by Horst Czichos, edited by Horst Czichos, 566. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

L'approche active quant à elle consiste à introduire stimulus pour induire un contraste thermique, cette démarche plus quantitative nécessite une bonne maîtrise de la source d'énergie introduite. Son objectif est de détecter les défauts des surfaces. L'approche adoptée lors de cette recherche est l'approche passive.

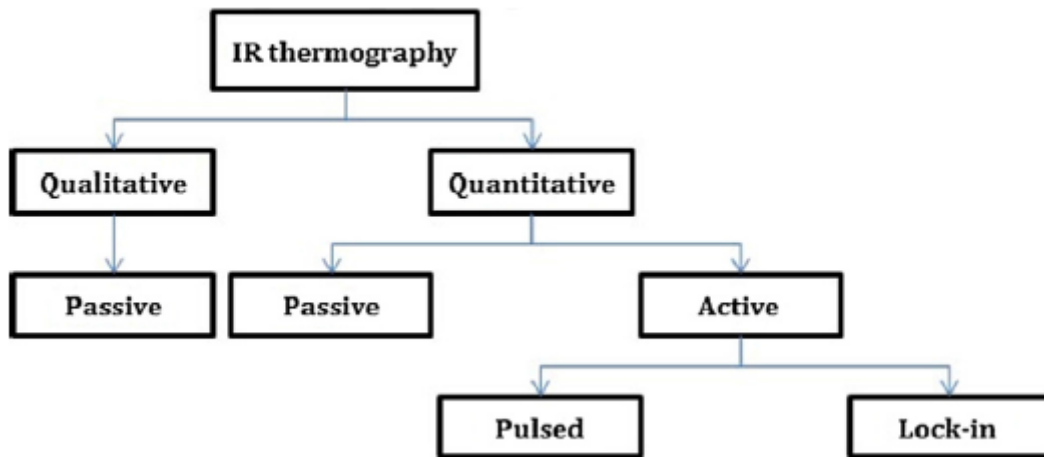


Figure 13 : Les approches de la thermographie (Source : (Kylili, et al. 2014))

## **II.11 Protocol thermographique : le contexte normatif international**

Soucieux de la fiabilité des résultats thermographiques, certains organismes internationaux ont élaboré des normes et des standards pour réglementer sa pratique. Ces règlements précisent un certain contexte pour l'application de la thermographie, les résultats admissibles par la norme/loi, ainsi qu'un certain protocole à suivre lors du contrôle<sup>77</sup>. Nous allons aborder deux normes dans cette partie, la norme américaine ASTM C 1060-90 et la norme européenne dans sa déclinaison française NF EN 13187. En Algérie la pratique de la thermographie n'a pas encore créé le besoin d'une telle norme.

### **II.11.1 ASTM C 1060-90(Usa)**<sup>78</sup>

L'ASTM C 1060-90 (ré approuvé en 1997) a été actualisé en 2011 par l'ASTM C 1060-11a, mais aucun document libre de droit n'a été trouvé, dans un but pédagogique nous nous attarderons sur la première car sa documentation est disponible.

Intitulée : « Standard de la pratique thermographique inspection des installations d'isolation des enveloppes des bâtiments », cette norme attribue à la thermographie la détection des défauts d'isolation mais reste silencieuse vis-à-vis des défauts générés par l'humidité et

<sup>77</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

<sup>78</sup> Woerner, Timothy. Exterior Building Envelope Inspections Using Thermal Infrared Imaging. PUBLIC BUILDING SERVICE REPORT, Fairfax: GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2006

l'infiltration de l'air. Elle reste stricte sur le contexte du contrôle puisqu'elle exige une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'au moins 10 °C (18°F) au moins 4 heures avant l'inspection, une vitesse de vent inférieure à 25 km/h (15mph) et un climat extérieur sec. Elle prescrit le report scrupuleux de la situation géographique du bâtiment, des photos qui illustrent les conditions climatiques, les orientations, le taux de couverture du ciel, les températures intérieures et extérieures, la vitesse du vent, la date et l'heure, une description du principe de construction bâtiment ainsi que les informations sur la caméra utilisée lors de l'inspection.

### **II.11.2 NF EN 13187 (Europe) :**

Intitulée : « Performance thermique des bâtiments. Détection qualitative des irrégularités thermiques sur les enveloppes de bâtiments. Méthode infrarouge », elle a été publiée en juillet mais reste toujours d'actualité et est reprise à l'étranger. Elle attribue à la thermographie la détection et la localisation des irrégularités thermique, les infiltrations d'air (sans les quantifier ni l'étanchéité) et les zones d'humidité. Elle exige une différence de température assez importante pour constater les irrégularités sans préciser de valeur précise, peu de variation de température (à cause du chauffage ou du rayonnement solaire) et une vitesse de vent inférieure à 10Km/h<sup>79</sup>. Elle précise un protocole plus ou moins détaillé qu'on abordera dans le chapitre 3 puisque nous suivrons les indications de cette norme. Elle demande de spécifier lors d'un examen, l'équipement utilisé et ses caractéristiques, les caractéristiques de l'enveloppe, les systèmes de chauffage, les structures et les isolants, les matériaux de surface, le climat et l'influence de l'environnement.<sup>80</sup>

### **II.11.3 Synthèse des normes :**

Les normes appliquées dans le contexte de la thermographie dégagent clairement l'importance des conditions du déroulement de l'examen et la documentation rigoureuse du climat et du statut du bâtiment. Les exigences en terme de condition climat sont quasiment les même ce qui accentue leur nécessité.

---

<sup>79</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

<sup>80</sup> C'est à partir de cette norme et de son interprétation par Dominique Pajani dans son livre « thermographie du bâtiment » chapitre 10, que nous interpréterons les résultats obtenus : à savoir une différence de 1°C est considérée comme pont thermique, des éléments avec une faible inertie plus chaud que ceux avec une forte inertie démontre une excroissance de température.

### **II.12 Les outils de la thermographie**<sup>81</sup>

De bons résultats thermographiques reposent sur la maîtrise des outils sur lesquels reposent leur création. De ce fait, il faut aborder les appareils nécessaires à la pratique de la thermographie.

#### **II.12.1 La caméra thermique :**

La caméra thermique ou « imageur radiométrique » est l'évolution du radiomètre puisqu'elle mêle mesure et image. C'est un capteur de rayonnement dont le calculateur interne calcule l'échelle des températures qu'elle superpose sur l'écran à l'image pour obtenir un thermogramme. Le type de caméra thermique change avec le changement de certaines caractéristiques très importantes, on distingue parmi elles :



Figure 14 Caméra thermique (Source : testo.fr)

##### **II.12.1.1 La bande spectrale :**

C'est la portion du spectre de la lumière que voit la caméra, pour une utilisation dans le bâtiment elle doit être comprise entre 8 et 12 $\mu$ m (longues ondes) qu'on appelle communément les 8-12.

##### **II.12.1.2 Résolution spatiale**

C'est un paramètre très important de la caméra puisqu'il influence directement le nombre de prise nécessaire lors d'un diagnostic. Elle regroupe deux facteurs, les champs de vision qui est l'angle de l'objectif (donné en degré ou en rad) et le nombre de détecteurs par exemple une caméra dite 140\*140 contient 140 détecteurs à l'horizontale et 140 à la verticale donc 19600 détecteurs, de ce fait le thermogramme obtenu avec cette caméra sera le résultat de 19600 points de températures.

##### **II.12.1.3 Fréquence d'image**

C'est le nombre d'image successif qu'on voit en temps réel sur la caméra, puisque l'objet visé en thermographie du bâtiment est statique, il n'est pas nécessaire d'avoir une grande fréquence néanmoins un minimum de 5 Hertz est prérequis pour voir immédiatement les effets de l'orientation de la caméra.

---

<sup>81</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

### II.12.1.4 La résolution thermique ou sensibilité thermique

Comme son nom l'indique c'est la sensibilité de détection de la caméra, le plus petit écart de température qu'elle détecte. Puisqu'en thermographie du bâtiment on a affaire à des petits écarts de température, ce facteur est éminemment important. Elle varie entre 0.02°C à 0.3 (sur une cible à 30 °C mais le maximum acceptable dans le bâtiment et de 0.10 °C.

### II.12.1.5 Ce que détecte la caméra thermique<sup>82</sup> :

- Les défauts ou absence d'isolation.

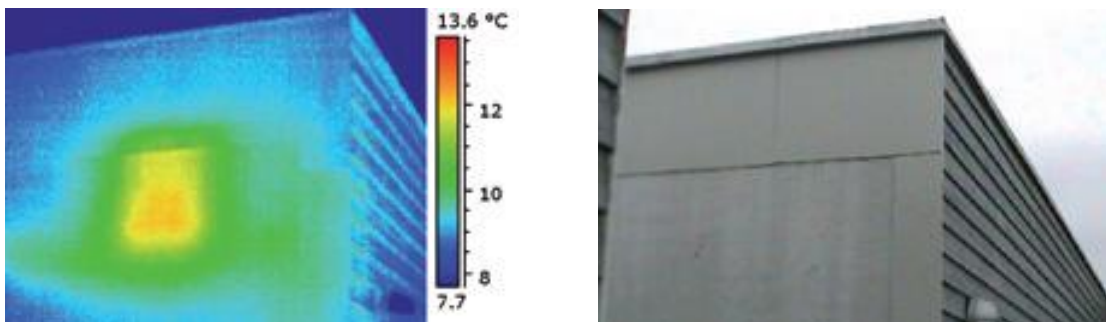


Figure 15 Thermogramme d'un bâtiment en béton armé où on voit clairement l'absence d'une portion d'isolation (Source : Flir.com)

- Infiltration d'air.

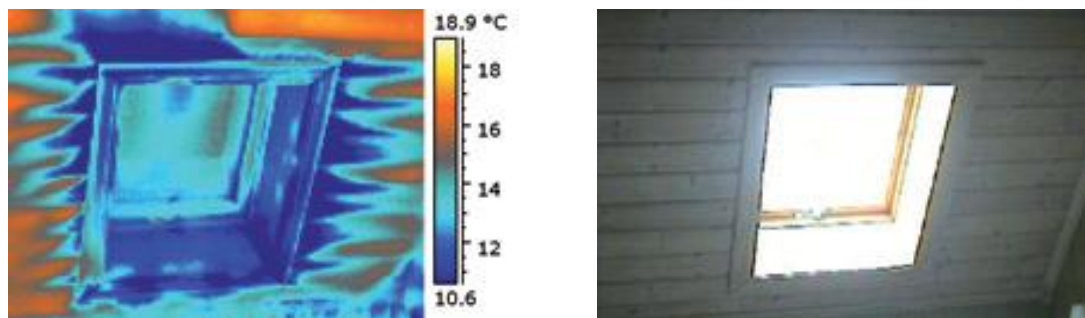


Figure 16 : Image thermique qui représente une infiltration de l'air à travers une fenêtre (Source : Flir.com)

- L'humidité.

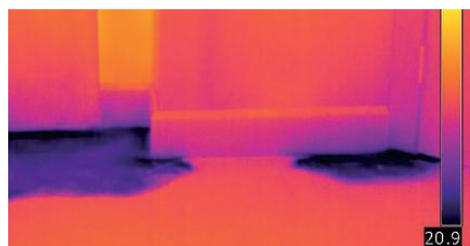


Figure 17: Thermogramme décelant un problème d'humidité (Source : Flir.com)

<sup>82</sup> FLIR. THERMAL IMAGING GUIDEBOOK FOR BUILDING AND RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS. s.d

- Les ponts thermiques.

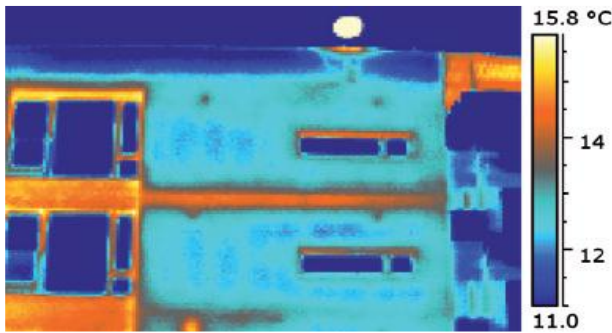


Figure 19 : Thermogramme de ponts thermiques à travers le plancher (Source : Flir.com)

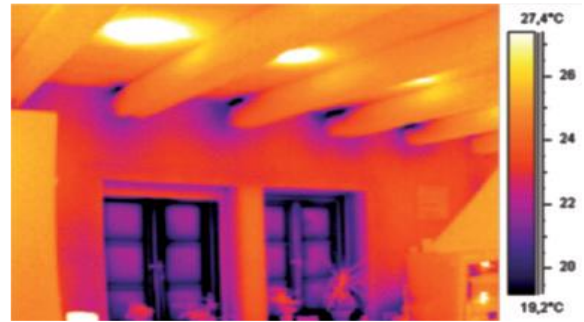


Figure 19 : Image thermique de ponts thermiques entre les poutres et le mur extérieur (Source : Flir.com)

**II.12.1.6 Possibilité de calcul <sup>83</sup>:**

L'imagerie thermique nous permet de calculer certaines grandeurs qui permettent de ressortir le bilan énergétique :

- Les déperditions radiatives :  $\Delta Déperdition = Déperdition1 - Déperdition2 = hr^{app} \cdot [T_{app2} - T_{app1}]$

Avec  $T_{app}$  : la température visible à l'écran et  $hr^{app} = 4 \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{T_{app2} + T_{app1}}{2} \right]^3$

**II.12.2 Logiciel de traitement thermographique**

Il est essentiel pour l'interprétation des photos après l'inspection et permet d'effectuer des changements a posteriori. Ce logiciel est parfois fourni par le constructeur de la caméra mais généralement la version fournie ne permet que de faire un rapport rapidement et non pas de traiter réellement l'image thermique.

<sup>83</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

## II.13 Exemples d'application

Thermographie du District Fédéral de Denver<sup>84</sup> :

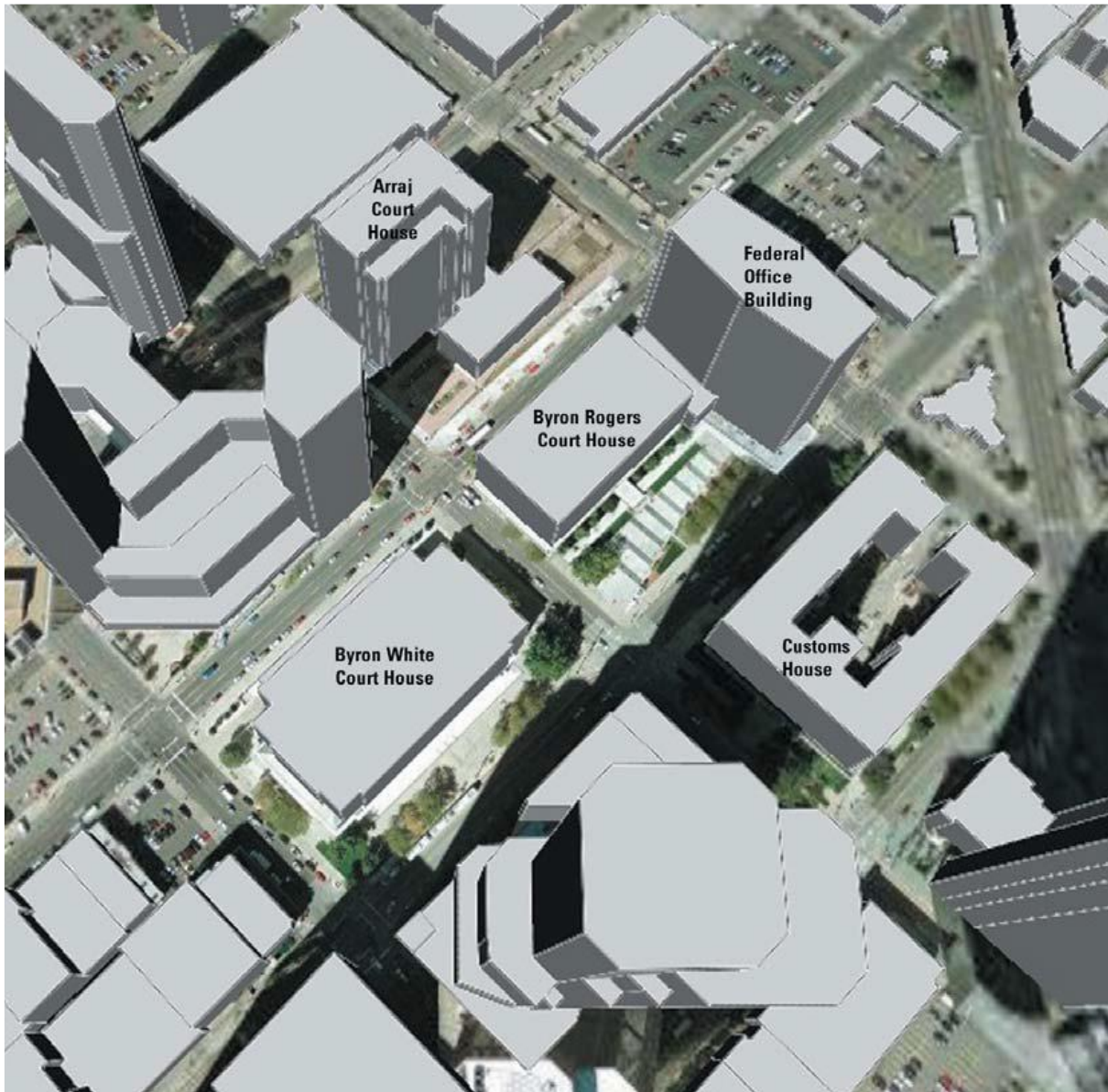


Figure 20 : Plan de situation de l'opération d'investigation (Source : (Woerner 2006))

L'investigation pilote s'est procédé à Denver, Colorado entre Mercredi 08 Mar et Mardi 14 Mars 2006. Le choix de cette période s'est fait sur le désir du personnel du GSA de terminer l'inspection en hiver.

Bâtiments inspectés :

Cinq (05) bâtiments ont été inspectés :

---

<sup>84</sup> Woerner, Timothy. Exterior Building Envelope Inspections Using Thermal Infrared Imaging. PUBLIC BUILDING SERVICE REPORT, Fairfax: GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2006

- Le tribunal fédéral Byron White.
- Le tribunal fédéral Byron Rogers.
- L'immeuble de bureau fédéral de Byron Rogers.
- Le tribunal fédéral Arraj.
- L'immeuble de bureau et d'habitation.

Inspection extérieur du tribunal fédéral Byron White :

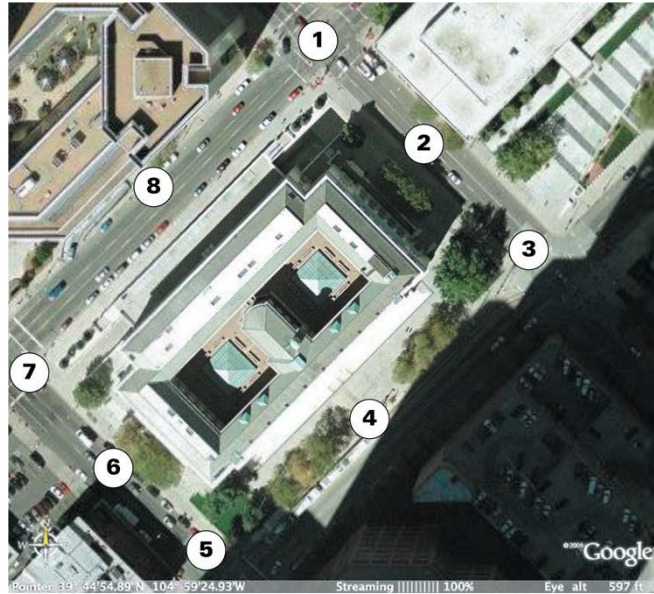


Figure 21 : plan d'intervention thermographique sur le tribunal fédéral Byron White et ordre d'exécution (Source : (Woerner 2006))

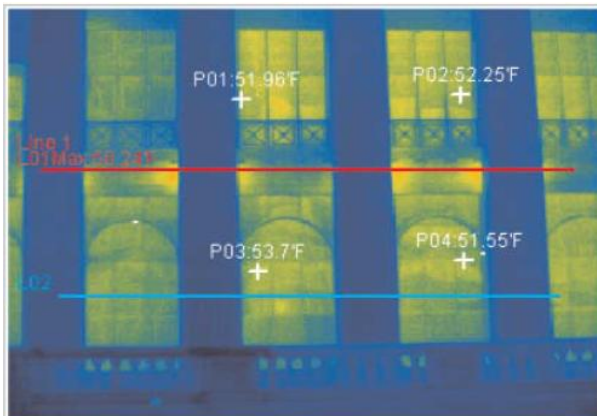
### **Brève description de l'édifice :**

Le bâtiment construit en 1916 comporte 5 étages pour un total d'environ 25000 m<sup>2</sup>. Son enveloppe est composée de brique rouge revêtue de l'extérieur de marbre alors que de l'intérieur cette dernière est dissimulée par du plâtre. La présence ou non d'isolation n'est pas documentée. Le rafraîchissement du bâtiment est assuré par des ventilateurs uniques et des centrales de traitement d'air pour les espaces spéciaux. Des chaudières assument le rôle de chauffage. Il est à noter aussi l'existence de système de rafraîchissement de l'eau grâce à l'air ambiant.



Figure 22 : Tribunal fédéral Byron White vu du point 1 (Source : (Woerner 2006))

**Point de vue 08 :**

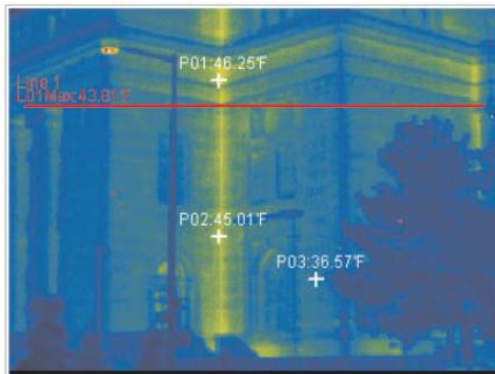


| IR Info      | Value        |
|--------------|--------------|
| Date         | 2006-3-9     |
| Time         | 15:43:34     |
| <b>Label</b> | <b>Value</b> |
| P01:Temp     | 51.96        |
| P01:ems      | 0.95         |
| P02:Temp     | 52.25        |
| P02:ems      | 0.95         |
| P03:Temp     | 53.7         |
| P03:ems      | 0.95         |
| P04:Temp     | 51.55        |
| P04:ems      | 0.95         |
| L01:Max      | 58.24        |
| L01:Min      | 36.89        |
| L01:Avg      | 46.91        |
| L02:Max      | 52.34        |
| L02:Min      | 36.09        |
| L02:Avg      | 45.53        |

Figure 23 Thermogramme du tribunal fédéral Byron White position 08 (Source : (Woerner 2006))

La Figure 23 montre des températures relativement élevées des murs extérieurs (+/- 58°F (14,4°C) dans quelques endroits) alors que les colonnes restent bien en dessous des 40°F (4,4°C), cela peut suggérer une perte de chaleur considérable à travers les murs et les fenêtres du bâtiment (une différence de 10°C).

**Point de vue 07.**



| IR Info      | Value        |
|--------------|--------------|
| Date         | 2006-3-10    |
| Time         | 7:55:13      |
| <b>Label</b> | <b>Value</b> |
| P01:Temp     | 46.25        |
| P01:ems      | 0.95         |
| P02:Temp     | 45.01        |
| P02:ems      | 0.95         |
| P03:Temp     | 36.57        |
| P03:ems      | 0.95         |
| L01:Max      | 43.81        |
| L01:Min      | 28.46        |
| L01:Avg      | 38.11        |

Figure 24 Thermogramme du tribunal fédéral Byron White position 08 (Source : (Woerner 2006))

On peut apercevoir au coin de l'immeuble dans la Figure 24, dans ce cas (et dans les conditions climatique donnée) cette température est de 46 °F (7,7 °C) alors que la température ambiante est de 32°F (0°C) et le reste des murs sont aux environs de 36°F (2,2°C) soit une différence de 5,5 °C.

**Observation :**

L'enveloppe extérieure du tribunal montre un schéma typique constitutif d'une absence d'isolation, une certaine infiltration d'air et une très grande perte de chaleur à travers les fenêtres et les murs extérieurs.

### **II.14 Conclusion :**

A travers ce chapitre nous avons abordé la définition de la thermographie, son historique ses principes et ses différents domaines d'application. Ainsi nous avons vu que la thermographie appliquée au bâtiment est une technique de diagnostic basée sur le principe physique de rayonnement qui permet de vérifier l'intégrité thermique de l'enveloppe d'un bâtiment. Elle connaît différents usages et approches mais ils doivent tous se dérouler dans des conditions climatiques précises pour garantir la véracité des résultats. De plus nous avons traité des outils nécessaires à son application à savoir la caméra thermique : ses caractéristiques et ce qu'elle permet de déceler. Enfin nous avons conclu sur un exemple de diagnostic thermographique afin de nous préparer pour le prochain chapitre qui traitera de l'application de la thermographie sur le cas d'étude.

## **Chapitre III: Application sur le cas d'étude**

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

Ce chapitre se veut être l'application des connaissances acquises lors de la première partie du mémoire au service de la problématique de recherche. Il s'agit d'effectuer un diagnostic thermographique sur un bâtiment conçu selon le DTR C3-2, pour en évaluer l'efficacité. Ainsi nous procéderons par la présentation du cas d'étude qui est le projet pilote réalisé par le consortium CNERIB et CDER puis nous présenterons le protocole thermographique proposé par la NF EN 13187. Enfin on s'attardera sur le déroulement du diagnostic in situ avec une description des outils utilisés, le contexte climatique la méthodologie de prise de photos. Nous terminerons sur le traitement des photos dans le but de les préparer à l'interprétation.

### **III.2 Présentation du cas d'étude et du contexte de sa réalisation :**

En 2005, dans le cadre du projet MEDA MED ENEC (**E**nergy efficiency in the construction sector in the **M**editerranean) un appel d'offre<sup>85</sup> a été lancé pour la réalisation projets pilotes sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment. En effet cet organisme européen encourage l'efficacité énergétique et l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur de la construction et qui est destiné à l'ensemble des 10 pays de la méditerranée<sup>86</sup>. Son approche vise la réduction des besoins en ressources énergétiques polluantes, dite fossiles et leur répercussion grandissante sur l'environnement, pour les usages de chauffage et de climatisation.

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) en partenariat avec le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) ont soumis une proposition de projet pour la réalisation d'un habitat de type rural (par sa taille et style architectural) à haute efficacité énergétique. Le passage d'un logement énergivore à logement plus sobre énergétiquement s'est fait grâce l'usage de préceptes bioclimatiques et l'introduction des énergies renouvelables. On retrouve parmi ces mesures<sup>87</sup> :

- La mise en place d'un système qui permet à la fois le chauffage par le plancher et la fourniture d'eau chaude sanitaire. Il s'agit de faire circuler l'eau chauffée grâce aux capteurs

---

<sup>85</sup> IMESSAD, Khaled. «Efficience énergétique dans le secteur du bâtiment en méditerranée.» *Bulletin des Energies Renouvelables*, Juin 2007 : 11.

<sup>86</sup> Dix pays : Algérie, Égypte, Israël, Jordanie, Liban, Maroc, Palestine, Syrie, Tunisie, Turquie.

<sup>87</sup> CHENAK, A., K. IMESSAD, F. MOKHTARI, et S. LARBIYOUCEF. «Projet Med-Enec : Efficience énergétique et intégration des énergies renouvelables dans le secteur du bâtiment dans la région de la Méditerranée.» *Bulletin des énergies renouvelables*, Décembre 2008: 11-12.

solaire dans le plancher qui à l'aide de son inertie permet de stocker la chaleur et de l'émettre lors d'une baisse de température.

- Utilisation d'un matériau local pour la construction des murs : la brique de terre stabilisé, pour ses propriétés thermiques, structurelles (au vue de la taille du projet : maison en plein pied) ainsi que la disponibilité locale de la matière première.

- Isolation globale de l'enveloppe (murs extérieurs et planchers) pour limiter les déperditions en hiver et les gains de chaleur en été.

- L'amélioration de la performance thermique et phonique des ouvrants avec l'utilisation de fenêtres à double vitrage.

- La climatisation passive du logement à travers la ventilation naturelle, la protection horizontale, l'ombrage, et la grande inertie thermique des parois et du plancher haut.

- Installation de brasseurs d'air dans chaque pièce principale pour améliorer le confort thermique lorsque la ventilation naturelle n'est pas suffisante.

- Maximisation de l'éclairage naturel et l'installation d'équipements et appareil électriques à basse consommation.

Inauguré en juin 2009, ce projet avait l'ambition d'être le premier dans un programme de 450000 maisons rurales sur toute la campagne algérienne, qui n'ont malheureusement pas encore été réalisées.<sup>88</sup>

### **III.3 Description technique de la maison**

Le projet pilote est une petite maison de type rural de plein pied dont la surface nette est de 65m<sup>2</sup> pour une surface brute de 90m<sup>2</sup><sup>89</sup>. Elle a été conçue en respect des DTR C3-2 et C3-4<sup>90</sup>. Elle est située à Souidania (dans l'enceinte du CNERIB), à l'ouest de la capitale donc à une latitude 36.7N pour une longitude de 3.2E. Isolée entièrement et utilisant l'énergie solaire pour le chauffage (par le plancher) et l'adduction en eau chaude, elle est équipée de quatre (04) capteurs solaire, une surface totale de 8m<sup>2</sup>. La maison possède un séjour comportant une

---

<sup>88</sup> MED ENEC. *Pilot project Algeria*. s.d. <http://www.med-enec.com/building-projects/pilot-projects/algeria/pilot-project-algeria> (accès le Aout 02, 2015).

<sup>89</sup> Derradji, L. , F. Boudali Errebai, M. Amara, Y. Maoudj, K. Imessad, et F. Mokhtari. «Etude expérimentale du comportement thermique d'une maison prototype en période d'été.» *Revue des Energies Renouvelables* 16, n° 4 (2013): 709 – 719.

<sup>90</sup> Imessad, K., L. Derradji, N. Ait Messaoudene, F. Mokhtari, A. Chenak, et R. Kharchi. «Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential.» Édité par Sayigh A.A.M. *Renewable energy: An international journal*, 2014: 589-597.

fenêtre orientée sud et une porte fenêtre orientée est ; 02 chambres, une grande positionnée au sud-ouest et s'ouvrant à travers une fenêtre vers le sud, l'autre plus petite est positionnée du côté nord-ouest s'ouvre par une fenêtre sur le nord (ainsi le mur orienté ouest est aveugle pour prévenir les surchauffes). Elle contient également une cuisine ouverte sur l'est, et enfin une salle d'eau et des sanitaires orientés vers le nord. La toiture en pente sort en sailli de 75 centimètre du coté est pour servir de protection en été. Toutes les fenêtres sont en double vitrages 4-6-4 (cadre en pvc) pourvues d'un coefficient de transfert de chaleur  $2.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ . Le rafraichissement passif se fait grâce à l'inertie des murs et de la toiture et la ventilation naturelle. Le matériau utilisé pour la construction est la brique de terre stabilisée (5% de ciment). La technique d'isolation de la maison est l'isolation en sandwich avec des plaques de polystyrène expansé.



Figure 25 : Situation du projet pilote dans l'enceinte du CNERIB (Source : Google map)

|               | Composition         | Epaisseur (m) | Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W/m} \cdot \text{°K}$ ) | Transmission thermique U ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{°K}$ ) |
|---------------|---------------------|---------------|---|---|
| Murs          | BTS                 | 0.14          | 1.3   | 0.38  |
|               | Polystyrène         | 0.09          | 0.040   |   |
|               | BTS                 | 0.29          | 1.3   |   |
| Plancher bas  | Béton lourd         | 0.05          | 1.75  | 0.54  |
|               | Polystyrène expansé | 0.06          | 0.040   |   |
|               | Béton lourd         | 0.15          | 1.75  |   |
|               | Mortier + sable     | 0.03          | 1.15  |   |
|               | Carrelage           | 0.02          | 1.7   |   |
| Plancher haut | Mortier             | 0.03          | 1.60  | 0.23  |
|               | Polystyrène expansé | 0.16          | 0.040   |   |
|               | Béton lourd         | 0.08          | 1.75  |   |
|               | Voutain en plâtre   | 0.04          | 0.35  |   |

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des différentes parois du projet. Source : (Chenak, et al. 2008)

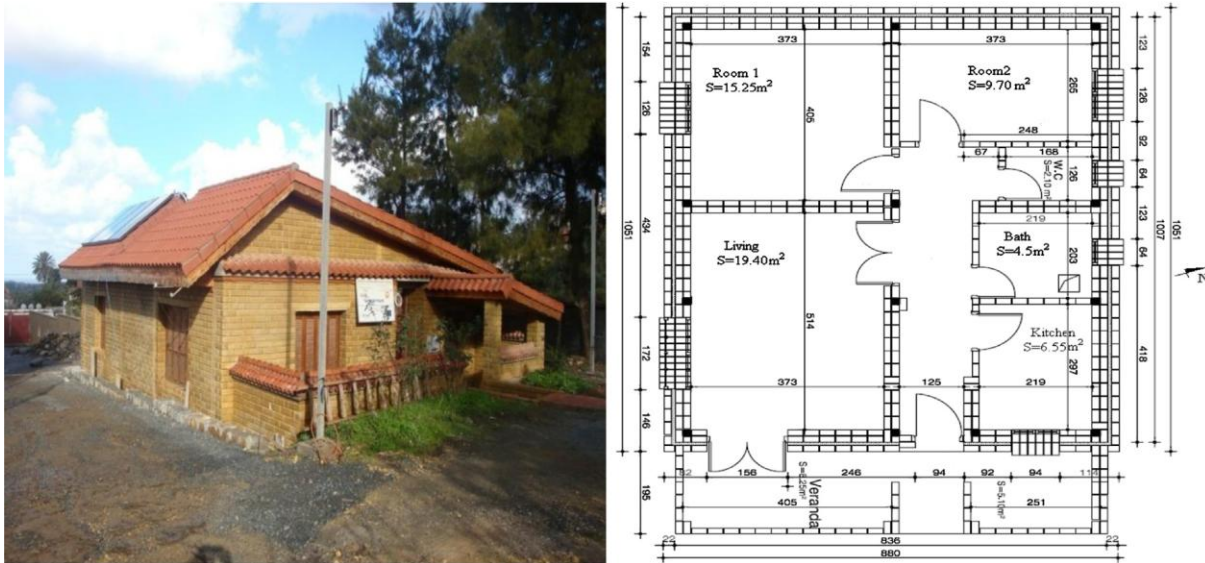


Figure 28 : Le projet pilote du consortium CDER/CNERIB : photo à gauche et plan à droite. Source : (Imessad, et al. 2014)

Selon le site officiel<sup>91</sup> MED ENEC, ce projet ainsi que projets avec la même prestation énergétique coutait (entre 2005 et 2009) 57.417 euros (soit 6.852.453 Da)<sup>92</sup> ce qui représente un surcoût par rapport aux maisons conventionnelles du même type de 17917 euros (2.138.311Da) comme on peut la voir dans la Figure 27. Mais le retour sur investissement peut se faire sur 9ans et demi grâce aux gains d'énergie (la maison consommerait 56% en moins d'énergie, voir Figure 26).

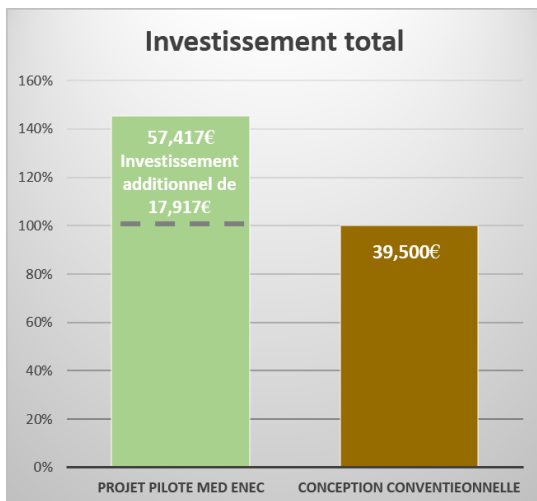


Figure 27 : Comparaison entre le cout d'une maison conventionnelle et le projet pilote. Source : (MED ENEC s.d.).

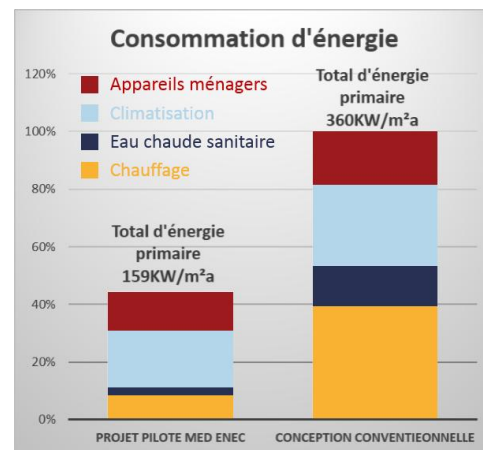


Figure 26 : Comparaison entre la consommation énergétique d'une maison conventionnelle et le projet pilote. Source : (MED ENEC s.d.).

Plusieurs études ont été réalisées ayant pour objet la maison prototype comme le travail de (Derradji, et al. 2013) sur le comportement thermique en été ou il s'est avéré que le projet

<sup>91</sup>MED ENEC. *Pilot project Algeria*. s.d. <http://www.med-enec.com/building-projects/pilot-projects/algeria/pilot-project-algeria> (accès le Aout 02, 2015).

<sup>92</sup> Calcul effectué selon le cours officiel de l'euro dans la période d'Aout 2015

offrait en été une ambiance confortable sans avoir recours à la climatisation. Ou le travail de (Sami-Mecheria, Semmar et Hamid 2015) qui conclue sensiblement la même chose sur le confort d'été par contre le confort d'hiver n'est pas atteint dans les semaines les plus froides ou il fait entre 10 et 16 °C en intérieur. Malgré ces précédentes recherches le choix de notre cas d'étude s'est porté sur le projet pilote car il est l'un des rare bâtiment connu à avoir été conçu suivant la réglementation thermique et que le but de ce travail de recherche et de confronter ce règlement à la réalité. De plus aucun des travaux précédents n'a utilisé de la thermographie pour atteindre leurs résultats et il est intéressant de voir ce que cela donne.

### **III.4 Méthodologie expérimentale :**

Le protocole qui va être présenté est extrait du livre de Dominique Pajani<sup>93</sup> : « Thermographie du bâtiment » qui suit les exigences de la norme française NF EN 13187. Ainsi nous aborderons dans la partie qui suit la question des conditions intérieures et extérieures.

#### **III.4.1 Paramètres intérieurs :**

Les paramètres intérieurs sont très importants lors d'un examen thermographique cependant ils sont difficilement maîtrisables. En effet beaucoup de facteurs liés à l'ambiance intérieure d'un bâtiment peuvent influencer les résultats du diagnostic, la puissance du chauffage par pièce ainsi que sa nature, l'occupation de la pièce : les meubles les équipements électroniques susceptibles de dégager de la chaleur, le mode d'aération ou encore l'inertie de la structure.

Ainsi pour la thermographie d'hiver il est nécessaire que le chauffage soit fonctionnel depuis au moins deux semaines, pour que la température intérieure soit uniforme. Si l'inspection doit se dérouler dans un local qui n'est pas chauffé il est préférable que ce dernier ne soit fonctionnel au moins quelques heures avant la prise de mesures.

#### **III.4.2 Paramètres extérieurs**

Il est essentiel que la période d'inspection se déroule en dehors d'une période de croissance de température extérieure ce qui peut entraîner des erreurs lors de l'interprétation des données comme le phénomène de la « toiture chaude ».

**La température extérieure :** La température étant de deux natures la température ambiante extérieure et la température extérieure radiative (puissance émise par les rayons directs du soleil), il faut les prendre toutes les deux en charge.

---

<sup>93</sup> PAJANI, Dominique. La thermographie du bâtiment. 1ère. Paris : Eyrolles, 2012

Les variations de la température ambiante peuvent être éliminées pour ne plus poser de problème par le calibrage et la classification des déperditions, quant à la température extérieure radiative, cette dernière peut être gérée grâce à la météo : le préférable dans la thermographie est une inspection par ciel dégagé et en l'absence de soleil cette configuration ne peut être atteinte qu'en période nocturne à défaut une inspection par ciel couvert et une température extérieure uniforme favorise les calculs.

En général les protocoles européens préconisent une température inférieure à +10°C pour la thermographie hivernale.

La vitesse du vent doit être inférieure à 10Km/h au sol pour éviter la convection des parois.

Il ne devrait pas y avoir de brouillard ni de précipitation dans la journée qui précède le diagnostic. Les journées enneigées ou dont les phénomènes de rosée ou de givre sont accentués doivent être évitées, quant au taux d'humidité, il a peu d'intérêt dans la thermographie et donc son influence est faible.

Le créneau horaire d'intervention est un sujet qui n'est pas règlementé et change selon les thermographes car toutes les réponses sont principe possibles.

### **III.5 Les outils de l'intervention :**

#### **III.5.1 Caméra thermique :**

Lors de la prise de mesure, on doit constamment garder en tête les caractéristiques de notre outil de travail : la résolution et l'angle de la focale. Cette donnée rentre en jeu dans le nombre de photo à prendre pour une seule paroi. Plusieurs paramètres doivent être configurés, l'émissivité des matériaux (traitée dans le chapitre 02) la température ambiante extérieure qui n'a pas une très grande influence sur le résultat mais qui doit forcément être uniforme. Selon le modèle de la caméra et sa performance d'autres paramètres peuvent rentrer en compte comme l'humidité, le calibre etc.

La palette utilisée (l'échelle de couleurs des thermogrammes) doit être adaptée à l'inspection : noir et blanc (noir froid, blanc chaud) permet de voir les détails, Arc en ciel et palette de fer accentuent les différences de températures... etc.

#### **III.5.2 Appareil photo**

Dans les rapports d'examen chaque thermogramme est accompagné par une photo. Afin de prendre ces images réelles de parois auscultées, on doit se munir d'un appareil photo bien

chargé et avoir assez d'espace pour contenir toutes les photos de l'inspection. Sa résolution doit être au minimum de 2 Mégapixel avec de préférence un zoom optique pour les prises extérieures.

### III.6 Le déroulement de l'inspection

#### III.6.1 Conditions climatiques et intérieures

Le diagnostic thermographique s'est déroulé du 19 Mai 2015 entre 10h et 11h. Ce matin-là, il faisait 22 °C, le ciel était couvert et la vitesse du vent était de 13km/h. A l'intérieur de la maison le chauffage n'était pas en marche et donc n'a pas d'influence sur les résultats. A l'intérieur il faisait 22 °C.



Figure 29 : Météo du jour d'examen thermographique Source : google météo

### III.6.2 Les moyens utilisés

#### III.6.2.1 Caméra thermique : Flir i7<sup>94</sup>

La caméra utilisée lors de l'inspection thermographique est une caméra compacte de type FLIR i7, conçue pour être utilisée par les novices et les profanes, elle est très simple et intuitive à l'utilisation. Elle produit instantanément des thermogrammes sous format image (Extension JPEG) comportant toutes les données de températures nécessaires ainsi que les paramètres de prise de vue (émissivité, température d'environnement radiatif... etc.), ils peuvent être enregistrés en interne ou en externe puis envoyés vers un ordinateur via câble USB. Dotée d'une exactitude de  $\pm 2\%$ , et d'une sensibilité thermique de  $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (le minimum acceptable pour la thermographie du bâtiment), elle permet de mesurer des températures allant jusqu'à  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ce qui est largement suffisant dans le bâtiment. Son objectif qui peut être préservé grâce à son cache, ne nécessite aucun ajustement. Petite et légère, elle pèse à peine  $365\text{g}$ , elle est facilement manipulable et se prête très bien à cette application.



Figure 30 : Flir i7  
Source : Flir.fr

#### **Le paramétrage de la caméra :**

La caméra étant conçue pour les débutants, elle ne permet de paramétrer que le facteur d'émissivité qui a été mis à 1, et la température de l'environnement radiatif qui a été mis à  $20^{\circ}\text{C}$  comme cela se fait par défaut puisqu'il est possible de le changer à posteriori.

Palette de couleur : Arc en ciel.

| <b>FLIR i7</b>   |
|--|
| Nombre de détecteurs : $140 \times 140$ pixels         |
| Champ de vision : $29^{\circ} \times 29^{\circ}$ (H×V) |
| Sensibilité thermique (NETD): $0.10^{\circ}\text{C}$   |

Tableau 2 : Caractéristiques de la FLIR i7 Source : FLIR.fr

<sup>94</sup> FLIR. FLIR i7. s.d. <http://www.flir.fr/instruments/display/?id=65813> (accès le Avril 2015).

**III.6.2.2 Appareil photo : Sony Cyber-shot DSC-W730 :**

L'appareil photo utilisé pour prendre les photos réelles est un appareil compact de type Sony Cyber-shot DSC-W730, d'une résolution de 16 mégapixels, doté d'un zoom optique grand angle de X8.

|                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| Nombre de pixels | <b>16,1 Millions pixels</b> |
| Zoom optique     | <b>8</b>                    |
| Taille écran     | <b>2,7 "</b>                |
| Poids net        | <b>114</b>                  |

Tableau 3 : Caractéristiques du Sony DSC-W730. Source : Sony.fr

**Le logiciel de traitement de photos : Flir Tools version 5.1.15036.1001<sup>95</sup>**

FLIR Tools est une puissante solution logicielle gratuite qui aide à présenter avec efficacité les résultats issus des diagnostics thermographiques.

Il permet d'importer, d'éditer et d'analyser rapidement des images, et de les intégrer à des rapports d'inspection PDF professionnels, prêts à être imprimés.

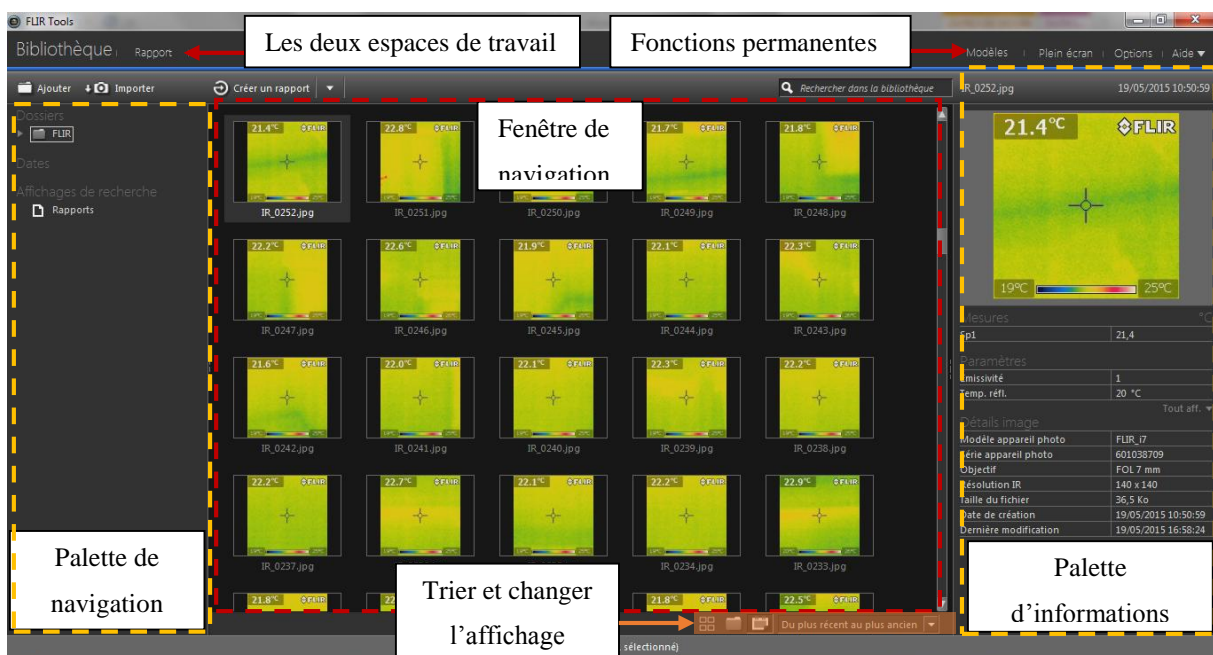


Figure 31 : Interface de FLIR Tools, onglet Bibliothèque. Source : Auteur

Ce qui suit est une série de capture d'écran effectué par l'auteur.

L'interface du logiciel a un cachet simple et intuitif, en haut on ne retrouve pas la conventionnelle barre de menus mais plutôt deux onglets : « Bibliothèque » et « Rapport » qui représentent les deux principales fonction du logiciel à savoir le traitement des images et

<sup>95</sup> Disponible au téléchargement gratuit à : <http://www.flir.com/instruments/display/?id=54865>

l'élaboration des rapports et dont chacun dispose d'un espace de travail propre à lui. Sur la Figure 31 on est dans l'onglet « Bibliothèque » (position repérable grâce à la taille de la police, qui est plus grande pour l'onglet actif).

En haut à droite on retrouve aussi le bouton « Modèle » qui propose des modèles de traitement et de rapports thermographiques, « Plein écran » qui permet de mettre la fenêtre du logiciel en plein écran, « Options » permet d'accéder aux paramètres du logiciel et « Aide » propose des explications et certaines solutions aux problèmes que peuvent rencontrer les nouveaux utilisateurs. Ces quatre boutons restent toujours accessibles qu'on soit dans « Bibliothèque » ou « Rapport ».

Le volet bibliothèque a pour but le visionnage et le traitement des images thermiques pour cela il dispose d'une palette à gauche qui permet de naviguer entre les images par dossier (noms donnés aux dossiers contenant les images thermiques sur le disque dur) ou par date de prise de photo. La barre d'outils spécifique à cet onglet contient des boutons qui servent son objectif : « Ajouter » permet d'ajouter des photos directement du disque dur ou d'un disque amovible, « Importer » quant à lui ajoute des photos directement de la caméra thermique qui doit être bien sûr reliée à l'ordinateur par un câble approprié. « Créer un rapport » est un raccourci pour ajouter un rapport contenant l'image sélectionnée dans la fenêtre de navigation centrale. Cette fenêtre permet de trier les images selon différents critères (du plus récent au plus ancien, du plus ancien au plus récent, ordre alphabétique...etc.) on peut aussi changer l'affichage des aperçus des images grâce aux deux petites icônes en bas à droite.

Enfin, la palette de droite propose un aperçu de l'image avec un résumé des informations qui lui sont liées, son nom, la date et paramètres de prise de photo, l'appareil utilisé ses caractéristiques ainsi que la date de la dernière modification.

Le traitement des thermogrammes se fait image par image en double cliquant sur celle désirée dans la fenêtre de navigation. Cela induit l'ouverture de la fenêtre d'édition qui à notre sens contient les fonctionnalités les plus importantes de ce logiciel :

-Il permet d'ajuster la plage de couleur, changer la palette, modifier l'échelle de températures en fixant un seuil minimal et un seuil maximal ainsi que modifier des paramètres de prise de photo tel que l'émissivité, la température réfléchie, la distance... etc. (Figure 32).

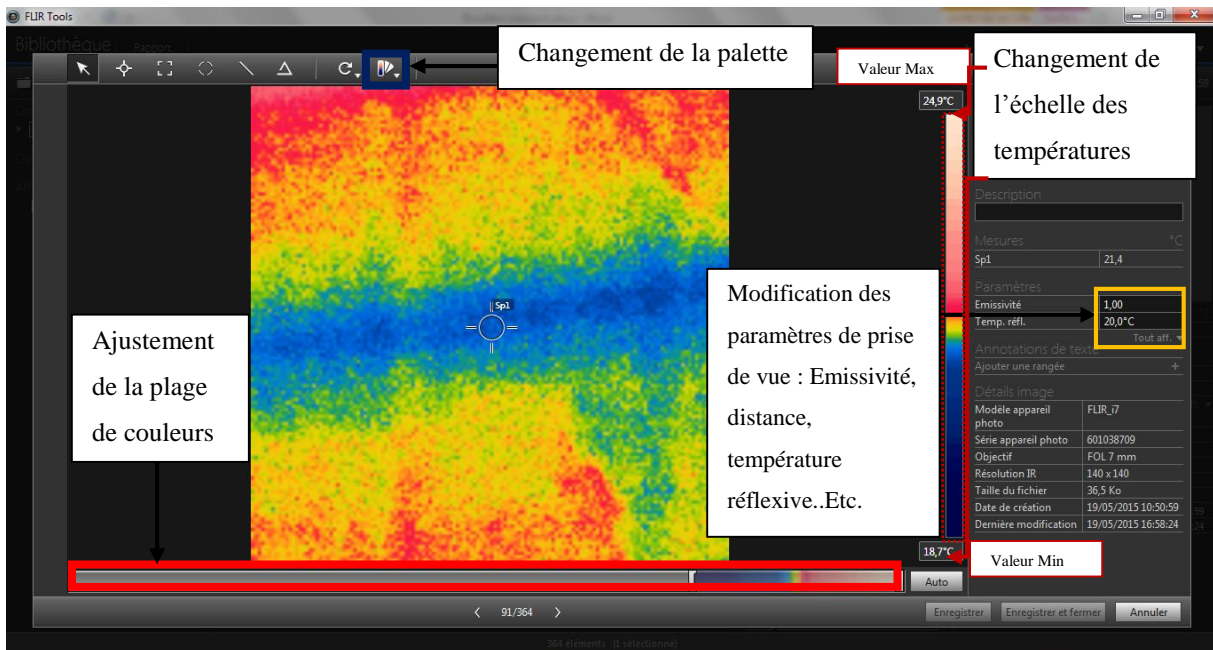


Figure 32 : les modifications possibles sur le niveau de couleurs, les palettes et les paramètres de prise de vue. Source : Auteur

Modifier le thermogramme en rajoutant des outils de mesure : points, zones rectangulaires, zones, lignes et Delta T, pour mieux l'interpréter et déceler les problèmes.

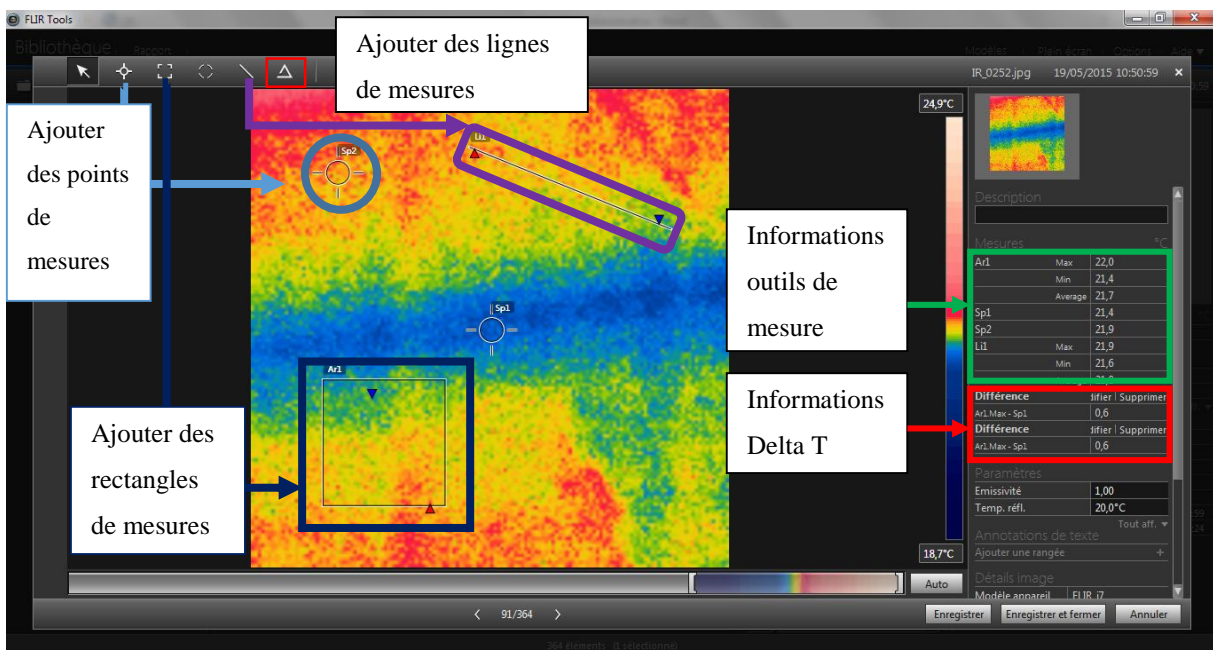


Figure 33 : Ajouts d'outils de mesure que le classique point de mire. Source : Auteur.

L'autre espace de travail dédié au rapport ressemble à une fenêtre de traitement de texte en proposant dans sa barre d'outils d'ajouter des zones de texte des grilles et des marqueurs. Il permet de créer des rapports faisant appel à n'importe quelle image ajoutée dans la bibliothèque. Cette fonction est dirigée vers les professionnels qui doivent rendre des rapports thermographiques à leurs clients

### III.6.3 Inspection extérieure :

L'inspection extérieure fut la première étape pour éviter que les rayons du soleil viennent fausser les thermogrammes dans le cas où le ciel s'éclaircisse. Ainsi on a procédé selon le sens d'une aiguille d'une montre (pour ne pas se tromper lors du tri des thermogrammes) et pris la photo et l'image thermique de la façade est puis la façade sud (voir Figure 34). Les façades étaient assez dégagées afin de ne prendre qu'un seul thermogramme pour chacune d'entre elles. Les façades ouest et nord était impossibles à photographier car trop proches de murs.

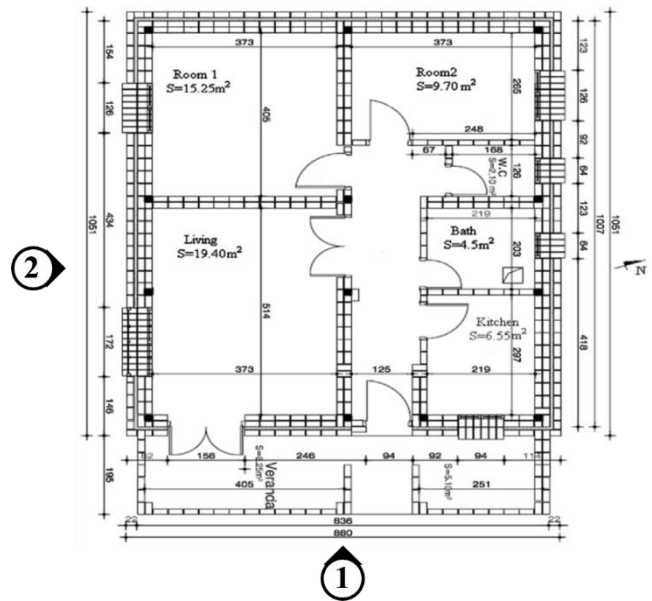


Figure 34 : Ordre des prises de thermogrammes extérieures.  
Source : Auteur.

### III.6.4 Inspection intérieure

Pour l'inspection intérieure, le même modus operandi a été suivi, prise de photos et de thermogramme (des parois en contact avec l'extérieur susceptible de déperditions) selon le sens des aiguilles d'une montre. Ainsi on a commencé par la façade orientée est du séjour puis celle orientée sud et ainsi de suite (voir Figure 35). Le problème qui s'est posé à l'intérieur fut que l'angle de champs de vision de la caméra thermique combiné avec la largeur ou profondeur des pièces (selon la prise de vue) a fait que seul une portion de la paroi et non pas sa totalité. Il a fallu dans la plus part des cas prendre 6 voire 9 thermogrammes par façade (le problème ne s'est pas posé avec l'appareil puisque c'est un grand angle). Les figures 36, 37 et 38 illustrent ce problème :

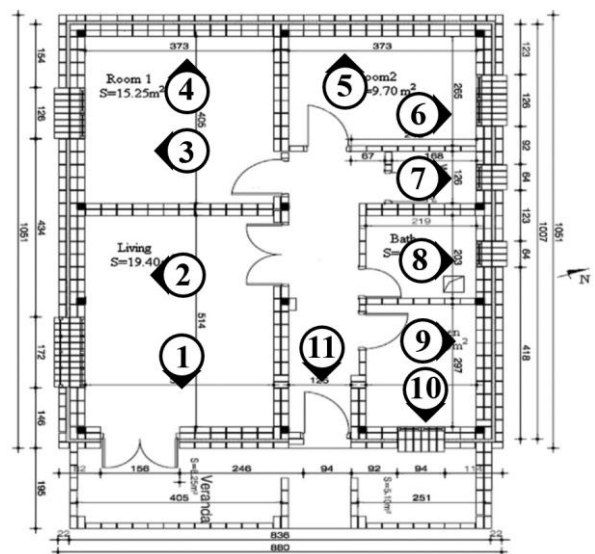


Figure 35 : Ordre de prise de thermogrammes intérieurs.  
Source : Auteur.



Figure 37 : Photo de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur.



Figure 36 : Suite de prise des images thermiques de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur.

Alors que l'appareil photo a pris la paroi en entier (Figure 37) la caméra thermique n'a pris qu'un pan du mur, il a fallu prendre plusieurs photos successives suivant la suite de la Figure 36 pour prendre les thermogrammes de l'ensemble de la paroi. La Figure 38 représente un montage des thermogrammes de cette façade à titre explicatif.

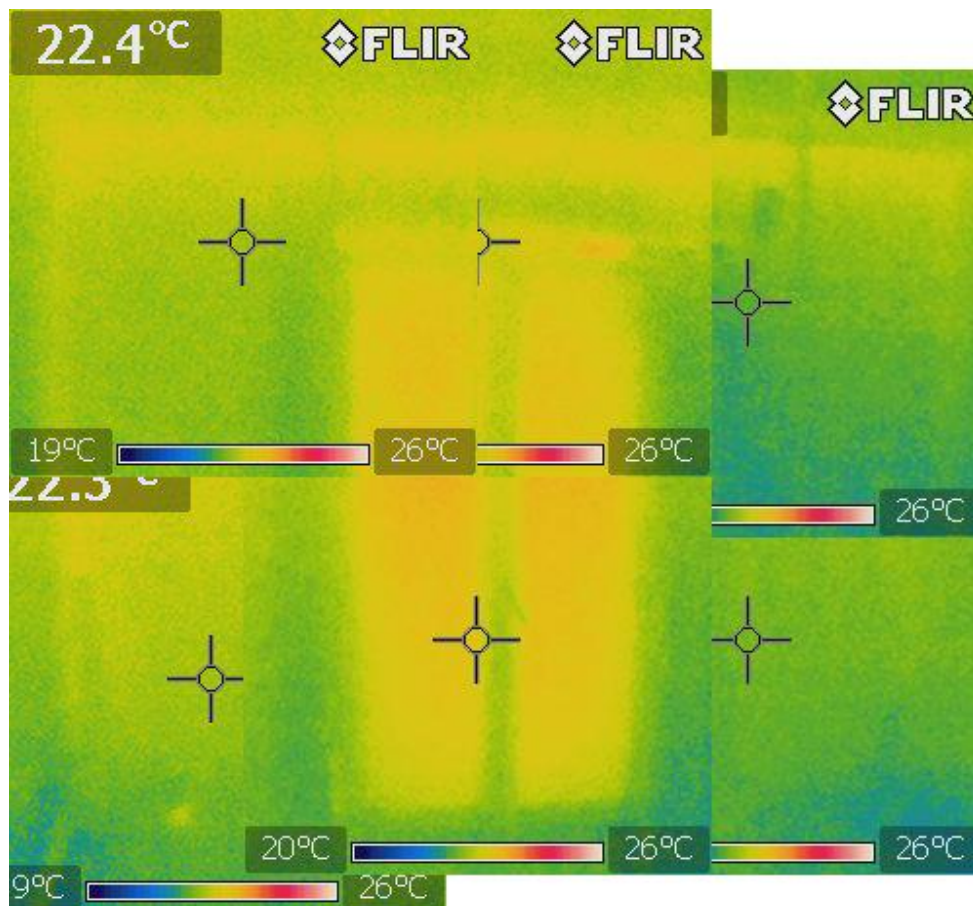


Figure 38 : Montage photo a titre explicatif des différents thermogramme de la façade orientée est du séjour. Source : Auteur.

### III.6.5 Traitement des images :

Après l'inspection et pour préparer la phase d'interprétation des thermogrammes un passage dans le logiciel FLIR Tools est nécessaire pour accentuer les différences de température et

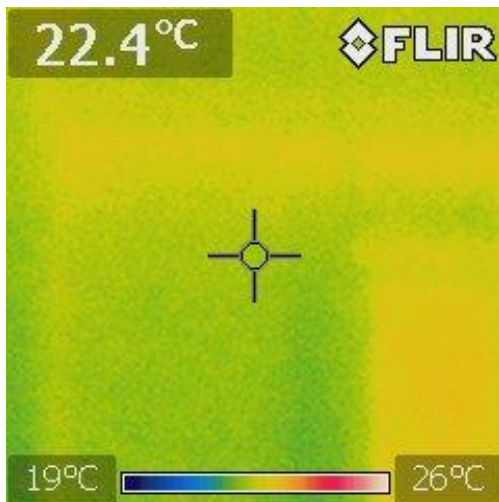


Figure 39 : Thermogramme d'une partie de la façade est du séjour avant traitement avec FLIR Tools. Source : Auteur.

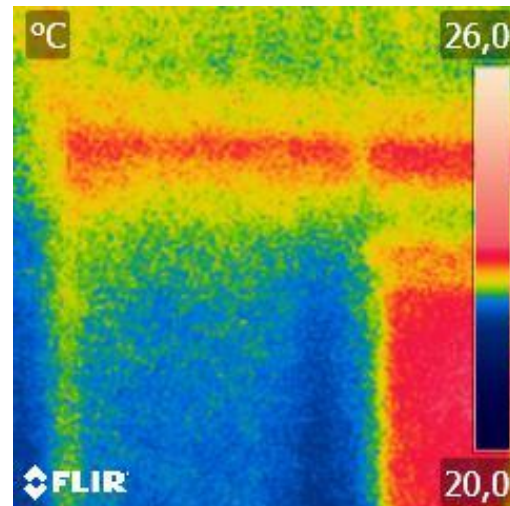


Figure 40 Thermogramme d'une partie de la façade est du séjour après traitement avec FLIR Tools. Source : Auteur.

avoir des mesures précises de chaque point de l'image thermique. La figure 39 et 40 représentent un pan de la paroi orientée est du séjour avant traitement et après traitement.

### III.7 Conclusion :

Après avoir pris connaissance du cas d'étude, son contexte de réalisation, les mesures qui ont été prises pour assurer son efficacité énergétique, des techniques et matériaux utilisées pour sa réalisation, Nous avons procédé à un diagnostic thermographique au moyen d'une caméra thermique. Ce dernier s'est déroulé suivant le protocole dicté par la norme française bien qu'il s'est réalisé en mai et non en mars au plus tard. Les thermogrammes issus de cet examen ont été triés et traités par le logiciel FLIR Tools afin de les préparer pour l'interprétation des données qui va suivre dans le prochain chapitre.

## Chapitre IV: Discussion des résultats :

### IV.1 Introduction :

Nous allons aborder à travers ce chapitre l'interprétation des images thermiques et traitées lors du chapitre précédent. Cette interprétation se fera sur la base du chapitre 10 : « l'interprétation des images thermiques et des thermogrammes » de l'ouvrage « La thermographie du bâtiment ». Le dépouillement des résultats suivra l'ordre de prise de photo (Figure 34 et Figure 35) ou l'en s'attardera sur les éléments pertinents et non pas toutes les parois.

### IV.2 Les résultats extérieurs :

#### IV.2.1 Façade Est :

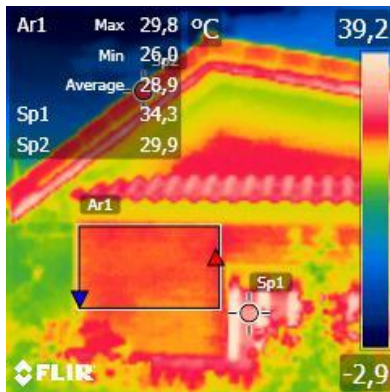


Figure 41 : Thermogramme traité e de la façade est de la maison prototype



Photographie 1 : Façade est de la maison prototype. Source : Auteur.

La façade est de la maison prototype offre un thermogramme dit de la « toiture chaude » où les éléments de toitures et les éléments en bois (ex. : persiennes et volets) sont mesurés plus chaud que les matériaux de d'inertie faible. En effet les persiennes mesurées en Sp1 donnent une température de 34.3°C et les tuiles en Sp2 29.9°C sont plus chaudes que les murs en BTS mesurés en Ar1 à 28.9°C. Cette situation s'explique par l'angle d'incidence sur les tuiles et la croissance de température matinale puisque les prises de vues ont été faites à 10h du matin. On remarque depuis l'extérieur que la température des murs est uniforme (tache rouge uniforme) ce qui témoigne d'une bonne isolation.

### IV.2.2 Façade sud :

Les thermogrammes en figure 42 et 43 de la façade sud confirment les résultats donnés par celui de la façade est. Les tuiles et les volets sont plus chauds que les murs à cause de l'élévation de température.

Les zones Ar1 des deux thermogrammes sont uniforme et représente une bonne isolation des murs.



Photographie 3 : Façade sud du côté du séjour. Source : Auteur.

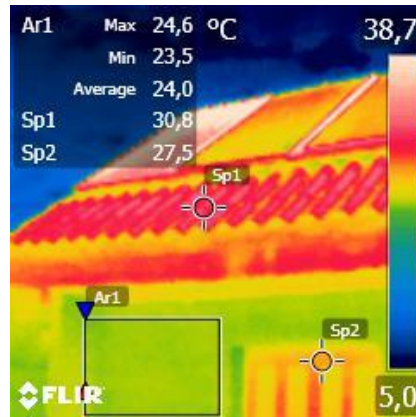


Figure 42 Thermogramme traité de la façade sud de la chambre 1. Source : Auteur.

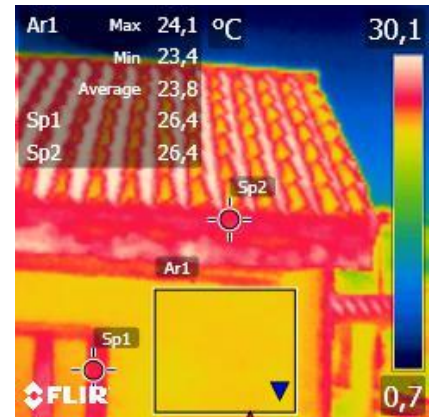


Figure 43 : Thermogramme traité de la façade sud du côté du séjour. Source : Auteur.



Photographie 2 : Façade sud du côté de la chambre 1. Source : Auteur.

## IV.3 Les résultats intérieurs :

### IV.3.1 Le séjour

-Parois est :

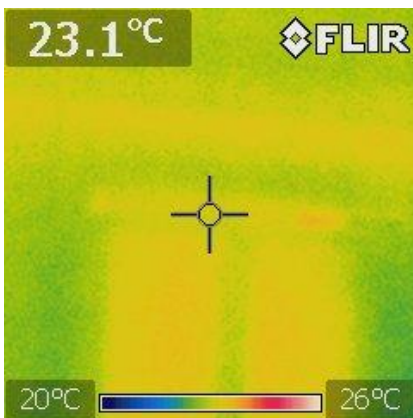


Figure 44 : Thermogramme séjour, paroi orientée est, au niveau de la porte fenêtre. Source : Auteur.



Photographie 4 : photo de la porte fenêtre du séjour. Source : Auteur

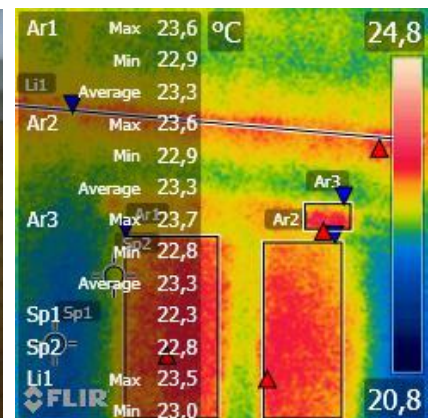


Figure 45 Thermogramme traité de la paroi contenant la porte fenêtre. Emissivité= 0.86 et distance=3m. Source : Auteur.

Le thermogramme en figure 45 montre plusieurs zones chaudes représentées par les outils de mesures. On retrouve le verre des fenêtres double vitrage (Ar1 et Ar2) dont la température

varie entre 22.9°C et 23.6°C. Cela s'explique par le fait que même si le double vitrage est plus performant que la vitrage simple son coefficient de transmission thermique reste plus ou moins élevé par rapport à celui du mur 2.6 W/m<sup>2</sup>.°K pour le verre contre 0.38 W/m<sup>2</sup>.°K pour les murs (cf : chapitre3). Néanmoins en ne voit aucun signe de déperdition puisque arrivé au cadre en pvc (Sp2= 22.8 °C) la température reviens à la normal (température murs Sp1=22.3) et ne semble pas s'échapper par un pont à part pour la zone marqué Ar3, qui on peut le voir sur la photo est une interruption dans l'enveloppe volontaire pour laisser passer un instrument de mesure. La dernière zone qui ressort est celle de la jonction entre le mur et le plafond Li1 dont la température varie entre 23 et 23.5 ° donc une moyenne de 23.25° ce qui ramène l'écart de température à 1 entre le mur et cette alors que le plancher haut à 0.23 2.6 W/m<sup>2</sup>.°K de transmission thermique. Cela peut s'expliquer par un léger pont thermique ou une réflexion des rayons due à l'arrondi des voutains.

Le reste de la paroi a une température uniforme qui ne varie que de 0.03 °C ce qui témoigne d'une bonne isolation des murs sans interruption ni lien entre les plaques.

- Paroi Sud

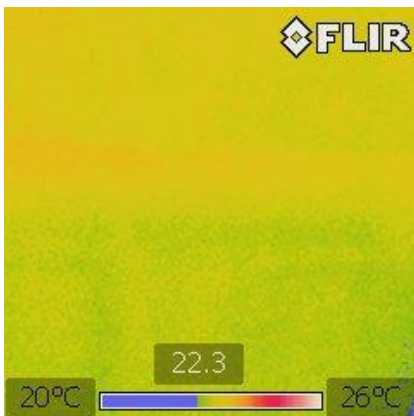


Figure 46 : Thermogramme de la paroi sud du séjour au niveau de la fenêtre.  
Source : Auteur.



Photographie 5 : Photo de la paroi sud du séjour au niveau de la fenêtre. Source : Auteur.

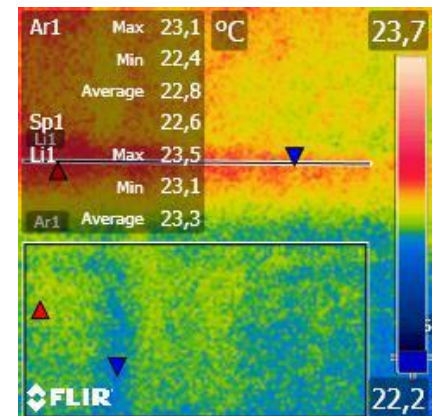


Figure 47 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre du séjour.  
Emissivité : 0.86 et distance : 3m. Source : Auteur.

On remarque sur la figure 47 que la fenêtre représenté par la zone Ar1 joue très bien son rôle en double vitrage puisque la température y varie entre 22.4 °C et 23.1 °C mais avec une moyenne de 22.8 °C qui se rapproche de la température relevée sur les murs en Sp1 22.6°C et qui peut descendre à 22.3 °C. Aucun signe de déperdition entre les cadres les murs n'est à signaler. Par contre, on retrouve toujours cette zone chaude au niveau de la jonction entre le plafond et le mur dont la température varie entre 23.1 °C et 23.5 avec une moyenne de 23.3°C ce qui donne encore une fois un écart entre la température des parois et de la jonction presque

de 1°C. Le reste de la paroi présente une température uniforme une preuve encore une fois d'une bonne isolation du mur.

### IV.3.2 La chambre 1

- Paroi Sud :

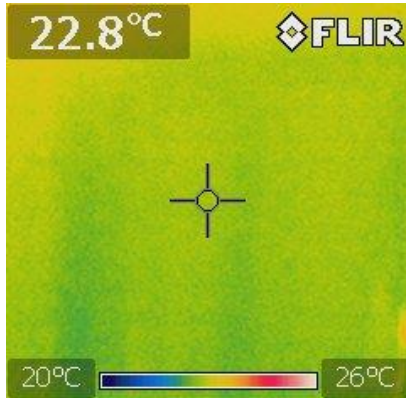
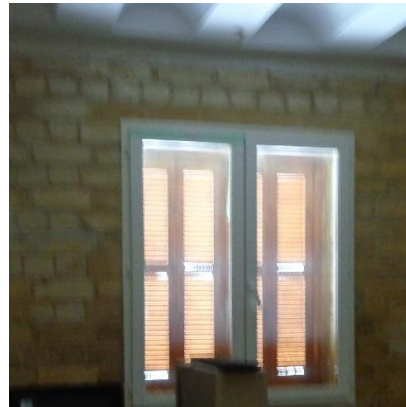


Figure 49 : Thermogramme de la paroi orientée sud de la chambre 1 au niveau de la fenêtre. Source : Auteur



Photographie 6 : Photo de la paroi orientée sud de la chambre 1 au niveau de la fenêtre. Source : Auteur

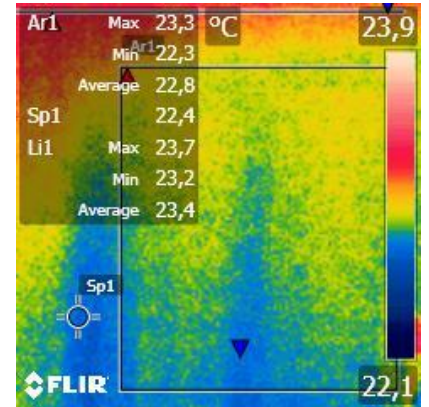


Figure 48 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre. Emissivité = 0.86 et distance = 3m. Source : Auteur.

Dans la paroi sud de la chambre

le même schéma se répète. On remarque dans la figure 48 le double vitrage est représenté par la zone Ar1 a une température moyenne de 22.8 °C avec un maximum de 23.3 °C et un minimum de 22.3 cela est plus ou moins correcte vue que les murs mesurés en Sp1 ont une température de 22.4 °C. L'isolation du mur est ininterrompu vu l'uniformité de la température de ce dernier. Il reste toujours cette zone chaude représentée par la Li1 dont la température varie de 23.2 °C à 23.7 °C avec une moyenne de 23.4 °C résultant sur un écart de température entre la paroi et la jonction entre le mur et la toiture de 1°C.

- Paroi Ouest

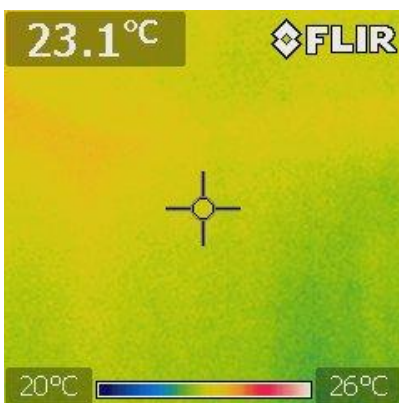
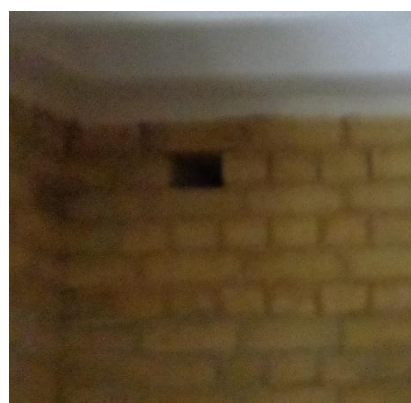


Figure 51 : Thermogramme de la façade ouest aveugle de la chambre 1 au niveau de la jonction mur est mur ouest et plancher haut. Source : Auteur.



Photographie 7 : Photo de la façade ouest aveugle de la chambre 1 au niveau de la jonction mur est mur ouest et plancher haut. Source : Auteur.

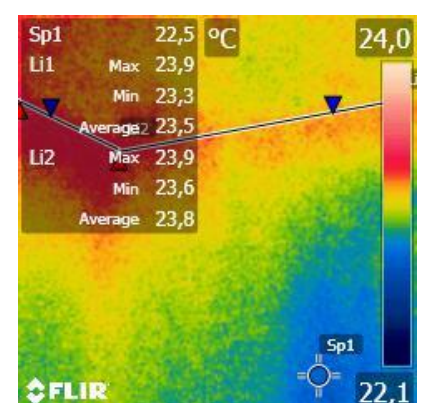


Figure 51 : Thermogramme traité de la façade aveugle de la chambre 1 au niveau de la liaison mur est mur ouest et plancher haut. Emissivité = 0.9 et distance = 3m Source : Auteur.

La figure 52 montre que la température du mur est uniforme est à peu près égal à  $Sp1 = 22.5^{\circ}\text{C}$  ce (donc une bonne isolation uniforme). On retrouve la zone chaude à la jonction du mur et du plancher haut où la température (Li1) oscille entre  $23.3^{\circ}\text{C}$  et  $23.9^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $23.5^{\circ}\text{C}$ . Encore une fois il y a un écart de  $01^{\circ}\text{C}$  entre cet élément et la paroi elle-même. Cependant la liaison entre les deux murs est et ouest plutôt uniforme en terme de température.

### IV.3.3 La chambre 2

- Paroi ouest

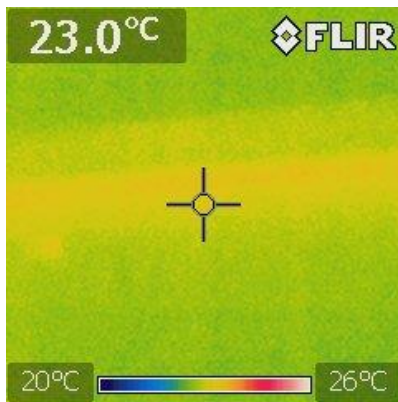


Figure 52: Thermogramme de la paroi aveugle orientée ouest de la chambre 2 au niveau de la jonction mur, plancher haut. Source : Auteur.



Photographie 8 : Photo de la paroi aveugle orientée ouest de la chambre 2 au niveau de la jonction mur, plancher haut. Source : Auteur.

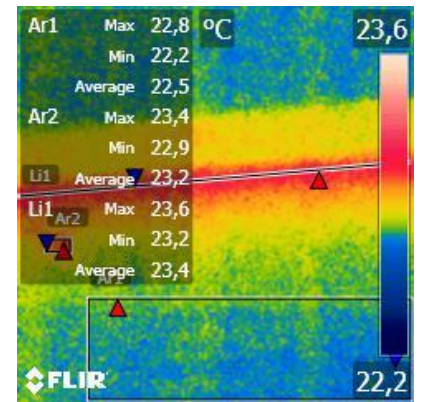


Figure 53 : Thermogramme traité du mur aveugle de la chambre 2 au niveau de la liaison mur, plancher haut. Emissivité= 0.9 et distance=3m. Source : Auteur.

Pour cette paroi qui est aveugle on peut voir dans la figure 53 que la température du mur représentée par la zone Ar1 varie entre  $22.2^{\circ}\text{C}$  et  $22.8^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $22.5^{\circ}\text{C}$ . Ce qui est plutôt uniforme et est le signe d'une bonne isolation. Une zone chaude attire notre attention marquée en Ar2 dont la température oscille entre  $22.9^{\circ}\text{C}$  et  $23.4^{\circ}\text{C}$  pour une moyenne de  $23.2^{\circ}\text{C}$  ce qui représente un écart de température de  $0.8^{\circ}\text{C}$  avec la paroi. Cette zone qu'on peut voir dans la photographie 7 est un orifice de ventilation, on peut en déduire que cette petite ouverture, contrairement à celle qui se trouve dans la chambre 1, n'est pas assez étanche et permet la fuite de la température. On retrouve toujours la zone qui fait jonction entre le mur et le plancher, haut mesurée avec la Li1, dont la température vacille entre  $23.2^{\circ}\text{C}$  et  $23.6^{\circ}\text{C}$  avec une moyenne de  $23.4^{\circ}\text{C}$ , qui donne un écart de température de  $0.9^{\circ}\text{C}$ .

- Paroi nord

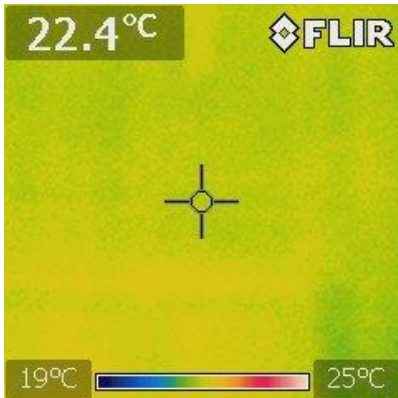


Figure 55 : Thermogramme de la paroi orientée nord de la chambre 2 au niveau de la fenêtre. Source : Auteur



Photographie 9 : photo de la paroi orientée nord de la chambre 2 au niveau de la fenêtre. Source : Auteur

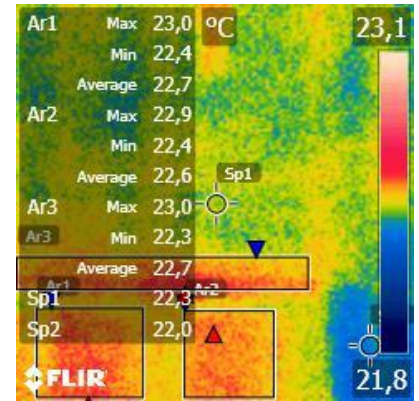


Figure 54 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre de la chambre 2. Emissivité=0.86 et distance=3m. Source : Auteur.

La figure 54 représente le thermogramme de cette paroi. Elle démontre que le mur a une température uniforme mesurée en Sp2 de 22°C (encore une fois une bonne isolation du mur). Les zones rouges marquées Ar1 et Ar2 représentent le verre du double vitrage, avec une température moyenne respective de 22.7°C et 22.6° elles jouent pleinement leur rôle pour étanchéifier l'enveloppe. Aucun signe de perte de chaleur n'est à signaler au niveau du cadre. Quant à la zone Ar3, elle représente l'élément en bois plaqué au-dessus de la fenêtre qu'on peut clairement voir dans la photographie 8. Ce n'est ni un signe de malfaçon ni de pont thermique c'est juste dû à la différence de coefficient d'émissivité. En Sp1, est mesuré la jonction entre le mur est le plancher haut qui est à 22.3 °C et donc presque la même température que la paroi, rien à signaler de ce côté.

**IV.3.4** La salle d'eau

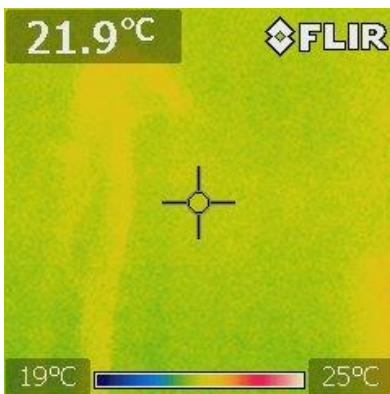


Figure 57 : Thermogramme de la paroi de la d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la chambre 2 et le plancher haut. Source : Auteur.



Photographie 10 : photo de la paroi de la d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la chambre 2 et le plancher haut. Source : Auteur.

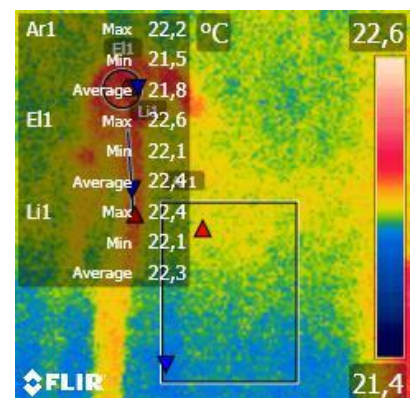


Figure 56 : Thermogramme traité de la paroi de la salle d'eau au niveau de la jonction avec le mur de la chambre 2 et le plancher haut. Emissivité=0.9 et Distance=3m. Source : Auteur.

Pour cette paroi nous ne pourrions pas traiter l'étanchéité de la fenêtre, car elle était ouverte lors de la prise de photo. Ainsi on se focalisera plus sur la qualité d'isolement du mur (figure 56) qui paraît correcte au vu de résultat de la zone Ar1 avec une moyenne de 21.8 °C et un léger développement au niveau de la jonction sans que ça soit un écart déterminant un pont thermique.

La zone E11 et la ligne Li1 représentent la tuyauterie du chauffage solaire et non pas une malfaçon de la paroi (voir photographie 9). Avec une moyenne de 22.4 °C et 22.3°C (par rapport à la température des parois) ce système paraît bien calorifugé.

### IV.3.5 Cuisine

#### - Paroi nord

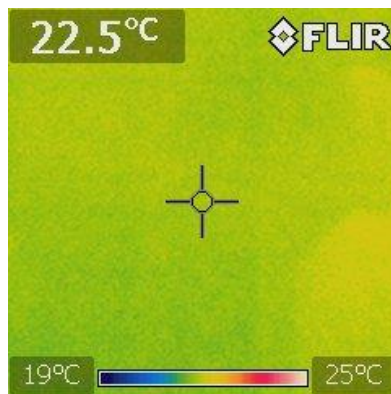
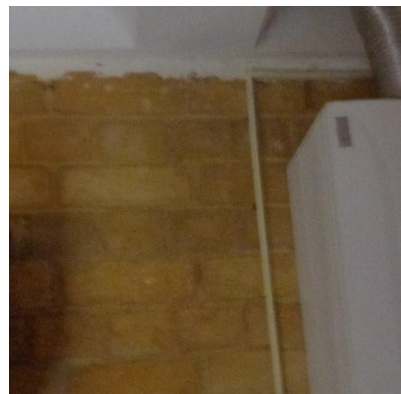


Figure 58 : Thermogramme de la paroi orientée nord de la cuisine, au niveau de la chaudière murale. Source : Auteur.



Photographie 11 : photo de la paroi orientée nord de la cuisine, au niveau de la chaudière murale. Source : Auteur.

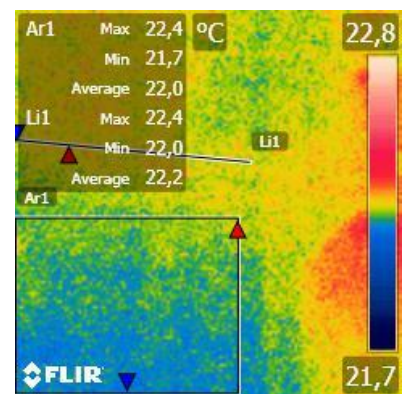


Figure 59 : Thermogramme traité de la paroi aveugle de la cuisine, au niveau de la chaudière murale. Emissivité=0.9 et distance=3m. Source : Auteur.

A partir du thermogramme de la figure 59, on peut voir que la température de la paroi représentée par la zone Ar1 est une température qui oscille entre 21.7°C et 22.4°C pour une moyenne de 22°C. Ainsi on décèle une certaine uniformité qui témoigne d'un bon isolement. La jonction entre le mur et le plancher haut est mesurée via la Ligne Li1. On peut voir que sa température varie entre 22.0°C et 22.4 pour une moyenne de 22.2°C ce qui est légèrement en dessous de la température de la paroi, mais pour un écart de 0.2 °C rien de grave n'est à signaler. La zone rouge à droite du thermogramme est le rayonnement de la chaudière et non pas une malfaçon de l'enveloppe.

- Paroi Est

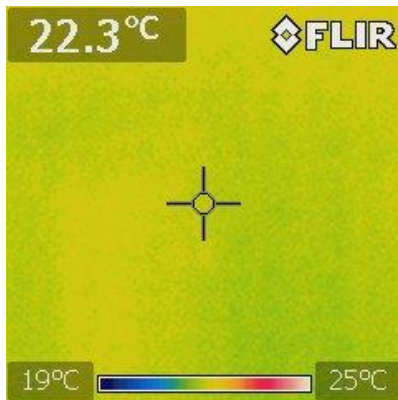


Figure 61 : Thermogramme de la paroi orientée est de la cuisine au niveau de la fenêtre. Source : Auteur.



Photographie 12 : photo de la paroi orientée est de la cuisine au niveau de la fenêtre. Source : Auteur.

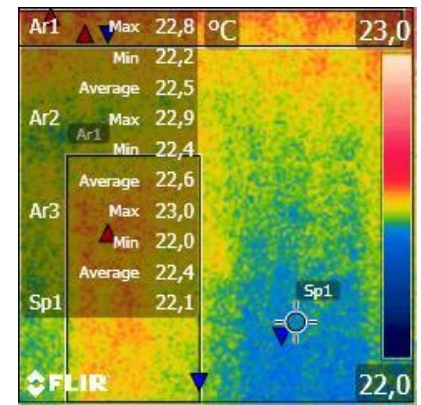


Figure 60 : Thermogramme traité de la paroi contenant une fenêtre au niveau de la cuisine. Emissivité=0.86 et distance=3m. Source : Auteur

La paroi de la cuisine que montre la figure 60, présente une paroi avec une température uniforme mesurée par Sp1 de 22.1 °C ce qui témoigne d'une bonne isolation. La zone chaude marquée par le rectangle Ar1 est le verre du double vitrage avec une température moyenne de 22.5 °C remplie sa fonction d'isolant puisque il n'y a que 0.4°C d'écart de température avec la paroi. Quant à l'autre zone chaude représentée par Ar2 est la jonction entre le mur et le plancher haut sa température varie entre 22.4 °C et 22.9 ° pour une moyenne de 22.5 °C, donc un écart de 0.4 °C avec la paroi ce qui reste relativement bon.

#### **IV.4 Conclusion :**

Après avoir observé les thermogrammes résultant du diagnostic thermographique du projet pilote, plusieurs observations ont été faites. On remarque globalement une très bonne isolation des parois avec des fenêtres étanche qui ne laisse pas filtrer la chaleur ni à travers son vitrage ni à travers son cadre. Les jointures des murs entre eux ne connaissent pas de ponts thermiques. Néanmoins quelques écarts de températures (de l'ordre de 1°C) ont été notés entre les murs du séjour, de la chambre 1 et le mur ouest de la chambre 2. Ces écarts peuvent constituer de légers ponts thermiques. Tableau 4 récapitule toutes les observations qui ont été produites lors de ce chapitre.

| Espace             | Paroi | Observations  |
|--------------------|-------|---|
| <b>Séjour</b>      | Est   | -Bonne isolation des murs.<br>-Porte fenêtre étanche.<br>-Ecart de 1°C à la liaison mur/plafond.<br>-Déperditions par une ouverture volontaire. |
|                    | Sud   | -Bonne isolation des murs.<br>-Fenêtre étanche.<br>-Ecart de 1°C à la liaison mur/plafond.  |
| <b>Chambre1</b>    | Sud   | -Bonne isolation des murs.<br>-Fenêtre étanche.<br>-Ecart de 1°C à la liaison mur/plafond.  |
|                    | Ouest | -Bonne isolation des murs.<br>-Ecart de 1°C à la liaison mur/plafond.   |
| <b>Chambre2</b>    | Ouest | -Bonne isolation des murs.<br>-Ecart de 1°C à la liaison mur/plafond.<br>-Déperdition par un orifice de ventilation.                            |
|                    | Nord  | -Bonne isolation des murs.<br>-Fenêtre étanche.   |
| <b>Salle d'eau</b> | Nord  | -Bonne isolation des murs.  |
| <b>Cuisine</b>     | Nord  | -Bonne isolation des murs.  |
|                    | Est   | -Bonne isolation des murs.<br>-Fenêtre étanche.   |

Tableau 4 : Récapitulatif des observations et résultats. Source : Auteur

A travers ces résultats il est clair que l'enveloppe du projet pilote est de très bonne qualité. Malgré la présence de certaines anomalies, l'étanchéité des parois n'est pas en question. Grâce au respect de la réglementation thermique (qui autorise jusqu'à 20% de ponts thermiques) et l'application des bases de l'architecture bioclimatique, la maison prototype atteint une performance énergétique exemplaire.

## **Conclusion générale et perspectives :**

A travers cette étude nous avons essayé d'une part d'expliquer la notion d'efficacité énergétique, son contexte d'émergence, ses outils, les moyens de l'atteindre ainsi que les instruments juridiques qui l'encadrent et leurs influences sur le processus conceptuel. D'une autre part nous avons étudié un des outils qui permet de diagnostiquer la performance énergétique des bâtiments et de diminuer sa consommation énergétique : la thermographie du bâtiment, l'objectif étant d'évaluer un bâtiment conçu selon la réglementation thermique algérienne en vigueur.

Ainsi lors de notre recherche nos hypothèses émises auparavant ont été confirmées dans le premier chapitre où à travers les lectures il s'est avéré que l'efficacité et l'économie énergétique sont intimement liées à la mise en œuvre. Nous avons aussi appris que la réglementation thermique en vigueur ne manque pas de précision ni de rigueur dans ses calculs, elle n'a juste pas encore trouvé sa place légale dans le processus conceptuel contrairement à d'autres réglementations. D'autre part nous avons pris connaissance de la thermographie, ses principes et son application dans le bâtiment. En apprenant ses bases et son protocole, nous avons effectué un examen thermographique de la maison prototype réalisée par le consortium CNERIB et CDER afin de répondre à notre problématique à savoir l'impact énergétique de respect de la réglementation thermique. Il s'est avéré que le bâtiment jouit d'une enveloppe étanche et qui ne permet que très peu de déperditions thermiques et donc est économe en énergie ce qui répond à la problématique. Bien que cette recherche ait pu atteindre son but, elle comporte néanmoins des faiblesses et des limites :

### **Les limites de la recherche :**

- La principale limite de cette recherche est le temps et la durée allouée à la réaliser. En effet le diagnostic réalisé ne s'est pas déroulé dans la meilleure période pour de résultats sans équivoques, la meilleure période pour la thermographie étant les premiers mois de la saison hivernale.
- Une autre faiblesse de cette recherche réside dans le fait qu'elle n'est qu'une initiation à la thermographie, elle ne fait qu'effleurer les possibilités que permet cette discipline. En effet la thermographie n'est pas qu'une pratique d'observation comme cela a été fait dans le diagnostic de cette recherche, elle permet de quantifier et de calculer exactement les déperditions d'une enveloppe par rayonnement est ainsi que les autres déperditions (hormis celle par infiltration d'air).

- La recherche a eu pour objet un bâtiment exemplaire qui est la maison prototype du CNERIB/CDER et aurait pu être enrichie par un autre exemple plus aléatoire afin de réaliser une comparaison entre respect du règlement et conception conventionnelle.
- La documentation sur ce sujet n'est pas très abondante surtout en langue française et même en se rabattant sur l'anglais les documents les plus intéressants ne sont pas disponibles à la libre utilisation (le cas rencontré avec la nouvelle norme américaine n'en n'est qu'un exemple).

### **Les perspectives de recherche**

Cette recherche n'a fait qu'effleurer la surface de ce que peut faire la thermographie, il serait intéressant dans recherche ultérieure d'aborder le côté quantitatif de cette discipline qui mêle calcul thermique et analyse thermographique. Il serait aussi intéressant d'aborder la notion de confort thermique et le ressenti des usagers, et non pas que le côté environnemental, pour les comparer à des résultats thermographique. Ce qui coïncide avec l'objectif de la thermographie qui permet à l'utilisateur de mieux vivre son espace en lui proposant des stratégies de rénovations qui permettent non seulement de dépenser moins d'argent en énergies mais aussi de vivre confortablement.

Enfin, une dernière piste peut être suivie dans le domaine du patrimoine où la thermographie tient vraiment le rôle d'un scanner qui peut détecter les parties vulnérable d'un édifice sans le détruire.

## **Bibliographie**

1. **Ministère de l'Énergie et des Mines.** "Annexe II: Guide méthodologique." <http://www.mem-algeria.org/>. 2010. [http://www.mem-algeria.org/legis/Energies/Annexe\\_II.pdf](http://www.mem-algeria.org/legis/Energies/Annexe_II.pdf) (accessed Aout 12, 2015).
2. **A09-400, AFNOR.** "Essais non destructifs- Thermographie infrarouge- Vocabulaire." Paris, 1991.
3. **Adolphe, Luc.** *Ambiances architecturales et urbaines.* Marseille: Parenthèses, 1998.
4. **Agence Nationale de maîtrise de l'énergie (Tunisie).** "La mise en place de la réglementation thermique et énergétique en Tunisie: Efficacité énergétique dans le bâtiment." Novembre 2010. [http://www.ffem.fr/jahia/webdav/site/ffem/shared/ELEMENTS\\_COMMUNS/U\\_ADMINISTRATEUR/5-PUBLICATIONS/Changement\\_climatique/Plaquette\\_Tunisie\\_ReglThermique\\_fr.pdf](http://www.ffem.fr/jahia/webdav/site/ffem/shared/ELEMENTS_COMMUNS/U_ADMINISTRATEUR/5-PUBLICATIONS/Changement_climatique/Plaquette_Tunisie_ReglThermique_fr.pdf) (accessed Février 06, 2015).
5. **APRUE.** "Consommation Énergétique Finale de l'Algérie: Chiffres clés Année 2005." 2007. <http://www.aprue.org.dz/documents/consommation-energetique.pdf> (accessed Fevrier 3, 2015).
6. **Benson, Harris, and Marc Séguin.** *Physique: 3. Ondes, optique et physique moderne.* Québec: De Boeck Supérieur, 2009.
7. **Berg, Linda, Peter Raven, and David Hassenzahl.** *Environnement.* 6e. Bruxelles: De Boeck Supérieur, 2009.
8. **Béthencourt, Anne de, and Jacky Chorin.** *Efficacité énergétique : un gisement d'économies ; un objectif prioritaire.* JOURNAL OFFICIEL, Paris: JOURNAUX OFFICIELS, 2013.
9. **Bianco, A., and V. Ceradini.** "The Church of S. Eusanio, Damaged by the April 6 2009 L'Aquila Earthquake: In situ Diagnostic Investigations as Confirmation of Historical Research and Aimed at Restoration Plan." *Proc. in the 14th Europ.* Ohrid, Republic of Macedonia, 2010. 1-6.
10. **Bouamama, Wahiba.** *Au Sujet De La Politique D'efficacité Énergétique En Algérie : Approche Systémique Pour Un Développement Durable Cas De : Programme Eco-Bat.* Tlemcen: Université Abou-Baker Belkaid, 2013.
11. **Chaffar, Khaled.** *Thermographie Active Appliquée A La Caractérisation In Situ De Parois De Bâtiment.* Thèse de doctorat, Artois: UNIVERSITE D'ARTOIS, 2012.
12. **Chenak, A., K. Imessad, F. Mokhtari, et S. Larbiyoucef.** «Projet Med-Enec : Efficacité énergétique et intégration des énergies renouvelables dans le secteur du bâtiment dans la région de la Méditerranée.» *Bulletin des énergies renouvelables,* Décembre 2008: 11-12.

13. **Cockelenbergh, Cody.** *Optimisation énergétique d'un nouveau bâtiment tertiaire.* Waterloo: Wolters Kluwer Belgium, 2009.
14. **Dali, Kamel.** "Mise en Application de la Réglementation Thermique." *Lettre de l'APRUE*, no. 10 (2006): 2.
15. **Denker, Astrid, et S.M.K El-Hassar.** *Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie.* Alger: GIZ, 2014.
16. **Derradji, L., F. Boudali Errebai, M. Amara, Y. Maoudj, K. Imessad, and F. Mokhtari.** "Etude expérimentale du comportement thermique d'une maison prototype en période d'été." *Revue des Energies Renouvelables* 16, no. 4 (2013): 709 – 719.
17. **Durand-Pasquier, Gwénaëlle.** *Bâtiments et performance énergétique: données techniques, contrats, responsabilité.* Paris: Lamy, 2011.
18. **Fabbri, Julie.** *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle :le pari de l'innovation #2 L'efficacité énergétique.* Paris: Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, 2014.
19. **FLIR.** *FLIR i7.* n.d. <http://www.flir.fr/instruments/display/?id=65813> (accessed Avril 2015).
20. **FLIR.** *Thermal Imaging Guidebook For Building And Renewable Energy Applications.* n.d.
21. **FOURA, Smir.** *Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie.* Constantine: Université Mentouri, 2008.
22. **Fourret, Michèle.** "Rentabilité assurée." *Faire faire*, Juillet 2006: 56-60.
23. **Gaussourgues, G.** *La thermographie infrarouge: principe-techniques-application.* 4ème. Paris: Technique et Documentation, 1999.
24. **Geitmann, Sven.** *Énergies renouvelables & carburants alternatifs: de nouvelles énergies pour l'avenir.* Berlin: Hydrogeit Verlag, 2007.
25. **Gendron, Corinne.** *La gestion environnementale et la norme ISO 14001.* Québec: PUM, 2004.
26. **Giancoli, Douglas.** *Physique générale: Ondes, optique et physique moderne.* Montréal: De Boeck Supérieur, 1993.
27. **Gonzalo, Roberto, and Karl J. Habermann.** *Architecture et efficacité énergétique: Principes de conception et de construction.* Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
28. **Guay, Louis.** *Les enjeux et les défis du développement durable: connaître, décider, agir.* Québec: Presses Université Laval, 2004.
29. **Guillevic, Pierre.** *Modélisation des bilans radiatifs et énergétiques des couverts végétaux.* Toulouse: Université Paul Sabatier, 1999.

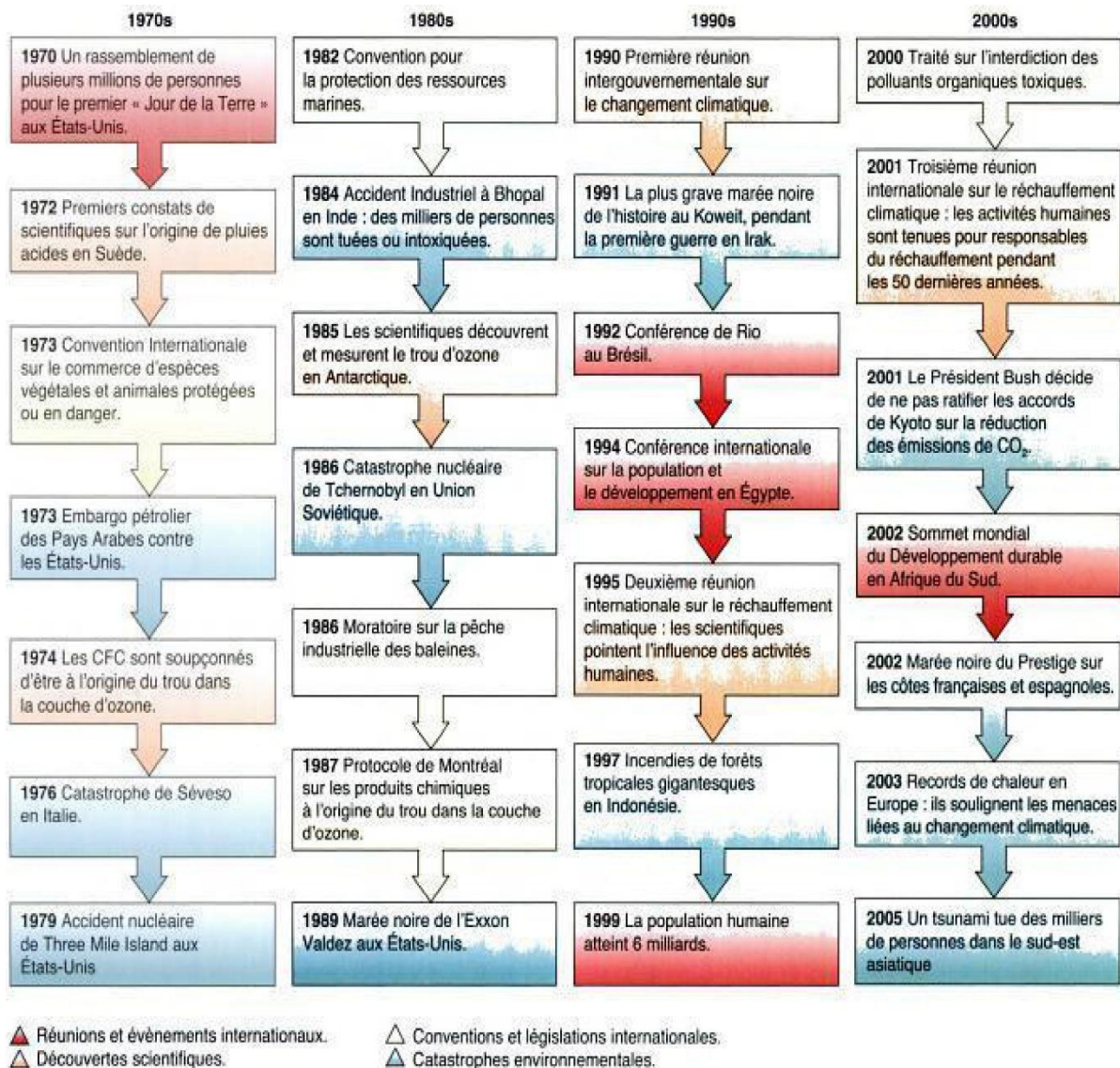
30. **Hachemi, Mohamed Aziz.** *Exploitation et programmation informatique des documents techniques réglementaires relatifs aux déperditions thermiques de ventilation des bâtiments.* Boumerdes: Université M'hamed Bougara, 2011.
31. **Ibarra-Castanedo C., Maldague Xavier P. V.** "Infrared Thermography." In *Handbook of Technical Diagnostics*, by Horst Czichos, edited by Horst Czichos, 566. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
32. **Imessad, K., L. Derradji, N. Ait Messaoudene, F. Mokhtari, A. Chenak, and R. Kharchi.** "Impact of passive cooling techniques on energy demand for residential." Edited by Sayigh A.A.M. *Renewable energy: An international journal*, 2014: 589-597.
33. **Imessad, Khaled.** "Efficience énergétique dans le secteur du bâtiment en méditerranée." *Bulletin des Energies Renouvelables*, Juin 2007: 11.
34. **Info Energie en Bourgogne.** *Bâtiment économe en énergie: Les clés pour réussir son projet de construction ou de rénovation.* Bourgogne, Janvier 2014.
35. **Jobert, Romuald.** *Perméabilité à l'air de l'enveloppe: réglementation, risques, mesure et amélioration.* Grenoble: CSTB, 2012.
36. **Junginger, Martin, Wilfried van Sark, and Andr Faaij.** *Technological Learning in the Energy Sector.* Massachusetts: Edward Elgar Publishing, 2010.
37. **Kadri, N, and A Mokhtari.** "Contribution à l'étude de réhabilitation thermique." *Revue des Energies Renouvelables* 14, no. 2 (2011): 301-311.
38. **Kylili, Angeliki, Paris Fokaides, Petros Christou, and Soteris Kalogirou.** "Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics:." *Applied Energy*, 2014: 531-549.
39. Le parlement européen et le conseil de l'union. "Directive 2006/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques." n.d. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0032&from=FR>.
40. **Legardez, Alain, and Laurence Simonneaux.** *Développement durable et autres questions d'actualité: questions socialement vives dans l'enseignement et la formation.* Dijon: Educagri Editions, 2011.
41. **Liébard, Alain, and André De Herde.** *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable.* Paris: Observ'ER, 2005.
42. **Mazari, Mohammed.** *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiment à caractère public: Cad du département d'architecture de Temda (Tizi-Ouzou).* Tizi-Ouzou: Universite Mouloud Mammeri, 2012.
43. **MED ENEC.** *Pilot project Algeria.* n.d. <http://www.med-enec.com/building-projects/pilot-projects/algeria/pilot-project-algeria> (accessed Aout 02, 2015).

44. **Meurant, Gerard.** *Physical Principles of Far-Infrared Radiation*. Londres: Academic Press, 1973.
45. **Molle, Dimitri, and Pierre-Manuel Patry.** *RT 2012 et RT existant: réglementation thermique et efficacité énergétique*. Paris: Eyrolles, 2013.
46. **Oikonomou, V., F. Becchis, L. Steg, and D. Russolillo.** "Energy saving and energy efficiency concepts for policy making." *Energy Policy*, Juillet 05, 2009: 4787–4796.
47. **Pajani, Dominique.** *Guide pratique de thermographie du bâtiment*. 1ere. Paris: Eyrolles, 2012.
48. —. *La thermographie du bâtiment*. 1ère. Paris: Eyrolles, 2012.
49. **Pequignot, Eric.** *Détermination de l'émissivité et de la température des surfaces continentales. Application aux sondeurs spatiaux infrarouges HIRS et AIRS/IASI*. Paris: Ecole polytechnique, 2006.
50. **Perron, Sylvain.** *La Modélisation Conceptuelle Des Mécanismes De Prises De Décision Sur Les Rénovations Eco énergétique Résidentielles*. Maîtrise En Sciences De L'Environnement, Montréal: Université Du Québec À Montréal, 2011.
51. *Plan of Implementation of the World Summit on Sustainable Development*, adopté le 04 septembre 2002, Johannesburg, Afrique du sud, p5.
52. **Pleșu, Raluca, Gabriel Teodoriu, and George Țaranu.** *Infrared Thermography Applications For Building Investigation*. Iași: Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași, 2012.
53. **Radhouani, Mohamed Sassi, and Naouel Daouas.** *Exercices résolus de thermique: Tome 1, Lois de base et conduction, Volume 1*. Paris: TECHNIP, 2008.
54. **Roulet, Claude Alain.** *Santé et qualité de l'environnement interieur dans les bâtiments*. 2e. Paris: PPUR, 2010.
55. **Roulet, Claude-Alain.** *Éco-confort: pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. Lausanne: PPUR, 2012.
56. **Saba, Luca, Warren Rozen, Alberto Alonso-Burgos, and Diego Ribuffo.** *Imaging for Plastic Surgery*. Massachusetts: CRC Press, 2014.
57. **Saffache, Pascal, and Lise Moutamalle.** *Le developpement durable: entre espoirs et illusions*. Vol. IV, chap. 11 in *Etudes Caribéennes, Volume 4*, by Michel Desse, Pascal Saffache, Olivier Dehoorne and Anaïs Favre, 88. Paris: Publibook, 2006.
58. **Sami-Mecheria, S., D. Semmar, and A. Hamid.** "Determination of the energetic needs of low Energy housing and integration of a solar water heating installation located in Algeria." *Energy Procedia*, Aout 2015: 854-863.
59. **Schneider Electric.** *Le livre blanc de l'Efficacité énergétique*. Grenoble: Schneiders Electric, 2011.
60. **Seoud, S.** *Audit Energétique De Bâtiments Tertiaires -Cas de trois bâtiments existants à Alger-*. Thèse magister, Alger: Epau, n.d.

61. **Trachte, Sophie.** *Matériau, matière d'architecture soutenable: Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable.* Louvain: Presses univ. de Louvain, 2010.
62. **Vittone, René.** *Bâtir: manuel de la construction.* Lausanne: PPUR Presses polytechniques, 2010.
63. **Vollmer, Michael,** and Klaus-Peter Möllmann. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications.* Weinheim: John Wiley & Sons, 2011.
64. **Weber, W.** *Soleil et architecture: Guide pratique pour le projet.* Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991.
65. **Woerner, Timothy.** *Exterior Building Envelope Inspections Using Thermal Infrared Imaging.* Public Building Service Report, Fairfax: General Services Administration, 2006.
66. **Zhang, Zhuomin, Benjamin Tsai, and Graham Machin.** *Radiometric Temperature Measurements: II. Applications.* Londres: Academic Press, 2009.

# **Les Annexes**

Annexe n°1 : événements environnementaux de 1970 à 2005



Berg, Linda, Peter Raven, et David Hassenzahl. *Environnement*. De Boeck Supérieur, 2009, p31

Annexe02 : Coefficient d'émissivité de certains matériaux

(Source : <http://www.thethermographiclibrary.org>.)

| Description du matériau        | Émissivité reportée | Longueur d'onde $\mu\text{m}$ valide |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Acier doux                     | 0.20 - 0.32         |                                      |
| Acier inoxydable (boulon)      | 0.32                | 3.4 - 5                              |
| Acier inoxydable poli          | 0.075               |                                      |
| Acier inoxydable meulé         | 0.11                |                                      |
| Acier inoxydable sablé         | 0.38 - 0.44         |                                      |
| Acier inoxydable de type 301   | 0.54 - 0.63         | 3.4 - 5                              |
| Acier galvanisé (ancien)       | 0.88                | 8 - 14                               |
| Acier galvanisé (neuf)         | 0.23                | 8 - 14                               |
| Acier laminé à froid           | 0.7 - 0.9           |                                      |
| Acier meulé                    | 0.4 - 0.6           |                                      |
| Acier nickelé                  | 0.11                | 8 - 14                               |
| Acier oxydé                    | 0.7 - 0.9           |                                      |
| Acier poli                     | 0.07                |                                      |
| Acier doux terni               | 0.70                | 3.4 - 5                              |
| Alumine                        | 0.8                 |                                      |
| Clinquant d'aluminium          | 0.04                |                                      |
| Feuille d'aluminium            | 0.09 / 0.04         | 3 / 10                               |
| Aluminium anodisé              | 0.77                |                                      |
| Aluminium abrasé               | 0.83 - 0.94         | 2 - 5.6                              |
| Aluminium oxydé                | 0.2 - 0.55          | 3.4 - 5                              |
| Aluminium oxydé à 600°C        | 0.11 - 0.19         |                                      |
| Aluminium poli                 | 0.039 - 0.057       | 8 - 14                               |
| Aluminium sablé                | 0.210               |                                      |
| ALZAC A-2 (aluminium purifié)  | 0.73                |                                      |
| Anodisation noire              | 0.82 - 0.88         |                                      |
| Anodisation bleue              | 0.82 - 0.87         |                                      |
| Antimoine poli                 | 0.28 - 0.31         |                                      |
| Ardoise                        | 0.85                | 8 - 14                               |
| Ardoise d'amiante              | 0.96                |                                      |
| Autocollant isolant électrique | 0.92-0.97           |                                      |
| Carton d'amiante               | 0.96                |                                      |
| Matériaux à base d'amiante     | 0.78                |                                      |
| Papier ou panneau d'amiante    | 0.94                |                                      |
| Argent poli                    | 0.02 - 0.03         |                                      |

|                                  |             |         |
|----------------------------------|-------------|---------|
| Argile cuit                      | 0.91        | 8 - 14  |
| Asphalte                         | 0.93        |         |
| Basalte                          | 0.72        |         |
| Beryllium                        | 0.18        |         |
| Beryllium anodisé                | 0.9         |         |
| Béton                            | 0.91        | 8 - 14  |
| Béton rugueux                    | 0.92 - 0.97 | 2 - 5.6 |
| Béton sec                        | 0.95        | 5       |
| Béton aggloméré                  | 0.63        |         |
| Bismuth poli                     | 0.34        |         |
| Bitume en bandes                 | 0.91        |         |
| Bois dur à contre fibre          | 0.82        | 2 - 5.6 |
| Bois dur dans le sens des fibres | 0.68 - 0.73 | 2 - 5.6 |
| Bois naturel                     | 0.90 - 0.95 |         |
| Bois de chêne                    | 0.90        |         |
| Bois vernis                      | 0.93        | 3.4-5   |
| Brique à l'argile (réfractaire)  | 0.59 - 0.85 | 2 - 5.6 |
| Brique d'alumine                 | 0.68        | 2 - 5.6 |
| Brique commune / vitrifiée       | 0.81 - 0.86 | 2 - 5.6 |
| Brique à maçonner                | 0.94        | 5       |
| Brique flammée                   | 0.88        | 8 - 14  |
| Brique rouge                     | 0.9 - 0.93  |         |
| Bronze poli                      | 0.1         |         |
| Bronze poreux/rugueux            | 0.55        | 8 - 14  |
| Cadmium                          | 0.02        |         |
| Calcaire                         | 0.95 - 0.96 | 5       |
| Caoutchouc                       | 0.95        | 8 - 14  |
| Caoutchouc naturel dur           | 0.91        |         |
| Caoutchouc naturel souple        | 0.86        |         |
| Carbone en fibres                | 0.77        |         |
| Carbone (graphite)               | 0.98        | 8 - 14  |
| Carbone pur                      | 0.81        | 8 - 14  |
| Carbure de silicium              | 0.83 - 0.96 |         |
| Carreau céramique "black shiny"  | 0.85        | 8 - 14  |
| Carreau de plâtre                | 0.87        | 8 - 14  |
| Carton (boite en)                | 0.81        | 5       |
| Carton décoratif de recouvrement | 0.85        | 8 - 14  |
| Carton gris non traité           | 0.90        | 2 - 5.6 |
| Céramique                        | 0.95        |         |

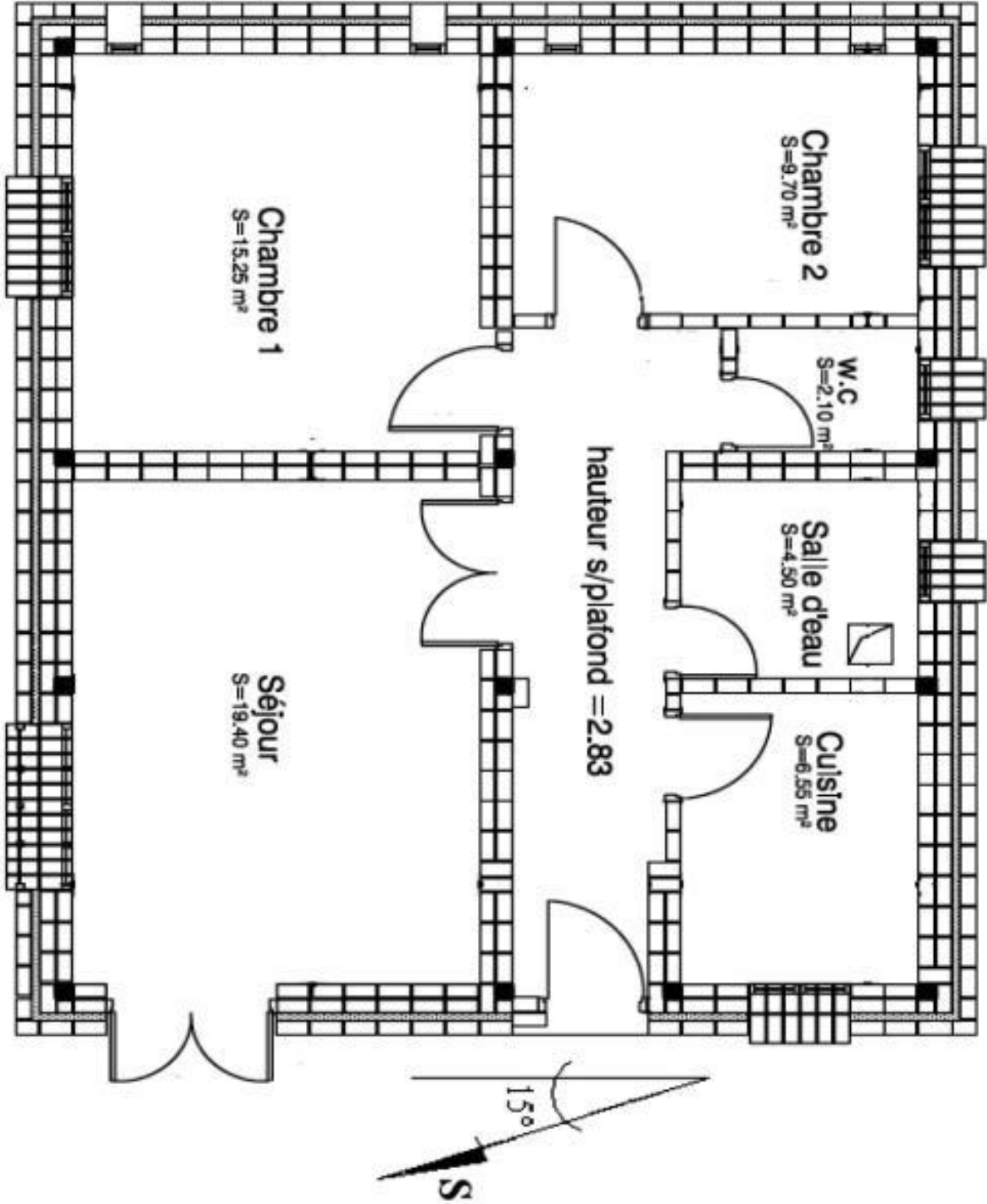
|                              |               |          |
|------------------------------|---------------|----------|
| Charbon de bois              | 0.91          |          |
| Charbon pulvérisé            | 0.96          | 8 - 14   |
| Chrome poli                  | 0.08 - 0.36   | 8 - 14   |
| Ciment                       | 0.54          | 8 - 14   |
| Conifère (feuilles)          | 8 - 14        |          |
| Conifère (écorce)            | 0.976         | 8 - 14   |
| Contreplaqué                 | 0.83 - 0.98   | 2 - 5.6  |
| Constantan                   | 0.09          |          |
| Corps noir théorique         | 1.0           |          |
| Coton (tissu)                | 0.77          |          |
| Craie                        | 0.65 - 0.88   | 8 - 14   |
| Cuivre oxydé                 | 0.34          | 8 - 14   |
| Cuivre déposé électriquement | 0.03          | 8 - 14   |
| Cuivre poli                  | 0.023 - 0.052 | 8 - 14   |
| Cuivre recuit                | 0.07          | 8 - 14   |
| Cuivre revêtu d'argent       | 0.30          | 3.4 - 5  |
| Dalle plastique de sol       | 0.90          | 8 - 14   |
| Eau                          | 0.95 - 0.963  |          |
| Étain                        | 0.05 - 0.07   | 8 - 14   |
| Fer forgé lisse              | 0.30          |          |
| Fer forgé terne              | 0.70          |          |
| Fer en lingot rugueux        | 0.87 - 0.95   | 8 - 14   |
| Fer oxydé                    | 0.5 - 0.9     | 8 - 14   |
| Fer laminé                   | 0.77          | 8 - 14   |
| Fer poli                     | 0.14 - 0.38   |          |
| Fer rouillé                  | 0.61          | 2 - 5.6  |
| Fibre de verre               | 0.750         |          |
| Fibrociment                  | 0.94          | 8 - 14   |
| Formica                      | 0.937         | 6.5 - 20 |
| Fonte brute de fonderie      | 0.81          | 8 - 14   |
| Fonte décalaminée            | 0.44          | 8 - 14   |
| Fonte fondue                 | 0.2 - 0.3     |          |
| Fonte oxydée                 | 0.6 - 0.95    | 8 - 14   |
| Fonte polie                  | 0.21          |          |
| Gazon                        | 0.8 - 0.75    |          |
| Glace                        | 0.97          | 8 - 14   |
| Granite                      | 0.971         | 5        |
| Gravier                      | 0.95          | 6.5 - 20 |
| Grès émaillé                 | 0.87          | 8 - 14   |

|  |               |         |
|--|---------------|---------|
| Gris                                   | 0.92          | 2 - 5.6 |
| Gypse                                  | 0.85          | 8 - 14  |
| Herbe                                  | 0.76 - 0.74   |         |
| Hêtre (feuilles)                       | 0.993         | 8 - 14  |
| Hêtre (écorce)                         | 0.976         | 8 - 14  |
| Huile (film sur base de nickel) ep 0mm | 0.05          |         |
| Huile ep 1 mm                          | 0.27          |         |
| Huile ep 2 mm                          | 0.46          |         |
| Huile ep 5 mm                          | 0.72          |         |
| Huile couche épaisse                   | 0.82          |         |
| Inconel X oxydé                        | 0.71          |         |
| Inconel X en feuille (1mm)             | 0.10          |         |
| Laiton abrasé (grain de 80)            | 0.20          |         |
| Laiton laminé en plaque                | 0.06          |         |
| Laiton mat / terni                     | 0.22          | 8 - 14  |
| Laiton oxydé                           | 0.5           |         |
| Laiton oxydé à 600°C                   | 0.6           |         |
| Laiton poli                            | 0.03 - 0.05   | 8 - 14  |
| Laque bakélite                         | 0.93          | 8 - 14  |
| Laque blanche                          | 0.87 - 0.92   | 8 - 14  |
| Laque Enamel                           | 0.90          | 8 - 14  |
| Laque Noir de Parson                   | 0.95          |         |
| Laque noire brillante sur métal        | 0.87          |         |
| Laque noire mate                       | 0.97          | 8 - 14  |
| Lichens                                | 0.986         | 8 - 14  |
| Liège décoratif                        | 0.82          | 8 - 14  |
| Litière (conifère)                     | 0.979         | 8 - 14  |
| Litière (feuillus)                     | 0.986         | 8 - 14  |
| Oxyde de magnésium                     | 0.20 - 0.55   |         |
| Magnésium poli                         | 0.07 - 0.13   |         |
| Marbre blanc                           | 0.95          |         |
| Mercure liquide                        | 0.1           | 8 - 14  |
| Molybdène en filament                  | 0.096 - 0.202 |         |
| Molybdène poli                         | 0.05 - 0.18   |         |
| Monel (NiCuMo)                         | 0.1 - 0.4     |         |
| Moquette commune                       | 0.75-0.85     | 8 - 14  |
| Mortier                                | 0.87          | 2 - 5.6 |
| Mortier sec                            | 0.94          | 5       |
| Neige                                  | 0.99          | 8 - 14  |

|                                     |               |                  |
|-------------------------------------|---------------|------------------|
| Nickel-chrome en fil poli           | 0.65 - 0.79   |                  |
| Nickel Electro déposé (poli / brut) | 0.05 - 0.11   |                  |
| Nickel poli                         | 0.072         | 8 - 14           |
| Nickel oxydé                        | 0.59 - 0.86   |                  |
| Noir de fumée                       | 0.96          | 8 - 14           |
| Or poli                             | 0.018 - 0.035 |                  |
| Panneau de particules léger         | 0.85          | 2 - 5.6          |
| Panneau de particules renforcé      | 0.85          | 2 - 5.6          |
| Papier adhésif blanc                | 0.93          |                  |
| Papier blanc                        | 0.68 / 0.90   | 2 - 5.6 / 8 - 14 |
| Papier plastique rouge              | 0.94          | 2 - 5.6          |
| Papier plastique blanc              | 0.84          | 2 - 5.6          |
| Papier noir brillant                | 0.90          | 8 - 14           |
| Papier noir mat                     | 0.94          |                  |
| Papier glacé                        | 0.55          |                  |
| Peau humaine                        | 0.98          | 8 - 14           |
| Peinture aluminium                  | 0.45          |                  |
| Peinture blanche                    | 0.77          | 3.4 - 5          |
| Peinture Epoxy noire                | 0.89          |                  |
| Peinture "faible émissivité"        | 0.87          | 8 - 14           |
| Peinture Glycéro noire              | 0.80          |                  |
| Peinture à l'huile                  | 0.94          |                  |
| Peinture Jaune cadmium              | 0.33          |                  |
| Peinture non métallique             | 0.90 - 0.95   |                  |
| Peinture plastifiée blanche         | 0.84          | 2 - 5.6          |
| Peinture plastifiée noire           | 0.95          | 2 - 5.6          |
| Peinture silicone noire             | 0.93          |                  |
| Peinture verte chrome               | 0.70          |                  |
| Pierre brute propre                 | 0.85-0.93     | 8 - 104          |
| P.V.C.                              | 0.91 - 0.93   | 2 - 5.6          |
| Plastique acrylique                 | 0.94          | 5                |
| Plastique blanc                     | 0.84          | 2 - 5.6          |
| Plastique noir                      | 0.94          | 2 - 5.6          |
| Platine poli                        | 0.054 - 0.104 | 8 - 14           |
| Plâtre                              | 0.86 - 0.9    | 2 - 5.6          |
| Plexiglas                           | 0.86          | 2 - 5.6          |
| Plomb oxydé                         | 0.4 - 0.6     | 8 - 14           |
| Plomb poli                          | 0.5 - 0.1     | 8 - 14           |
| Plomb pur non oxydé                 | 0.057 - 0.075 |                  |

|   |              |          |
|---|--------------|----------|
| Polypropylène   | 0.97         | 2 - 5.6  |
| Polystyrène   | 0.97         | 5        |
| Polyuréthane (mousse de)                                | 0.6          | 5        |
| Porcelaine vitrifiée                                    | 0.92         | 8 - 14   |
| PVC pour gaine de câbles                                | 0.95         | 3.4 - 5  |
| PVC   | 0.91         | 8 - 14   |
| Quartz vitrifié   | 0.93         | 8 - 14   |
| Sable   | 0.76         |          |
| Sciure  | 0.75         |          |
| séquoïa travaillé                                       | 0.83         | 2 - 5.6  |
| séquoïa brut  | 0.84         | 2 - 5.6  |
| Shingle noir  | 0.88         | 8 - 14   |
| Sol aride   | 0.981        | 8 - 14   |
| Sol humide  | 0.996        | 8 - 14   |
| Tantale (feuille)                                       | 0.05         |          |
| Teflon (revêtement)                                     | 0.38         |          |
| Titane poli   | 0.19         |          |
| Toile de jute incolore                                  | 0.87         | 2 - 5.6  |
| Toile de jute verte                                     | 0.88         |          |
| Tuile en terre cuite                                    | 0.88         | 8 - 14   |
| Ancien filament de tungstène                            | 0.032 - 0.35 |          |
| Tungstène poli  | 0.03 - 0.04  | 8 - 14   |
| UHMW (polyéthylène à très haut degré de polymérisation) | 0.87         | 3.4 - 5  |
| Vernis  | 0.93         | 2 - 5.6  |
| Verre   | 0.92         | 8 - 14   |
| Verre poli  | 0.94         |          |
| Verre utilisé en chimie (Pyrex(c))                      | 0.97         | 6.5 - 20 |
| Zinc naturel  | 0.18         | 8 - 14   |
| Zinc recouvert en non-métallique                        | 0.60-0.90    | 8 - 14   |
| Zinc oxydé  | 0.10         |          |
| Zinc poli   | 0.03         |          |

Annexe 03 : Plan, photos et thermogrammes du projet pilote



Plan de la maison prototype.Source : (Derradji, et al. 2013)

Photo et thermogramme de la façade est :

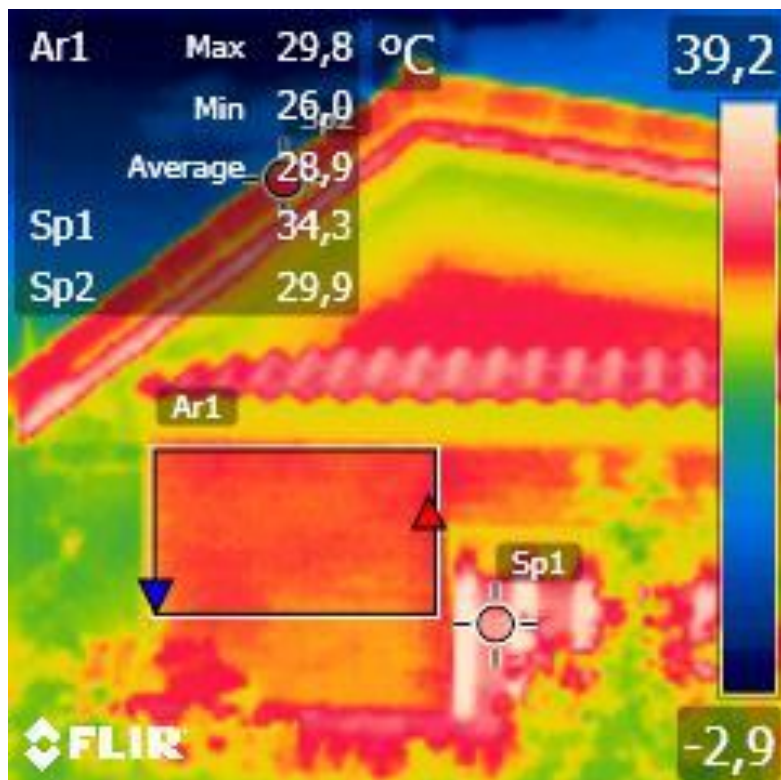
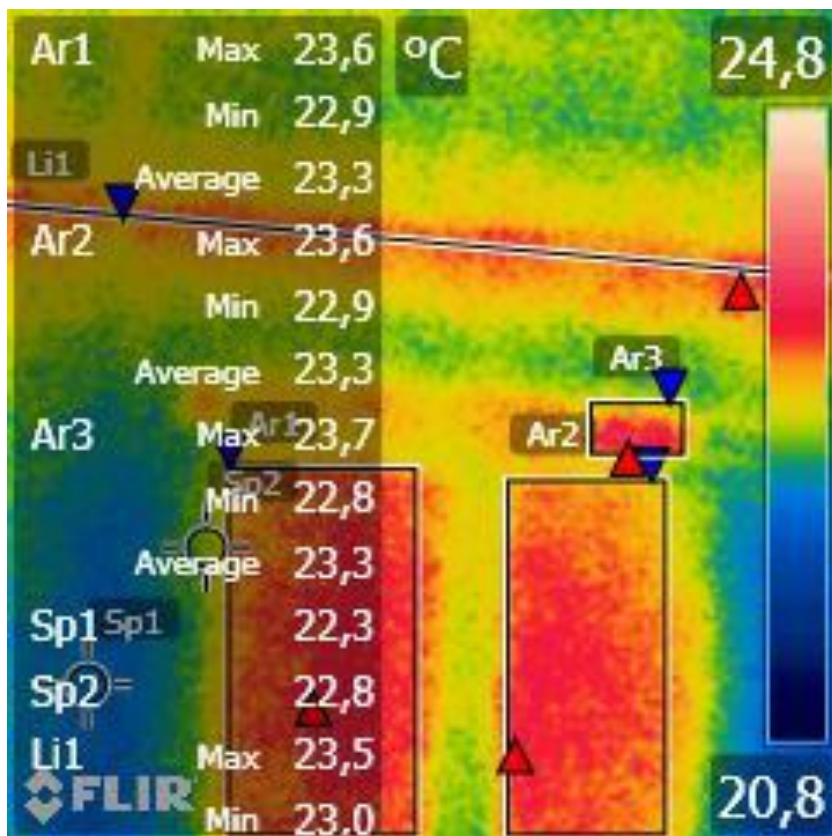
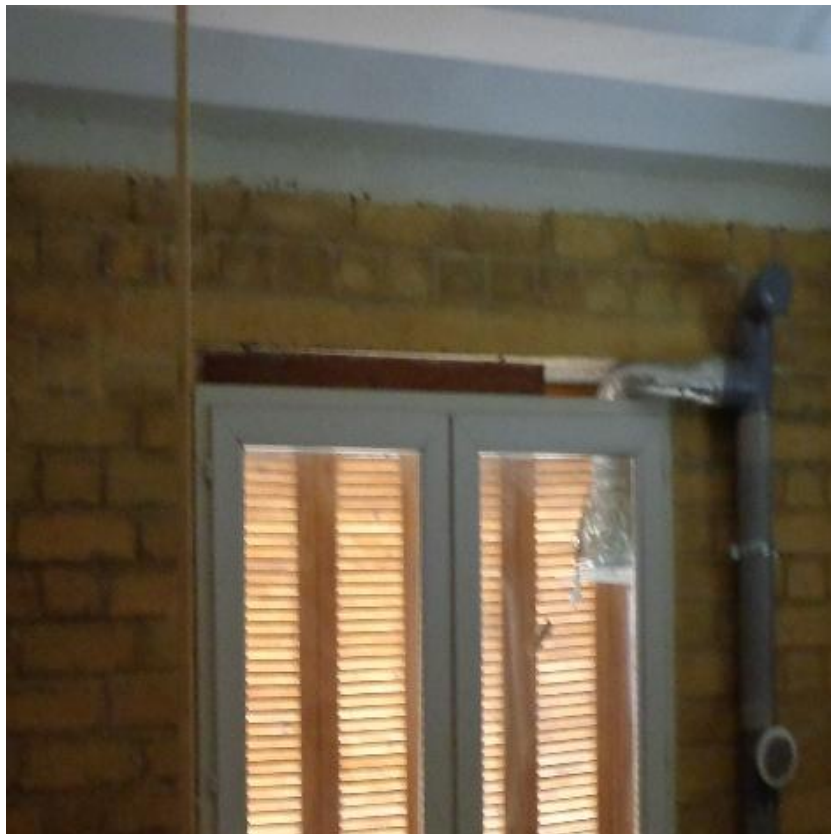


Photo et thermogramme de la paroi est du séjour



Photos intérieures de la maison



