

**ISSN : 1737-9334  
-PET-VOL. 40**



**PROCEEDINGS OF ENGINEERING & TECHNOLOGY  
-PET-**

**SPECIAL ISSUE ON  
GREEN ENERGY & ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**FRANCOPHONE ISSUE**

**EDITORS:  
DR. AHMED RHIF (TUNISIA)  
DR. GEORGES DESCOMBES (FRANCE)**

**International Centre for Innovation & Development  
-ICID-**





ISSN: 1737-9334

-PET- Vol. 40

# Proceedings of Engineering & Technology -PET-

Special Issue on

Green energy & environmental Engineering

Francophone Issue

## **Editors:**

Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)

Dr. Georges Descombes (France)

International Centre for Innovation & Development

**-ICID-**



**Editeurs en chef**

Dr. Ahmed Rhif (**Tunisia**)

[Ahmed.rhif@gmail.com](mailto:Ahmed.rhif@gmail.com)

Dean of International Centre for  
Innovation & Development (ICID)

Dr. Georges Descombes (**France**)

[georges.descombes@cnam.fr](mailto:georges.descombes@cnam.fr)

CNAM Paris

**Comité de redaction**

Camelia Stanciu (**ROM**)

Draoui Belkacem (**ALG**)

Georges Descombes (**FR**)

Said Zouhdi (**FR**)

Christelle Périllon (**FR**)

Ille Gebeshuber (**AUS**)

Philippe Guibert (**FR**)

Brahim Berbaoui (**ALG**)

Ghazza Masmoudi (**TUN**)

Jamal Eddine Jellal (**MOR**)

Khouloud Beddoud (**ALG**)

Leila Bendifallah (**ALG**)

Mimi Belatel (**ALG**)

Mustapha Hatti (**ALG**)

Nachida K. Merzouk (**ALG**)

Nahla Bouaziz (**TUN**)

Rekioua Ziani Djamilia (**ALG**)

Salma El Aïmani (**MOR**)

Saoussen Hammami (**TUN**)

ahar Bahi (**ALG**)

Youcef Soufi (**ALG**)

Abdelfettah Barhdadi (**MOR**)

Abdelhamid Kheiri (**FR**)

Abdelkader Aisset (**ALG**)

Amélie Danlos (**FR**)

Güleda Engin (**TUR**)

Haitham.M.Ramadan (**FR**)

Houria Siguerdidjane (**FR**)

Jean Mathurin Nzikou (**CON**)

Mohamed Becherif (**FR**)

Mohamed Ben Braïka (**ALG**)

Mohamed E. Djeghlal (**ALG**)

Mounir Gaidi (**UAE**)

Nabil Belacel (**CAN**)

Noureddine Yassaa (**ALG**)

Olivier Riou (**FR**)

Oum Keltoum Hakam (**MOR**)

Pierre-Olivier Logerais (**FR**)

Rafika Boudries (**ALG**)

Samira Chader Kerdjou (**ALG**)

Sophie Simonet (**FR**)

Sylvie Faucheux (**FR**)

Tarek Ahmed-Ali (**FR**)

Tarek Bouktir (**ALG**)

Abdelaziz Hamzaoui (**FR**)

Abdeldjebar Hazzab (**ALG**)

Abdelhamid I.Hassane (**TCH**)

Abdeljabbar Cherkaoui (**MOR**)

Abdellah El Fadar (**MOR**)

Abdellah Mechaqrane (**MOR**)

Abdelmajid Choukri (**MOR**)

Adnan Yassine (**FR**)

Adel Banana (**LBY**)

Ahlem Othmani (**FR**)

Arouna Darga (**FR**)

Chahboun A. Adil (**MOR**)

Driss Youssfi (**MOR**)

Entissar AL Suhaibani (**KSA**)

Fathi Mohammed (**ALG**)

Fatima Zohra Boufadi (**ALG**)

Fawaz Massouh (**FR**)

Hassane Mahmoudi (**MOR**)

Irina Mitrofanova (**UKR**)

Ivana Maksimovic (**SER**)

Ivanka Milosevic (**SER**)

Kamal Reklouï (**MOR**)

Karkaz M. Thalij (**IRA**)

Khenfer Nabil (**ALG**)

Manar Slimane (**MOR**)

Maria Esposito (**ITA**)

Mohamed Benbouzid (**FR**)

Mohamed Trari (**ALG**)

Mohammed Hamouni (**ALG**)

Olena Iurevych (**FR**)

Rahmani Lazhar (**ALG**)

Rehab Abd El Baky (**EGY**)

Sallam Mebrouk (**ALG**)

Toufik Madani Layadi (**ALG**)

Tounzi Abdelmounaïm (**FR**)

Vesna Bjegovic-Mikanovic (**SER**)

Yao Azoumah (**BUR**)

Youssef Errami (**MOR**)

Zohra Ameer (**ALG**)

# Sommaire

- Approche fonctionnelle d'un dispositif d'ultrafiltration morwak. **Page 5**  
*Yassine Zahidi, Abdellah Ait taleb, Abdellah Boualam, Mohammed Zamd.*
- Le Comportement Thermique D'un Logement Mono-Orienté Cas D'Ain Malha à Alger. **Page 10**  
*Ahlam LAISSAOUI, Soumia OUKACI, Ismahan MAACHI.*
- Caractérisation expérimentale d'un béton soumis à hautes températures par analyse vibratoire. **Page 16**  
*BENOUDJAFER imane, LABBACI Boudjemaa, BENOUDJAFER ibtissam.*
- Etude de la texture et des propriétés mécaniques et électriques des fils de cuivre tréfilés et recuits. **Page 22**  
*F. Baira, M.Zidani, T. Baudin.*
- Modélisation systémique d'un système de propulsion d'un Moteur-Roue du Véhicule Electrique avec les Bond Graphs. **Page 28**  
*Sihem Dridi, Ines Ben Salem, Lilia EL Amraoui.*
- Simulation de la température de sortie de l'eau dans un concentrateur solaire cylindroparabolique à Batna-Algérie. **Page 35**  
*T.Reddah, H.Benmoussa, M.Aissani.*
- Effet de l'induction électromagnétique sur la désorption d'hydrogène. **Page 39**  
*Sihem Belkhiria, Chaker Briki, Mouhamed Housine Dhaou, Nasr Sdiri, Abdelmajid Jemni, Faouzi Askri, Sassi Ben Nasrallah,*
- Etude de l'effet des particules sur les paramètres cinétiques de jet diphasique turbulent. **Page 46**  
*Mariam Bayouhd, Touati Hazem, Ben N'Ticha Hmaied.*
- Evolution de la microstructure des aciers T91 / T22 et leurs joints soudés. **Page 53**  
*Walid Jhinaoui, Seifallah Fetni, Jaleledine Briki.*
- Vers un instrument local de protection de l'environnement pour la ville algérienne. **Page 59**  
*Mohamed GHERBI.*

# APPROCHE FONCTIONNELLE D'UN DISPOSITIF D'ULTRAFILTRATION MorWAK

Yassine Zahidi<sup>#1</sup>, Abdellah Ait taleb<sup>##2</sup>, Abdellah Boualam<sup>###3</sup>, Mohammed Zamd<sup>####4</sup>

*#Laboratoire de Recherche en ingénierie ENSEM, Université Hassan II, Casablanca, Maroc*

<sup>1</sup>yassineezahidi@gmail.com

*##Laboratoire d' Energies Renouvelables et Dynamique des systèmes Faculté des sciences Ain Chok Université Hassan II, Casablanca, Maroc.*

<sup>2</sup>abdellah\_aittaleb@yahoo.fr

*###Laboratoire de Physiopathologie Cellulaire, Moléculaire, Inflammatoire, Dégénérative et Oncologique, Faculté de Médecine et de Pharmacie, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.*

<sup>3</sup>boulam05@yahoo.fr

<sup>4</sup>zamdia@gmail.com

## Abstract

L'objectif de ce travail est de caractériser un système d'ultrafiltration portable permettant le traitement de l'hyper volémie rencontrée principalement dans les situations d'Insuffisance Rénale Chronique Terminale (IRCT) et d'Insuffisance Cardiaque Congestive (ICC). En effet, l'évolution des besoins et la meilleure compréhension de la physiopathologie de l'urémie ainsi que la compréhension des limites des techniques d'ultrafiltration actuelles ont été défiés par la conception du MorWAK palliant aux inconvénients des techniques actuelles d'extraction du liquide par voie extra corporelle. Le dispositif MorWAK sera décrit selon une approche fonctionnelle par les diagrammes d'exigences et de cas d'utilisation. L'approche structurelle et l'approche comportementale feront l'objet des prochaines études.

**Keywords—** MorWAK – IRCT – ICC – Hémodialyse – Ultrafiltration – Approche fonctionnelle – Diagramme d'exigences – Diagramme de cas d'utilisation.

## I. INTRODUCTION

Les techniques d'extraction extra corporelles du liquide, utilisées dans le traitement de l'hyper volémie rencontrée principalement dans les situations d'Insuffisance Rénale Chronique Terminale (IRCT) et d'Insuffisance Cardiaque Congestive (ICC) nécessitent une hospitalisation en centre de soins intensifs et l'utilisation de machines coûteuses et volumineuses pilotées par une main d'œuvre hautement qualifiée [1]–[2]. Il s'agit plus de techniques de survie que de véritables alternatives au fonctionnement physiologique du rein natif qui fonctionne 24h/24h. Dans le but d'améliorer la qualité de vie des patients dialysés, de réduire la morbi-mortalité d'origine cardiovasculaire principalement [3], de prévenir et de corriger les complications métaboliques de la maladie rénale, l'équipe de recherche Ingénierie et Biomédical affiliée au Laboratoire de Physiopathologie Cellulaire, Moléculaire, Inflammatoire, Dégénérative et Oncologique (LPCMIDO) de la faculté de médecine et de pharmacie de Casablanca au Maroc, a mis au point le dispositif portable

MORWAK (Moroccan Wearable Artificial Kidney) [4], permettant la simplification des procédures de traitement de l'hyper volémie se définissant par l'augmentation du volume extracellulaire. L'étude critique des techniques actuelles d'extraction extracorporelle du liquide ainsi que l'évaluation en 2015 du bilan carbone de l'activité de dialyse au centre Hospitalier Universitaire Ibn Rochd de Casablanca ont démontré que seule le développement des technologies portables en hémodialyse semble être l'issue valable à moyen et à long terme pour réduire considérablement la souffrance des malades atteints par une IRCT ainsi que l'impact désastreux de l'une des activités de soins les plus chères et les plus polluantes de la planète.

## II. OUTILS ET METHODES

Pour satisfaire le besoin il faut le connaître. Pour le comprendre il faut l'exprimer en termes de fonctions. Pour identifier les fonctions il faut posséder les méthodes et outils d'analyse.

Au cours de cette étude, nous utiliserons un certain nombre d'outils de résolution de Problèmes pour mieux expliciter le besoin et caractériser le dispositif MorWAK.

### A. DIAGRAMME D'ISHIKAWA

Ce diagramme sera utilisé pour regrouper par catégorie les causes qui peuvent être à l'origine d'un problème. Dans notre cas, il s'agit d'une étude critique de la dialyse telle qu'elle est faite actuellement en centres de soins intensifs dans le but d'apporter des améliorations à la qualité de vie des patients dialysés [5].

### B. CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL

Le cahier des charges fonctionnel présente toutes les fonctions regroupées par famille. Chaque fonction est caractérisée par un certain nombre de critères d'appréciation assortis de leurs niveaux et de leur flexibilité. Un coefficient

d'importance hiérarchise les différentes fonctions de service [6].

### C. DIAGRAMME DES EXIGENCES

Ce diagramme fonctionnel permettra de décrire les exigences du cahier des charges fonctionnel. Chaque exigence exprime une capacité ou une contrainte à satisfaire par le système. Une exigence peut exprimer une fonction que devra réaliser le système ou une condition de performance technique, physique, de fiabilité, de sécurité, d'ergonomie, d'esthétisme[7].

### D. DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION

Ce diagramme fonctionnel met en évidence les interactions fonctionnelles des acteurs et du système étudié. Il délimite avec précision le système étudié et décrit ce que fera le système sans faire allusion aux solutions technologiques adoptées [8].

## III. L'HEMODIALYSE EN CENTRE

L'hémodialyse a été introduite dans les années 1950 comme technique de suppléance rénale. Les premiers travaux de Willem Johan Kolff ont permis de mettre en place les générateurs d'hémodialyse : des appareils volumineux nécessitant un traitement d'eau préalable mais qui ont aussi permis de sauver des milliers de vies. Elle est destinée principalement aux patients atteints d'insuffisance rénale chronique terminale [9]. C'est la technique la plus utilisée pour cette indication dans le monde. En effet, après plus de soixante ans d'utilisation, peu de changements ont été apportés au principe de base [10]. Les principales améliorations ont portées surtout sur des accessoires tels que l'adjonction à presque tous les générateurs d'outils de surveillance des performances comme la dialysance ionique ou des modules pour surveiller le volume sanguin (Blood Volume Monitoring).

## IV. PROBLEMATIQUE

L'hémodialyse est une technique lourde et très coûteuse. Elle met à mal le budget de santé dans tous les pays quel que soit leur PIB. L'accessibilité à ce type de traitement est donc très restreinte dans les pays en voie de développement [11]. La haute technicité de l'hémodialyse exige une organisation particulière. Elle est très souvent réalisée en centre où une machine est « rentabilisée » par son utilisation pour plusieurs patients dans une même journée. Alors que la logique exige que chaque patient soit traité par une machine « personnelle » et de façon « individuelle ». Ceci rendrait la technique hors de prix et donc inaccessible pour la grande majorité des patients.

## V. AMELIORATION DE LA DIALYSE

L'équipe de recherche pluridisciplinaire Ingénierie et Biomédical affiliée au Laboratoire de Physiopathologie Cellulaire, Moléculaire, Inflammatoire, Dégénérative et Oncologique (LPCMIDO) de la faculté de médecine et de pharmacie de Casablanca, consciente de la nécessité d'améliorer la qualité de vie, de réduire la morbi-mortalité, de prévenir et de corriger les complications métaboliques de la

maladie rénale a mis au point le MORWAK (Moroccan Wearable Artificial Kidney), dispositif portable permettant la simplification des procédures d'hémodialyse.

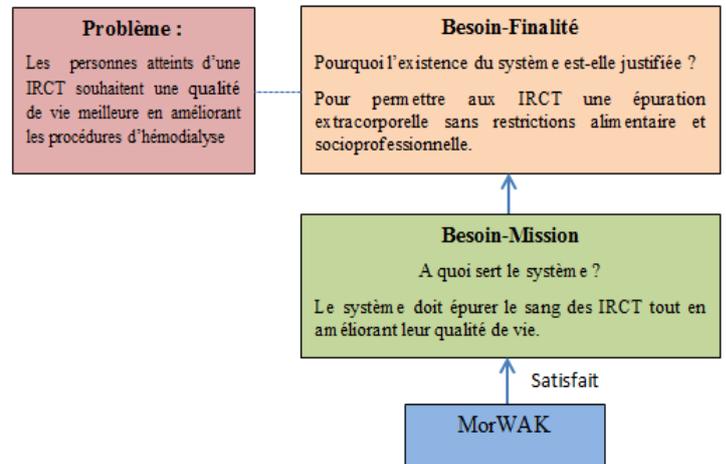


Figure 1 : Diagramme initial des besoins

Le MorWAK se définit donc comme un ensemble d'éléments solidaires et organisés pour satisfaire les attentes sus citées des patients IRCT.

L'ensemble des fonctions permet d'identifier les limites du MorWAK, les éléments qui le constituent et sa frontière incluant tous les éléments nécessaires à son fonctionnement dans toutes ses phases d'utilisation.

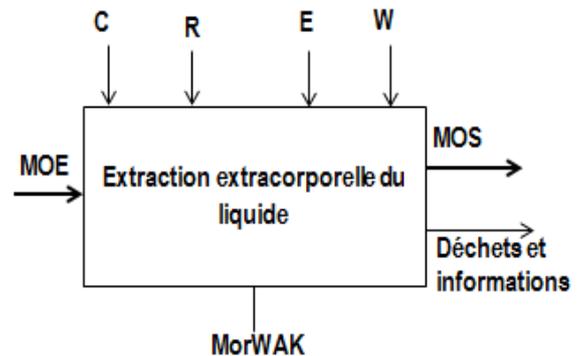


Figure 2 : Modèle SADT du MorWAK

La Matière d'œuvre Entrante (MOE) est constituée de :

- Le patient en état d'IRCT.
- L'énergie.
- Les médicaments.

La Matière d'œuvre Sortante est constituée de :

- Le patient dialysé.
- Les déchets solides et liquides.
- Les fichiers de données.
- Les informations en temps réel relatives au déroulement de l'opération d'épuration.

Les paramètres d'énergie (W), de réglage (R), de contrôle (C) et d'exploitation E permettent à l'utilisateur de personnaliser l'opération d'épuration.

### A. IDENTIFICATION DU BESOIN

Les principales causes portant atteinte à la qualité de vie des patients sont regroupées en cinq grandes familles (5M) comme suit [5] :

- **Machine (Dialyseur)** : La machine est rentabilisée par son utilisation pour plusieurs patients dans une même journée. le problème principal.
- **Matière d'œuvre** : La mise en dialyse d'un individu réduit fortement son autonomie et ses performances socioprofessionnelles. La vie des patients est rythmé (3fois 4 heures par semaine); ce qui restreint leurs déplacements en plus des restrictions alimentaires drastiques.
- **Main d'œuvre** : la qualité de service dépend de la qualification du personnel pilotant le matériel de dialyse.
- **Méthodes de travail** : La complexité des procédures et le caractère intermittent de l'hémodialyse nécessitent une main d'œuvre hautement qualifiée.
- **Milieu de travail** : il est à l'origine de l'expansion des pathologies anciennement connues (transmission manportée dans les centres de dialyse) et l'apparition de nouvelles maladies associées à la dialyse.

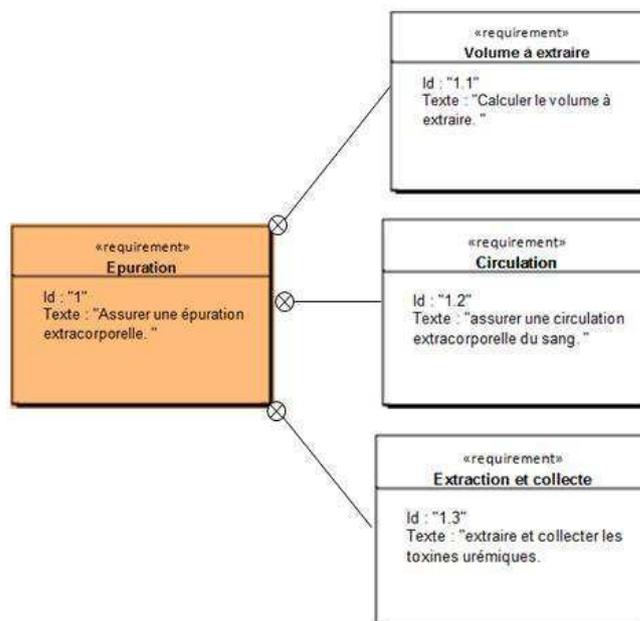


Figure 3 : Exigences fonctionnelles du MorWAK

### B. CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL

L'étude critique des techniques actuelles d'épuration extracorporelle a permis de dresser une liste non exhaustive d'exigences spécifiant les capacités ou les contraintes que doit satisfaire le MorWAK. [8]

Pour ne pas alourdir la présentation, nous avons regroupé les exigences :

- Les exigences fonctionnelles.
- Les exigences techniques.
- Les exigences de sécurité.
- Les exigences environnementales.
- Les exigences d'interfaçages.
- Les exigences pratiques.
- Les exigences de marketing.

Ces exigences constituent le cahier des charges fonctionnel technique du MorWAK. Les critères et niveaux d'appréciation des fonctions et contraintes spécifiées par les exigences apparaîtront dans les diagrammes des exigences. [6]

Dans ce qui suit, chaque catégorie d'exigences sera traitée à part.

### C. DIAGRAMME DES EXIGENCES

Chacune des macro exigences précédemment définies sera décomposée en plusieurs exigences unitaires.

#### Exigences fonctionnelles :

Ces exigences décrivent la fonction épuration extracorporelle pour laquelle le système est conçu.

#### Exigences techniques :

Ce type d'exigences précise les performances et les capacités du MorWAK

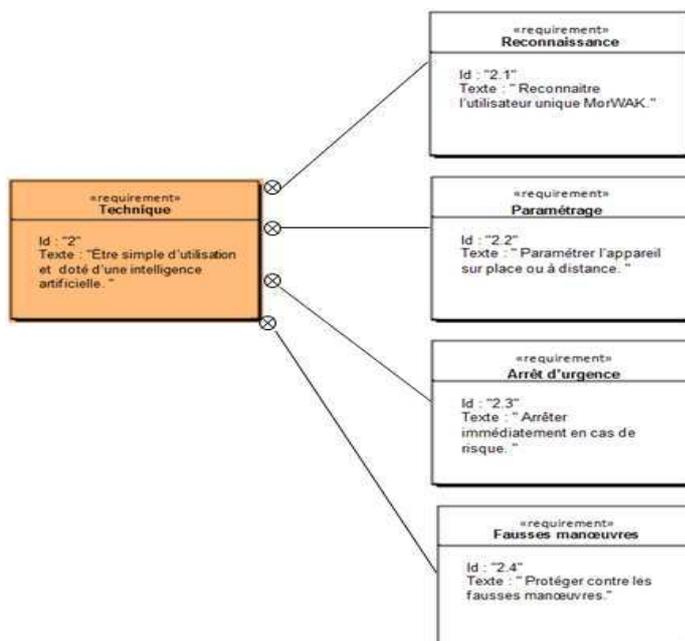


Figure 4 : Exigences techniques du MorWAK

#### Exigences de sécurité :

Ces exigences mettent en relief les dangers encourus lors de l'utilisation de l'appareil en vue de mieux protéger le patient.

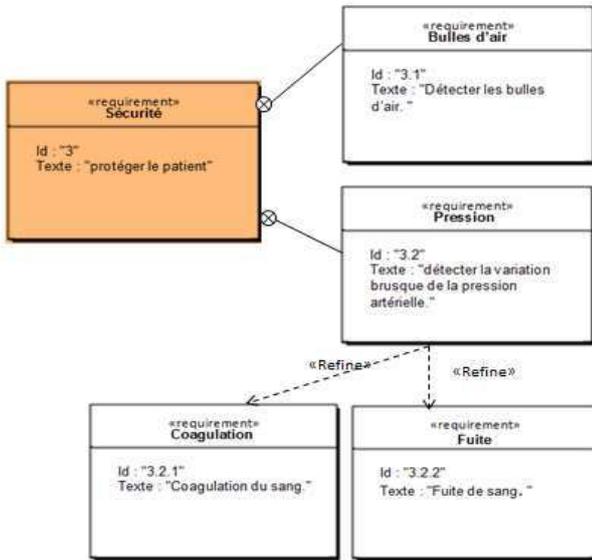


Figure 5 : Exigences de sécurité du MorWAK

**Exigences environnementales :**

Le respect de l'environnement est impératif, le dispositif doit produire moins de déchets solides et liquides.

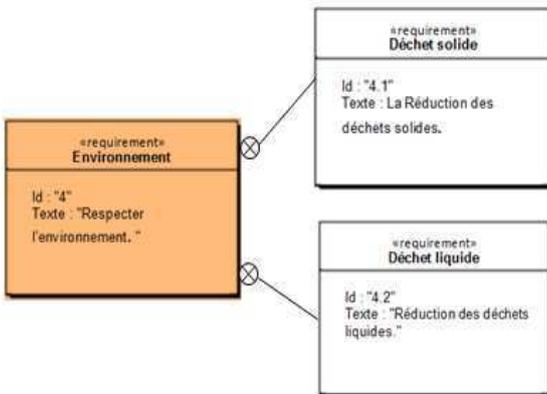


Figure 6 : Exigences environnementales du MorWAK

**Exigences énergétiques :**

La portabilité du MorWAK impose une meilleure gestion de l'énergie électrique. Les solutions technologiques ainsi adoptées ne doivent pas être gourmande en énergie.

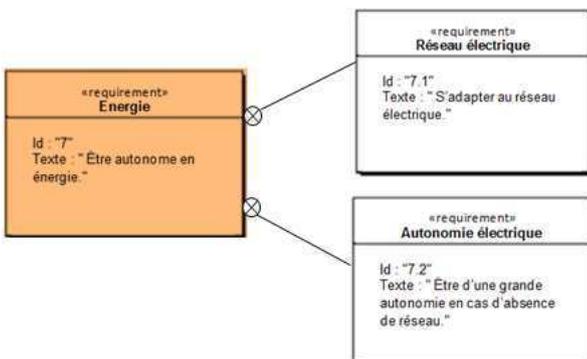


Figure 7 : Exigences énergétiques du MorWAK

**Exigences d'interface :**

L'utilisation d'un Interface Homme Machine (HMI) s'avère indispensable pour permettre une meilleure interaction avec le MorWAK.

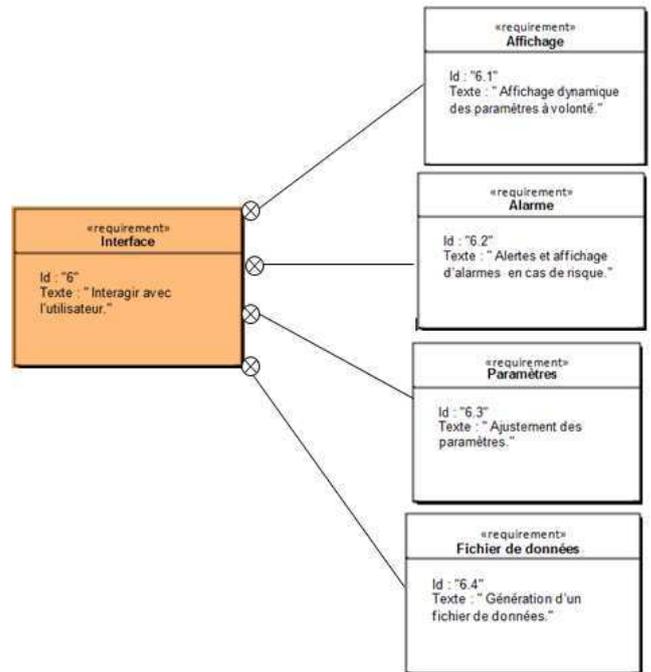


Figure 8 : Exigences d'interface du MorWAK

**Exigences pratiques :**

Les utilisateurs ne sont pas forcément des techniciens, il faut donc que le MorWAK soit simple d'utilisation et suffisamment intelligent pour gérer de manière autonome les situations à risque.

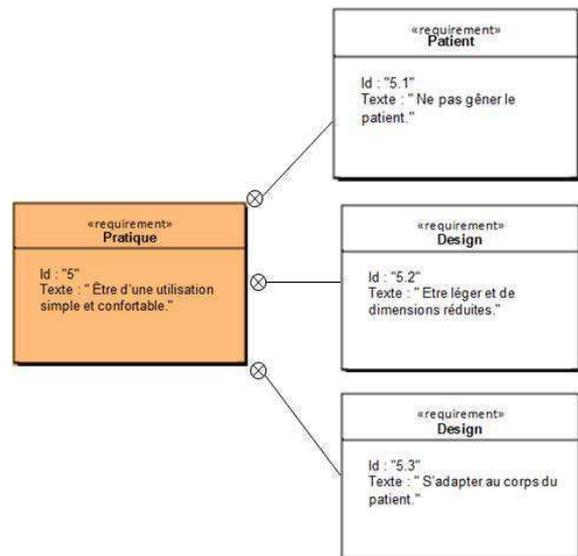


Figure 9 : Exigences Pratiques du MorWAK

**Exigences de marketing :**

Le cout de l'appareil et ses fonctions d'estime influenceront sa commercialisation. Une grande attention doit être apportée au choix des solutions technologiques.

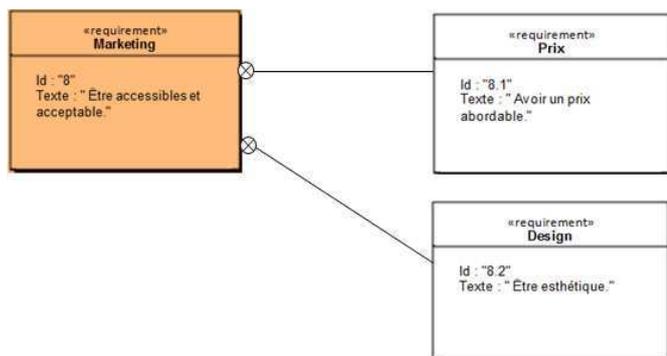


Figure 10 : Exigences de marketing du MorWAK

#### D. DIAGRAMME DES CAS D'UTILISATION

L'ensemble des fonctionnalités visibles de l'extérieur du MorWAK représente ses cas d'utilisation qui se résume en quatre grandes familles de fonctionnalités comme illustré dans la figure 11.

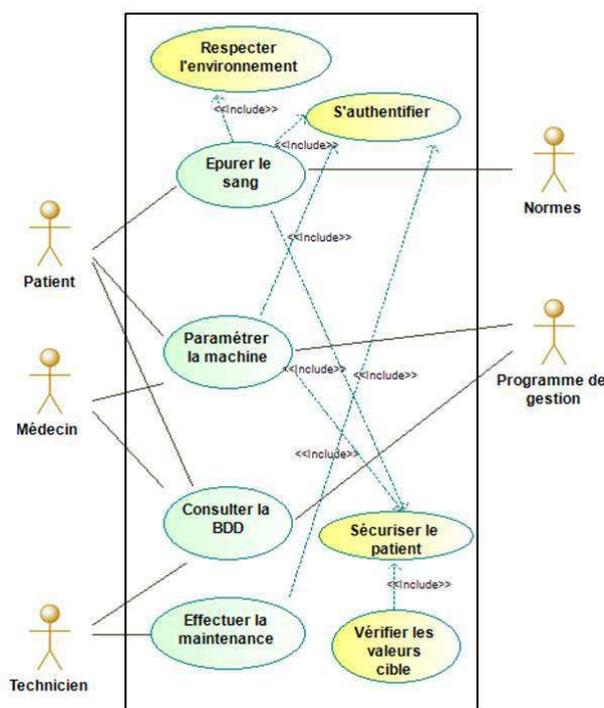


FIGURE 11 : DIGRAMME DES CAS D'UTILISATION DU MORWAK

### VI. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les premiers travaux de recherche de l'équipe ingénierie et Biomédical concerne la réalisation de recherches sur les moyens de contrôle volumique optimal et la portabilité en hémodialyse. Un premier brevet concernant un dispositif portable d'hémofiltration (MorWAK1) a été publié sous le numéro WO2016/072826A1 [12]. Un second brevet concernant un dispositif portable d'hémodialyse a été publié sous le numéro WO2017/164722 [4].

La caractérisation du MorWAK issue de l'étude critique des techniques actuelles d'épuration extracorporelle a été

couronnée par la réalisation d'un prototype satisfaisant le maximum d'exigences du cahier des charges fonctionnel. Des tests in vitro ont été réalisés sur des pochettes de sang bovin total en utilisant notre premier prototype, les résultats sont excellents et très prometteurs. Les essais animaux qui sont en phase de préparation permettront de tester la fiabilité, l'efficacité et les performances du MorWAK ainsi que l'exigence sécurité du patient.

### VII. CONCLUSION

L'approche ingénierie des systèmes adoptée dans cette étude a permis de décrire le système selon une approche fonctionnelle sous forme de graphiques (diagrammes SysML). La décomposition des exigences en macro exigences a simplifié la représentation du système. L'approche structurale permettra de définir l'architecture matérielle et logicielle globale du MorWAK sous une représentation arborescente des blocs ainsi que les flux des matières, d'énergie ou d'informations entre les blocs internes. L'approche comportementale quant à elle permettra de décrire les états et les transitions régissant les changements d'état ainsi que l'enchaînement des messages entre les acteurs et le MorWAK pour chaque cas d'utilisation. Ces deux approches feront l'objet de prochaines études.

### REFERENCES

- [1] K.Moqadem, "Aspects méthodologiques, mesure et facteurs associés à l'autonomie des patients utilisant les technologies de dialyse péritonéale à domicile," thèse.doctorat, Université de Montréal Faculté des études supérieures, Montréal, canada, mars, 2011.
- [2] N. Racine, B.Cantin, A.Ducharme, È.Gagné, F.Grenier, S.Kouz, S.Lepage, V.Nguyen, F.Philippon, and S.Rinfret "l'ultrafiltration appliquée au domaine de l'insuffisance cardiaque," La Direction des communications du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec.Rep. 978-2-550-51034-5, 2008.
- [3] RN Foley, PS Parfrey, MJ Sarnak, "Clinical epidemiology of cardiovascular disease in chronic renal disease," AMERICAN JOURNAL OF KIDNEY DISEASES., vol. 32, pp. S112–S119, Nov. 1998.
- [4] M.zamd, B.Ramdani, A.Ait taleb, A.Boualam, "DISPOSITIF PORTABLE POUR HÉMODIALYSE". Patent WO2017/164722, sept.28, 2017.
- [5] K.ishikawa, *Guide to Quality control*, Ed.IMPRINT, 1976.
- [6] R.tassinari, PRATIQUE DE L'ANALYSE FONCTIONNELLE, Ed., DUNOD, 2006.
- [7] P.Roques, *Modélisation de systèmes complexes avec SysML*, Ed. Eyrolles , 2013
- [8] P.Roques, *SysML par l'exemple - Un langage de modélisation pour systèmes complexes*, Ed. Eyrolles, 2009.
- [9] W.J. KOLFF"First clinical experience with the artificial kidney," Ann Intern Med, vol.62, pp. 608–619, 1965.
- [10] J.Olson, "DESIGN AND MODELING OF A PORTABLE HEMODIALYSIS SYSTEM," M. Eng. thesis, Georgia Institute of Technology, U.S, May. 2009.
- [11] P.Just, F. de Charro, E. Tschosik, L. Noe, S. Bhattacharyya1 and M. Riella"Reimbursement and economic factors influencing dialysis modality choice around the world,"Nephrol Dial Transplant, vol. 23,pp. 2365–2373, January.2008.
- [12] M.zamd, "DISPOSITIF PORTABLE POUR HEMOFILTRATION" patent WO2016/072826A1 nov. 03. 2014

# Le Comportement Thermique D'un Logement Mono-Orienté Cas D'Ain Malha à Alger.

Ahlam LAISSAOUI<sup>1</sup>, Soumia OUKACI<sup>2</sup>, Ismahan MAACHI<sup>3</sup>.

*Institut d'Architecture et d'Urbanisme, Université Saad Dahleb-Blida1,*

*<sup>1</sup>LTSM, Route de Soumâa, BP 270, 09000 Blida-Algérie*

<sup>1</sup>laissaoui.ahlem@gmail.com

<sup>2</sup>soumiaoukaci@yahoo.com

<sup>3</sup>nadji\_ismahen@yahoo.fr

**Résumé** \_ Le prototype mono-orienté du logement collectif a été réalisé afin de répondre aux besoins de la crise aigüe en matière de logement , une étude a été faite dont le but est d'étudier le comportement thermique du logement mono-orienté et de contribuer à l'amélioration de son efficacité énergétique, et qui comprend une modélisation thermique à l'aide d'un logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades+comfie 2.3, et une étude statique qui a permis de vérifier sa conformité par rapport au DTR(C3-2) pour le chauffage. D'après les résultats obtenus la mono orientation Sud est la plus favorable mais elle reste énergivore; après l'intégration des solutions passives : Isolation thermique et choix d'ouvertures performantes et l'addition de la végétation nous avons pu réduire jusqu'à 33% de la consommation énergétique.

**Mots clés** \_ logement collectif, mono-orientation, efficacité énergétique, isolation thermique, mur végétal.

## I. Introduction

Le souci de construire rapidement et en grande quantité pour atténuer les effets de la crise aigüe en matière de logements, a pour conséquence un écart important entre la qualité et la réalisation y compris les finitions et la durabilité; Dont le confort thermique souvent négligé par les concepteurs.

Vu l'absence du confort thermique dans les constructions Algériennes l'état élabore des réglementations dans le but de

favoriser la réduction de la consommation énergétique. Et pour atteindre celui-ci, il faut concevoir avec les concepts de la bioclimatique.

Parmi les enjeux majeurs de l'état la satisfaction des besoins en logement, l'amélioration du confort thermique et en même temps réduire la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment étant le secteur énergivore, la consommation d'énergie finale dans le secteur a été estimée à 41% a de la consommation totale du pays [1].

Selon notre constat en Algérie, la plupart des logements ont une seule orientation ce qui influence sur le confort thermique ainsi que la consommation énergétique dans le cadre de cette problématique; Une étude thermique a été faite dont le but est : d'évaluer le comportement thermique du logement mono-orienté collectif et améliorer son efficacité énergétique.

## II. Méthodologie du travail

Notre méthodologie consiste à faire :

-Une étude comparative entre différentes mono-orientations d'un logement collectif à travers une simulation thermique dynamique.

-Identification de la cellule la plus favorable.

-Une étude statique afin de vérifier sa conformité par rapport au DTR (C3-2) pour le chauffage.

-Intégration des solutions passives bioclimatiques (Isolation, choix d'ouvertures performantes et intégration de la végétation).

### A. Présentation du cas d'étude

Le projet est situé en Algérie à Ain Malha wilaya d'Alger, (Latitude:47° Longitude : 7.4 ° Altitude : 560m) [2].



Fig. 1. Plan de Masse.

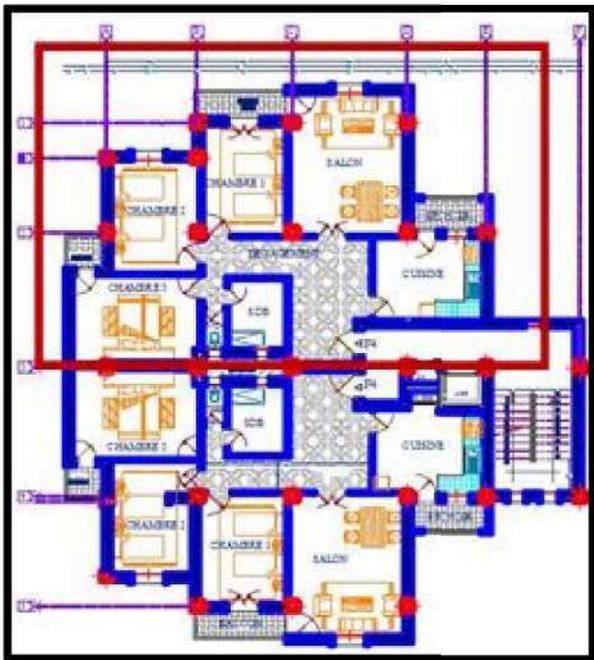


Fig. 2. Plan niveau +24 ,48m.

Le prototype étudié est un logement collectif mono-orienté type F4 d'une surface habitable de 104.15 m<sup>2</sup>, ce type a été construit sans prise en considération du confort thermique ainsi que la consommation énergétique.

### B. Modélisation thermique dynamique

La simulation numérique a été faite à l'aide du logiciel PLEIADES+ COMFIE (version 2.3), le logiciel repose sur son moteur de calcul Comfie développé par le laboratoire des Mines de paris, Il calcule de façon précise et rapide les flux des zones thermiques à partir du descriptif du bâtiment, de son environnement et des occupants [3].

Tableau I.

Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs

REPRESENTATION	MUR EXTERIEUR EN BRIQUE CREUSE AVEC ISOLATION
COMPOSITION DU MUR EP. [CM].	Mortier de ciment1 Brique creuse 15 Lame d'air 5 Brique creuse 10 Mortier de plâtre 1
$R=e/\lambda$ [m <sup>2</sup> .c°/w]	0.57
$K=1/R$ [w/m <sup>2</sup> °C]	1.75

## III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### A. La Comparaison des différentes mono-orientations

#### 1) Période hivernale

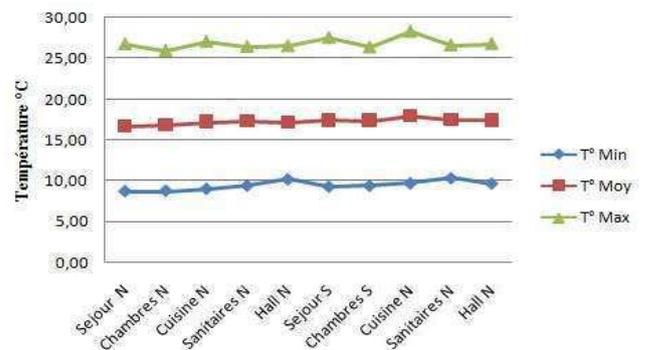


Fig.3. Visualisation graphique des températures

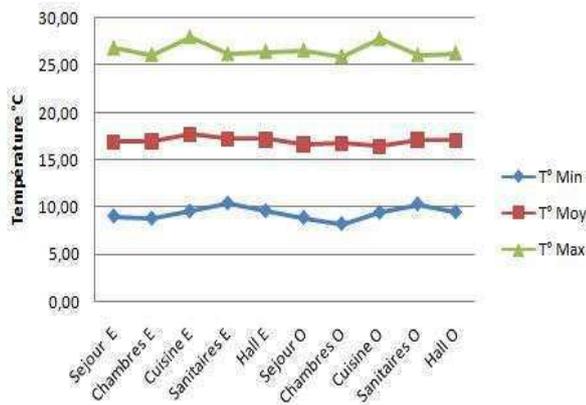


Fig.4. Visualisation graphique des températures

1) Période estivale

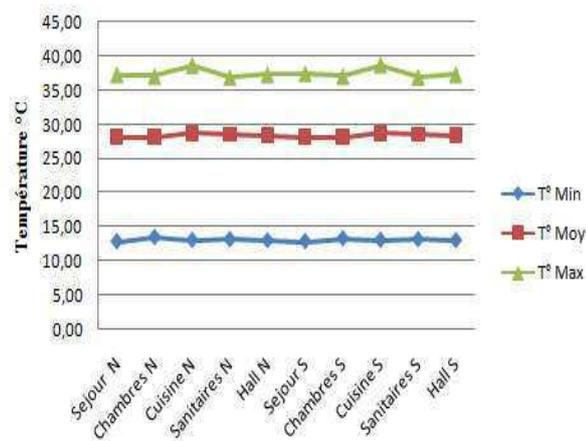


Fig.5. Visualisation graphique des températures

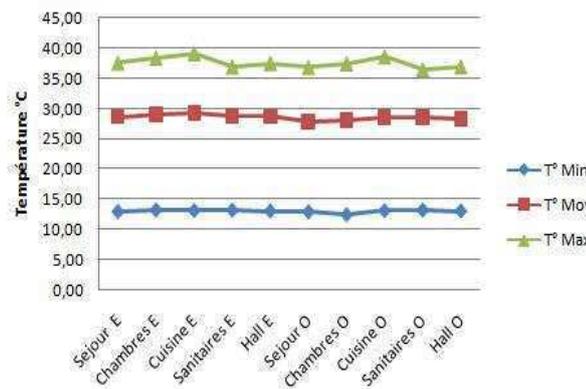


Fig.6. Visualisation graphique des températures

D'après les résultats obtenus, on constate que la température à l'intérieur des zones de confort pour les quatre mono-orientations : nord, sud, est et ouest n'est pas conforme

aux normes de la température du confort (20°-24°) ce qui impose l'inconfort.

B. Intégration de la consigne de thermostat

1) Résultat de simulation des logements

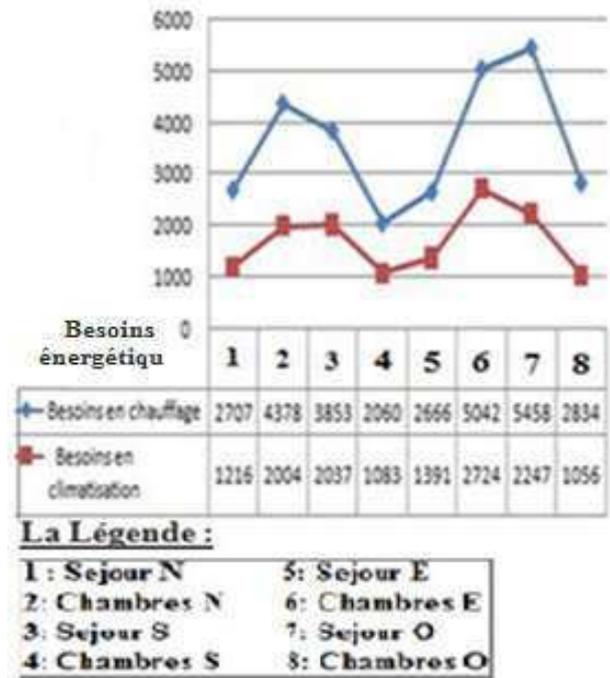


Fig.7. Visualisation graphique des besoins énergétiques

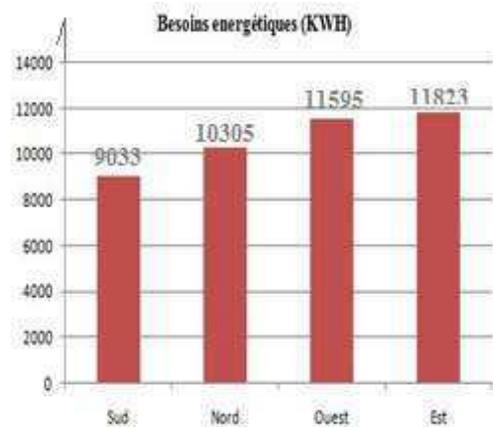


Fig.8. Comparaison des Besoins Energétiques/An.

D'après les résultats obtenus; on constate que les besoins énergétiques du logement mono-orienté Sud sont estimés a 9033 KWH/An et sont moins importants que ceux des autres logements mono-orientés (voir fig.8); mais il ressort que la

consommation énergétique pour atteindre le confort est très importante.

Nous avons déduit que la mono-orientation **Sud** reste la plus confortable par rapport aux autres cependant ; elle reste insuffisante du point de vue de la consommation énergétique, dont le but d'améliorer l'efficacité du logement nous avons introduit une **hypothèse opérationnelle** *L'Isolation thermique* additionnée à une mono-orientation favorable permet de réduire la consommation énergétique.

#### Etude statique

Cette étape comprend une étude comparative entre le logement avant et après le renforcement de l'enveloppe extérieure, la vérification de la conformité a été faite à l'aide du (DTR C 3 2) pour le chauffage.

**Tableau II.**

Comparaison des résultats obtenus

LOGEMENT	LOGEMENT NON ISOLE
Déperditions (w/°c)	258.06 (DT≤ 210.98)
Vérification a la conformité	Résultat non vérifié

D'après les résultats obtenus, le logement n'est pas conforme au DTR C 3.2 pour le chauffage.

#### C. Intégration de l'isolation thermique avec choix d'ouvertures performantes

Notre choix s'est porté sur l'utilisation de la *laine de Roche* qui est une isolation écologique qui présente des avantages par ses caractéristiques : Etanche à l'air, sa résistance thermique égale à R: 0.04 m2.c°/w. pour la mise en œuvre nous avons opté sur un choix d'une isolation intermédiaire qui permet de préserver les surfaces habitables [4].

**Tableau III.**

Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs après renforcement de l'isolation

REPRESENTATION	MUR EXTERIEUR ISOLE
COMPOSITION DU MUR EP. [CM]	Mortier de ciment 1 Brique creuse 15 Laine de roche 7 Brique creuse 10 Mortier de plâtre 1
$R=e/\lambda$ [m2.c°/w]	2.31
$K=1 / R$ [w/m2°C]	0.43

L'utilisation des parois de forte résistance thermique ainsi que le choix d'ouvertures performantes permet de limiter les déperditions calorifiques et par conséquent réduire la consommation énergétique.

**Tableau IV.**

Comparaison des résultats obtenus

LOGEMENT	LOGEMENT NON ISOLE	LOGEMENT ISOLE
Déperditions (w/°c)	258.06 (DT≤ 210.98)	108.86 (DT≤ 210.98)
Vérification a la conformité	Résultat non vérifié	Résultat vérifié

Après la vérification des déperditions calorifiques du logement par rapport aux déperditions de référence selon le DTR C3-2, nous avons trouvé que le logement est devenu conforme suite à l'intégration de l'isolation et d'ouvertures performantes.

Afin d'étudier le comportement thermique de notre cas d'étude après renforcement de l'isolation, on a opté pour la modélisation thermique dynamique.

**Résultats obtenus**

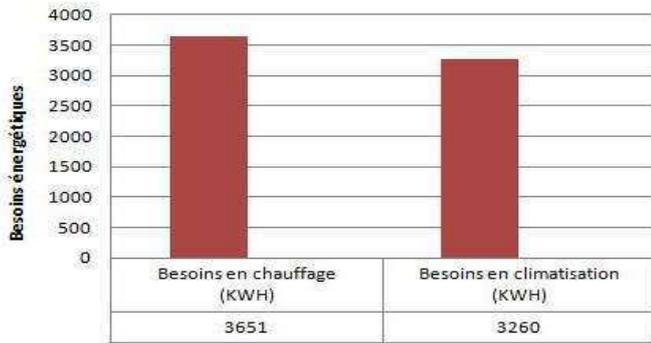


Fig.9. Comparaison des Besoins Energétiques.

Selon les résultats obtenus nous avons constaté qu’à travers l’intégration d’une isolation thermique et choix d’ouvertures performantes, nous avons pu garantir le confort, et réduire la consommation énergétique en chauffage et climatisation de notre cas d’étude jusqu’ à **23.5 %**. Mais la consommation énergétique en climatisation reste une problématique en été ; à cet effet nous avons proposé l’intégration de la végétation.

**D. Intégration de la végétation:**

Nous avons opté pour l’intégration de la végétation dans la paroi sud dont le but de minimiser les apports solaires durant la période estivale.

**1) Résultatsobtenus**

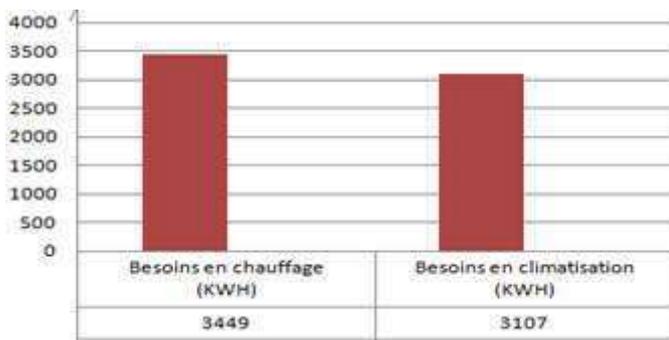


Fig.10. Comparaison des Besoins Energétiques.

Selon les résultats obtenus, on constate que la consommation énergétique a diminué par rapport à la simulation précédente.

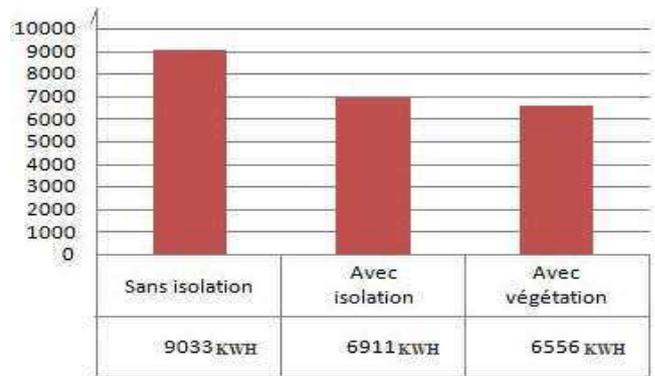


Fig. 11. Comparaison des Besoins Energétiques/An.

Grace à l’intégration de la végétation dans la paroi sud du logement, nous avons pu améliorer le confort durant la période estivale et réduire la consommation énergétique de notre cas d’étude jusqu’au **33%**.

**IV. CONCLUSION**

A travers cette étude nous avons déduit que la mono orientation sud est la plus favorable mais reste énergivore, cependant le renforcement de l’enveloppe extérieure par une isolation thermique et choix d’ouvertures performantes, nous a permis de réduire la consommation énergétique jusqu’à **33%** par rapport au logement mono-orienté mal isolé. Le traitement de l’enveloppe extérieure est une solution adéquate pour améliorer son efficacité énergétique qui peut être optimisée par l’addition de la végétation.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1]-l’aprue Bulletin trimestriel, Programme triennal d’efficacité énergétique” 2011-2013” revue des r énergies renouvelables septembre 2010.  
 [2] : Météonorm 7.  
 [3] : IZUBA Energie  
 [4] : Ministre de l’Habitat Document technique réglementaire (D .T .R .C 3- Document technique réglementaire, Le Fait à, le 10 Chaâbane 1418 correspondant au 10 Décembre 1997 Alger  
 [5]: Guide pratique ADEME, L’Isolation thermique une maison plus hermétique)

## LISTE DES ACRONYMES

**DTR** : Document Technique Réglementaire.

**Ep.** : Epaisseur en centimètre.

**R**: Résistance thermique [ $m^2 \cdot c^\circ/w$ ].

**K**: Coefficient du mur [ $w/m^2^\circ C$ ].

**$\lambda$**  : Conductivité thermique [ $J/Kg^\circ C$ ].

# Caractérisation expérimentale d'un béton soumis à hautes températures par analyse vibratoire

BENOUDJAFER imane<sup>#1</sup>, LABBACI Boudjemaa<sup>\*2</sup>, BENOUDJAFER ibtissam<sup>#3</sup>

*#Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Tahri Mohammed, Béchar, Algérie*

*<sup>1</sup>imenousse@yahoo.fr*

*<sup>3</sup>benoudjafer.ibtissam@gmail.com*

*\* Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Tahri Mohammed, Béchar, Algérie*

*<sup>2</sup>labbaci@yahoo.fr*

**Abstract**— Cet article a pour objectif de proposer un moyen non destructif d'identification simple et peu coûteux, d'une mise en oeuvre rapide, permettant de caractériser le comportement mécanique du béton ayant subi des températures élevées jusqu'à 600°C, à partir d'analyse mécanique vibratoire. Cette caractérisation repose sur l'utilisation de plusieurs dispositifs expérimentaux, et conduit à l'extraction des paramètres modaux à partir de l'analyse des FRF et des modes de résonance d'une structure. Plusieurs méthodes expérimentales, dont certaines reposent sur l'analyse des fréquences de résonance de la structure, ont été utilisées. Une synthèse des données récoltées durant cette étude montre que l'approche proposée est efficace.

**Keywords**— béton, température, analyse vibratoire, non destructif, mécanique.

## I. INTRODUCTION

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Chaque année, le nombre de mètres cubes de béton mis en oeuvre dans le monde est égal à la population de la planète. Depuis la construction la plus modeste jusqu'aux ouvrages d'art les plus hardis, en passant par les bâtiments de grande hauteur et les travaux publics (immeubles d'habitation, ponts, tunnels, aéroports, barrages, ports, etc.), le béton est employé sur tous les continents et sous toutes les latitudes.

En effet, les essais de laboratoires sont habituellement effectués à une température contrôlée, normalement constante, généralement choisie entre 20 et 25°C, de sorte que la plupart des informations de base sur les propriétés des bétons durcis sont fondées sur le comportement du béton à ces températures [1,2]. Cependant, en pratique, les ouvrages en béton sont toujours susceptibles d'être soumis à un gradient de température : pour des raisons fonctionnelles (ouvrages subissant normalement des gradients élevés en service), climatiques (variation quotidienne et saisonnières), accidentelles (incendies, chocs techniques) et en fin particulières (démolition partielles ou locale par procédé thermique) [3].

Par conséquent, le béton demeure en pratique à différentes températures, ce qui implique une réflexion sur l'opportunité de l'état des ouvrages portés aux différents gradients thermiques et sur la notion de risque lié à leur maintien dans les conditions fonctionnelles qu'il rencontre dans le temps. La connaissance de l'état des ouvrages et leur évaluation est donc un enjeu majeur pour décider des interventions de réparation et pour en évaluer le rapport coût / utilité. C'est pourquoi, une gamme d'essais in situ, appelés essais en place, a été développée. Ces essais sont traditionnellement appelés essais non destructifs, étant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure, sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence [4]. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps. L'utilisation d'essais non destructifs entraîne une plus grande sécurité et une meilleure planification de la construction, de sorte que l'on peut progresser plus rapidement et plus économiquement [5].

C'est dans ce contexte de besoins de connaissances, d'une part, des données sur le comportement du béton porté en température pour la prévision de la sûreté des bâtiments et des constructions en réponse à certains accidents ou à états particuliers durant son fonctionnement, et d'autre part, de l'évolution des caractéristiques intrinsèques du matériau béton et de celle de l'évolution générale des ouvrages, qu'émergent et s'affirment les techniques non destructives de contrôles. Ce qui rend possible l'étude des variations d'une ou plusieurs propriétés dans le temps. Le contrôle non destructif offre également la possibilité d'évaluer la qualité d'un béton dans une structure existante et suivre la santé du béton dans le temps. Ce travail a donc pour objective principale de proposer un moyen de caractérisation rapide du comportement mécanique du béton à haute performance ayant subi des températures élevées jusqu'à 600°C, à partir d'analyse mécanique vibratoire.

## II. PROCEDURE EXPERIMENTALE

### A. Principe de la caractérisation expérimentale

La caractérisation expérimentale s'appuie sur l'extraction des fréquences propres obtenues expérimentalement par l'analyse vibratoire. La méthode de mesure consiste à mettre un échantillon de même type et les mesures dynamiques sont réalisées après excitation de l'échantillon par marteau d'impact et la réponse est captée par un capteur type accéléromètre. Le modèle analytique de Bernoulli-Euler est exploité pour déduire la valeur du module d'élasticité à partir de la valeur expérimentale de la fréquence propre.

Ces valeurs des modules d'élasticité sont utilisées pour calculer numériquement les fréquences propres qui seront confrontées aux valeurs expérimentales. Le principe du banc expérimental utilisé pour réaliser des essais dynamiques est simple. Il comprend une chaîne d'acquisitions permettant d'enregistrer les signaux d'excitations et de réponses de l'échantillon étudié. Ces signaux seront par la suite traités et analysés par une carte d'acquisition et un logiciel de traitement.

La chaîne d'acquisition PULSE est pilotée par un ordinateur, permettant l'enregistrement des signaux issus de l'accéléromètre et du capteur de force monté sur le marteau d'impact (Figure 1). La gestion de la chaîne d'acquisition comporte sommairement les fonctions suivantes :

- ✓ Lancement du programme de gestion de la chaîne d'acquisitions PULSE ;
- ✓ Fixation des paramètres de configuration ;
- ✓ Vérification et modification de la configuration d'acquisitions (acquisition, mesure, FFT, calibration, display) ;
- ✓ Réalisation d'une mesure ou d'une série de mesure (FRF).



Figure 1 Banc d'essai utilisé

(a) Vue générale de matériel utilisé, (b) Chaîne d'acquisition PULSE, (c) Connecteurs, (d) Marteau d'impact, (e) accéléromètre piézoélectrique

### B. Matériaux utilisés

Deux classes de granulats sont utilisées pour la composition des BHP : du sable (0/4) et des gravillons (4/12). Des essais ont été réalisés afin d'accéder aux masses volumiques [NF P 18-305] et le module de finesse de sable. Le taux d'absorption d'eau par les granulats à saturation a été obtenu en suivant l'évolution de la masse des granulats. L'ensemble des caractéristiques physiques des granulats est résumé dans le tableau 1. La Figure 2 correspond aux diffractogrammes obtenus par diffraction des rayons X d'une poudre des granulats sable et gravier respectivement. Les spectres montrent la présence des pics relatifs à l'élément silice (SiO<sub>2</sub>) et l'absence des pics caractérisant le carbonate de calcium (CaO<sub>3</sub>), d'une absence qui peut être attribuée à la faible proportion du CaO<sub>3</sub> présent dans la prise d'essai.

TABLE 1.

CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS

parameters	Sable	Gravillon
Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1580	1340
Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )	2610	2490
Compacité (%)	69	55
Porosité (%)	31	45
Coefficient absorption d'eau (%)	/	2.1
Module de finesse	2.45	/
Coefficient d'Hazen	3.74	1.42

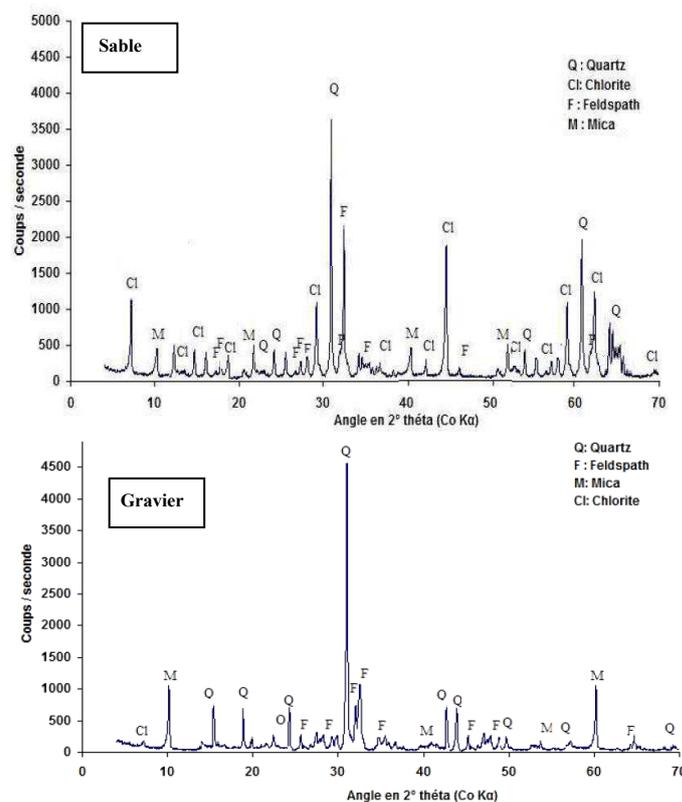


Figure 2 Diagrammes diffractométriques des granulats utilisés

Un seul type de ciment a été utilisé dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'un ciment Portland CPA CEM I 52,5N de prise moyenne. Des essais de prise [EN 196-3] et de résistance à la compression mécanique ont été, également, réalisés sur la pâte de ciment et sur le mortier normalisé [EN 196-1] afin de vérifier la qualité du ciment employé [EN 196-3].

### C. Caractéristiques du béton d'étude

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé de béton ayant des caractéristiques proches de celles des bétons couramment utilisés dans des ouvrages ayant subi des situations extrêmes (incendie). Pour ce faire, la composition est basée sur un béton à haute performance d'une résistance en compression de 80 MPa, ayant une porosité atteignant 10 % et une bonne ouvrabilité, ce qui correspond, selon la norme [NF EN 206-1], à un béton fluide (classe S5). Un tel béton peut être susceptible d'être sensible à l'éclatement sous l'action de la température. Afin d'améliorer la granulométrie des mélange, de réduire de la porosité des matériaux durcis et augmenter leurs résistances mécaniques, nous avons maintenu dans le BHP élaboré, une quantité de fumée de silice en poudre égale à 21,6 Kg/m<sup>3</sup>. Des fibres de polypropylène de type monofilaments ont été utilisées (dosage 1.5 Kg/m<sup>3</sup>), caractérisant par une température de fusion de l'ordre de 170°C. L'ajout de ces fibres à la composition des bétons améliore ses propriétés de transfert (perméabilité, porosité) [6] et réduit voire annule le risque d'instabilité thermique du matériau, par la réduction de la pression interne dans le réseau poreux [7]. Dans un souci d'amélioration de la fluidité et la maniabilité du béton, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteurs empêchant la floculation des grains de ciment, ce phénomène est favorable à la réactivité.

Pour chaque gâché les grandeurs suivantes ont été déterminées dans chacune des formulations : la consistance ou l'ouvrabilité du béton, la teneur en air occlus et la masse volumique expérimentale. La consistance du béton a été déterminée par la mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS selon la norme [NF EN 206-1]. La mesure de l'air occlus été faite à l'aide d'un aéromètre à béton de six litres avec pompe intégrée et manomètre pour lecture directe du pourcentage d'air, conformément aux prescriptions de la norme [NF P 18-353]. La mesure de la masse volumique réelle du béton frais permet de déterminer son rendement volumique et de vérifier la validité de la formulation théorique [NF EN 12350-7]. Elle a été déterminée à l'aide de la chambre inférieure de l'aéromètre. Les résultats obtenus montrent que le béton formulé est un béton fluide présente des caractéristiques à l'état frais favorables répondant aux exigences de normes en vigueur [NF P18 301].

Avant chaque essai, les extrémités des éprouvettes cylindriques ont été rectifiées par une rectifieuse des éprouvettes, selon la norme [EN 12390-2]. Cette rectifieuse est pourvue d'une protection anti-arrosage, d'un bac de

décantation avec pompe, Figure 3. Des dispositifs de fixation de cube et de cylindre sont également disponibles. Le dispositif permettant la rectification d'extrémités d'éprouvettes peut être aisément monté sur la machine. Ce traitement permet de s'assurer d'une bonne planéité des surfaces de contact et de leur orthogonalité à la génératrice principale de l'éprouvette.

L'essai de compression a été évalué suivant la norme [NF EN 12390-3], à l'aide d'une presse d'une presse hydraulique, asservie en force, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance à la traction a été obtenue par l'essai de fendage (brésilien). Elle a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques du même type que celles utilisées pour l'essai de compression (16Φ32 cm) à 28 jours. Le principe c'est d'appliquer un effort de compression induit, le long de deux génératrices opposées [NF P 18-408], des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. L'éprouvette est placée à l'horizontale entre les plateaux de la presse et la charge est augmentée jusqu'à la rupture par traction indirecte, qui apparait sous forme de fendage le long du diamètre vertical du cylindre.

La méthode d'auscultation, non destructive et simple, a été utilisée pour l'évaluation de la qualité du béton. L'appareillage de mesure est constitué d'un générateur d'onde, d'un oscilloscope pour la lecture du temps de transit d'onde, d'un dispositif de serrage et de deux transducteurs. Le principe générale est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propagent dans le milieu testé en transmission, en réflexion, ou à la surface. Un agent couplant de faible viscosité a été utilisé pour assurer un bon couplage entre le transducteur et le matériau, ce qui peut dégrader la répétabilité des mesures et allonger le temps de mise en place de la mesure.



Figure 3 Essais mécanique

### III. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les représentations temporelles de l'excitation, pour les variétés des poutres en béton testées portées en températures de (20°C), (120°C), (400°C) et (600°C) sont montrées dans la Figures 4.

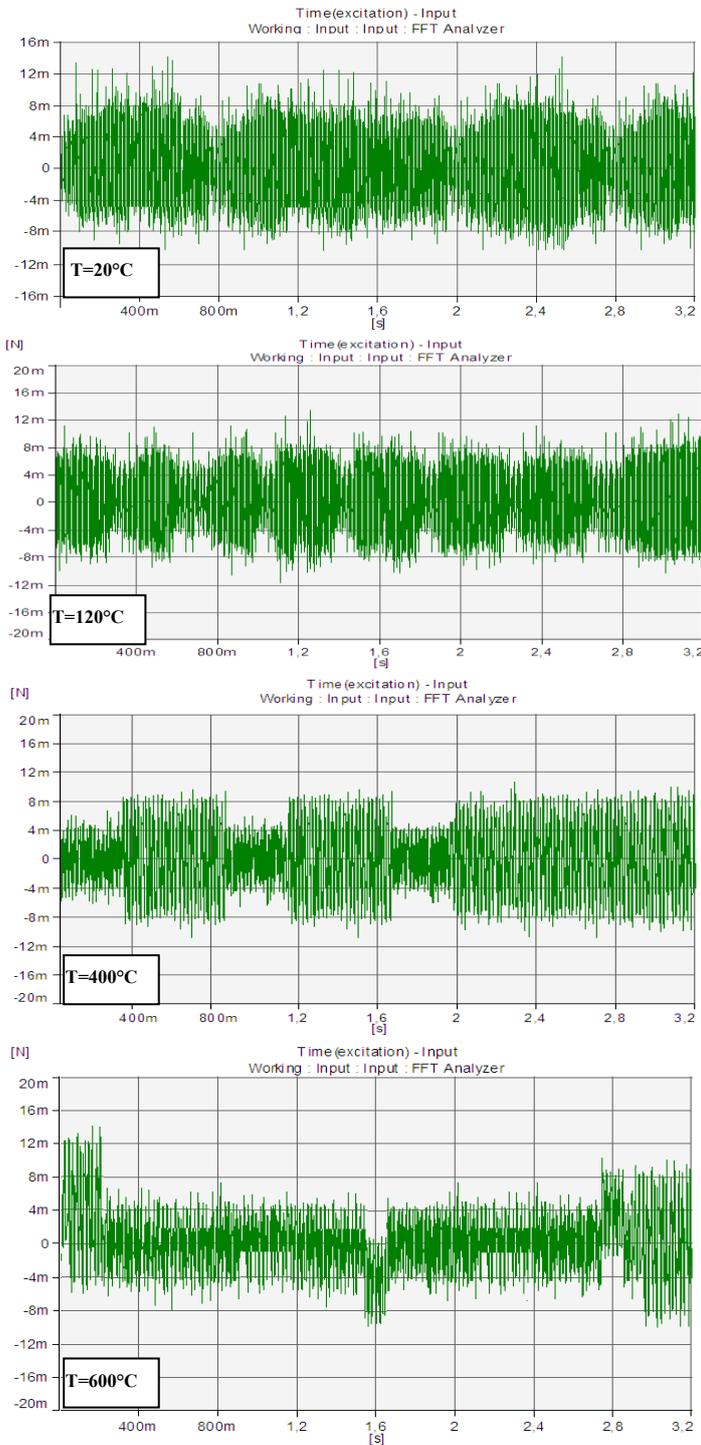


Figure 4 : Représentation temporelle de l'excitation

Les résultats expérimentaux de l'évolution de la fréquence propre pour le béton testé, en fonction de la température, allant de (20°C jusqu'à 600°C), sont illustrés dans les graphes de la Figure 5.

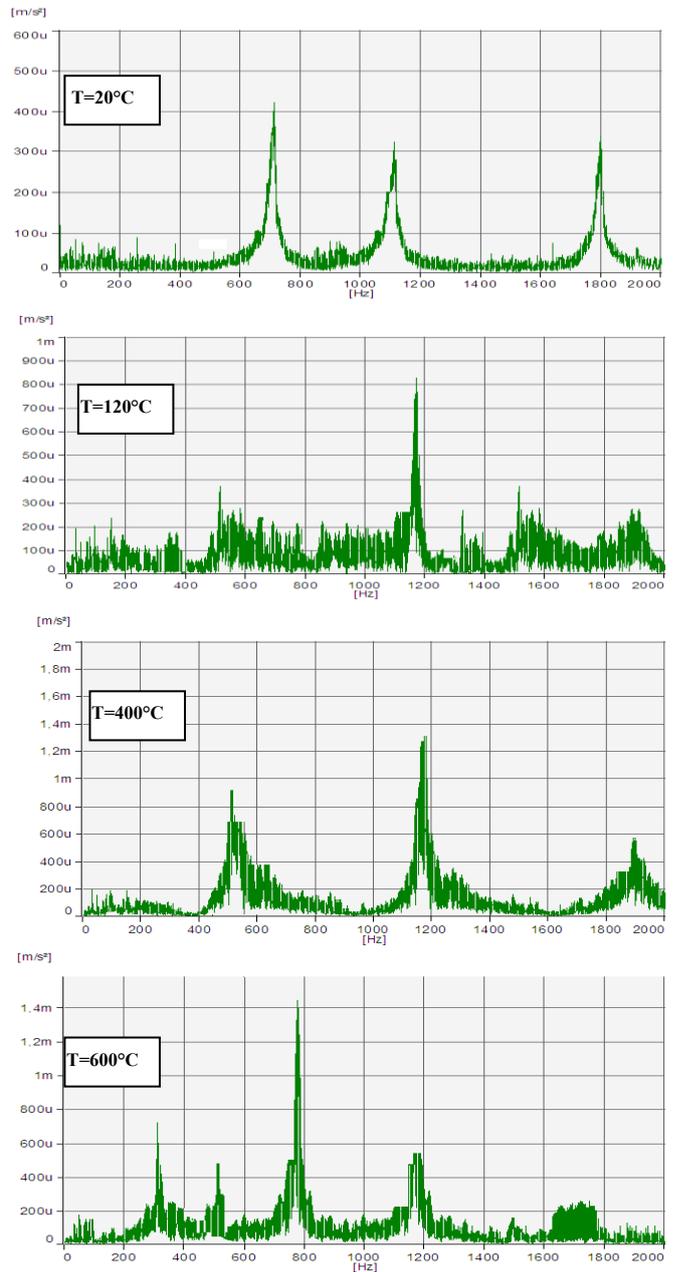


Figure 5 : Représentation temporelle de l'excitation

Il est clair d'observer que le béton testé enregistre des fréquences inférieures que celle mesurée à température de référence. De façon générale après l'exposition à la température, les courbes de la fréquence propre sont décalées par rapport aux valeurs obtenues pour l'échantillon témoin. Nous pouvons observer aussi une augmentation de l'intensité des pics sur les courbes réalisés pour les échantillons portés

en température. Les modules d'élasticité déduits de l'analyse vibratoire sont consignés dans le Tableau 2. Les valeurs des modules d'élasticité et des modules d'élasticité relatifs, définis comme les rapports des modules d'élasticités sur le module d'élasticité déterminé à T=20°C, sont regroupés sur les Figure 6 et 7 respectivement .

TABLE 2.  
 MODULE D'ELASTICITÉ DU BETON

Température (°C)	Module d'élasticité (GPa)	Module relatif (%)	Ecart (%)
20	45.35	100.00	00.00
120	32.72	72.15	-27.85
400	19.87	43.81	-56.19
600	14.64	32.28	-67.72

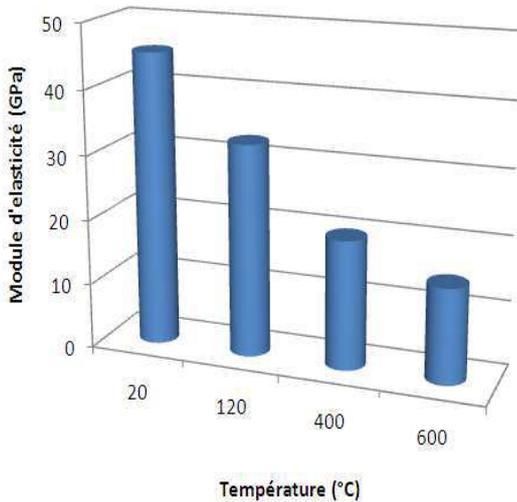


Figure 6 Module d'élasticité déduit de l'analyse vibratoire

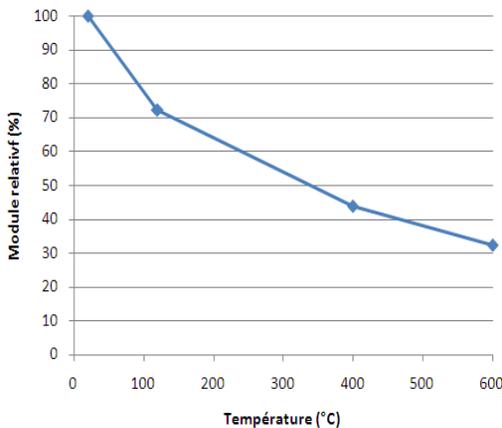


Figure 7 Module d'élasticité relatif déduit de l'analyse vibratoire

A partir de ces Figures, nous pouvons observer que l'évolution du module d'élasticité varie selon la marge de température, par laquelle le béton est soumis. Cette variation comprend principalement deux phases :

Dans la phase (I), entre 20°C et 120°C, nous notons une diminution du module d'élasticité d'environ 28%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par l'effet de déshydratation de l'ettringite qui peut entraîner une détérioration du matériau. Puis, dans la phase (II) entre 120°C et 600°C, nous observons une diminution progressive du module d'élasticité au cours de l'échauffement du matériau, ce qui traduit par une décroissance de la pente des courbes de l'écart avec la température. A 400°C, une réduction maximale du module d'environ 57% est enregistrée. Dans la suite le module diminue atteignant d'environ 68% à 600°C. Cette diminution peut avoir comme origine la décomposition du gel CSH avec la formation de  $\beta$ -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques.

Afin de comparer les résultats expérimentaux du module d'élasticité, nous avons regroupé sur la Figure 8 ses valeurs déterminées par les deux méthodes présentées auparavant, avec l'erreur relative en pourcentage.

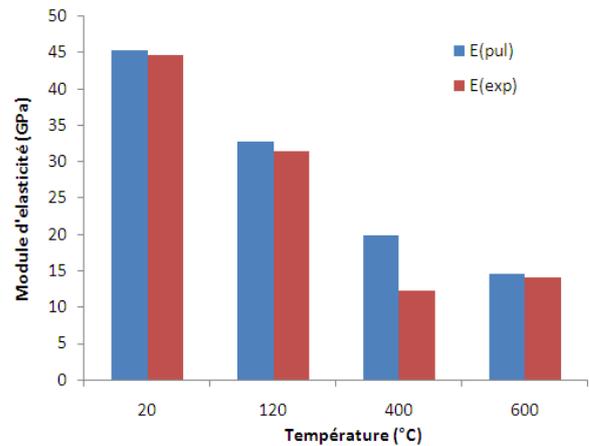


Figure 8 Comparaison (vibration- expérimentale) de l'évolution de module élastique avec la température

L'analyse comparative des résultats expérimentaux de module d'élasticité nous a permis de faire les observations suivantes :

- ✓ Quelque soit la température de mesure, nous pouvons observer que le module d'élasticité obtenu par l'analyse vibratoire, est nettement supérieur que celui déterminé par l'ultrason. L'origine responsable de cette augmentation n'est pas assez compréhensible, mais probablement elle est liée à la gamme de fréquence différente pour chacune de méthode utilisée, les modalités d'essais distincts et la réponse de l'échantillon testé avec la méthode utilisée.

- ✓ L'erreur enregistrée entre les deux modules d'élasticité, durant la variation de la température (de 20°C à 600°C), est acceptable. Cependant à 400°C. l'erreur est de l'ordre de 16% ce qui n'est pas admissible. Ceci est vraisemblablement dû à l'existence d'erreur de mesure expérimentale, de modèle analytique utilisé, s'appuyant sur la simplification des hypothèses qui ne correspondent pas à la réalité du matériau béton. Ces résultats montrent que les modules d'élasticités, déterminés par les deux méthodes expérimentales sont proches.

#### IV. CONCLUSION

L'utilisation des bétons à haute performance a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Grâce à la grande durabilité et les qualités rhéologiques remarquables, son l'emploi se développe fortement [8]. Cependant, lorsqu'il est soumis à des hautes températures comme lors d'un incendie, ce béton peut présenter des écaillages, des éclatements voire manifester un comportement explosif [9]. Durant ces dernières années de nombreuses recherches ont été entreprises pour comprendre le comportement du béton à haute température. Cette étude expérimentale contribue à ces recherches. Nous avons présenté dans ce travail une approche basée sur une analyse vibratoire pour la caractérisation expérimentale, permettant d'étudier l'évolution du comportement mécanique des bétons sous l'effet de la température. Cette analyse repose sur l'utilisation d'une chaîne d'acquisition permettant d'identifier les paramètres modaux à partir de l'analyse de la réponse fréquentielle (FRF) [10,11,12] et des modes de résonance du béton testé.

En perspective, il est envisageable à court terme l'extension du programme expérimental pour impliquer :

- ✓ d'une part, de prendre en considération tous les paramètres permettant de fournir des informations nécessaires, lors de l'analyse vibratoire, concernant la localisation de l'endommagement durant la variation de la température. Il a été constaté une sensibilité notable du mode, observée en fonction de la nature du béton étudié et la température par laquelle il est soumis, ce qui nécessite la connaissance avec précision, de l'emplacement de l'endommagement. Pour cela, il serait très intéressant et utile d'identifier les déformées propres associées aux fréquences afin de suivre et détecter l'endommagement causé durant l'exposition à la température.

- ✓ et d'autre part d'autres paramètres concernant les granulats (forme et texture des granulats, liaison, résistance et résistivité, porosité et absorption des granulats), de la résistance du béton (rapport eau/ciment, quantité d'eau efficace dans un béton, rapport gel/vidé, porosité, rapport granulat/ciment, maturité et l'âge du béton). Aussi quelques aspects du béton durci (mûrissement du béton, variation de la résistance du ciment, modification des propriétés du ciment, propriétés électriques et acoustiques du béton), et quelques

facteurs de durabilité (influence du réseau poreux, perméabilité, diffusion, résistance au agent agressifs, aux ambiances climatiques sévères et à la fatigue).

#### REFERENCES

- [1] A.M Neville, *Propriétés des bétons*, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, Eyrolles, 2000.
- [2] P.Acker, J. Torrenti, et F. ULM, *Comportement du béton au jeune âge*, LAVOISIER, ISBN 2-7462-0980-2, 2005.
- [3] L. Basheer , P. Basheer , ET A. Long , *Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete*, Construction and Building Materials, 2015, 19, no. 9(9), 682-690.
- [4] V.Garnier , J.F Chaix., G. Corneloup, *Caractérisation non destructive du béton par analyse d'ondes ultrasonores* , Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 239:105–118, 2012.
- [5] H. Nechad, *Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : estimation de la durée de vie restante*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014.
- [6] Alarcon-ruiz, L., C. Gallé , E. Massieu, , *Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température* , Matériaux 2002, Tours.
- [7] T.Akçaoglu, M. Tokyay, et T. Çelik , *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*, Cement and Concrete Composites, 2004, 26(6), 633-638.
- [8] Y. Malier, *les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, applications*, Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1992.
- [9] A. Pierre-Claude, *Bétons haute performance*, Eyrolles, 2001.
- [10] R. Caracciolo, A. Gasparetto, M. Giovagnoni, An experimental technique for complete dynamic characterization of a elastic material. Journal of Sound and Vibration, 272:1013–1032, 2013.
- [11] P. Avitabile , *Experimental modal analysis : a simple non-mathematical presentation* , Sound and Vibration Magazine, 2000.
- [12] C. Bertrand , *Vibrations des structures pour l'ingénieur et le technicien : théorie et applications*, Ellipses, Lausanne, 2009.

# Etude de la texture et des propriétés mécaniques et électriques des fils de cuivre tréfilés et recuits

F. Baira<sup>1,2</sup>, M.Zidani<sup>2</sup>, T. Baudin<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Departement De Sciences et techniques, Université de Batna 2, 53, Route de Constantine. Fésdis, Batna 05078, Algérie, Baira\_fay@yahoo.fr

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux (LGEM), Université de Biskra, B.P: 145 Biskra, 07000 Algérie.

<sup>3</sup>ICMMO, SP2M, Univ Paris-Sud, Université Paris-Saclay, UMR CNRS 8182, 91405 Orsay Cedex, France

**Résumé**—Le constate dans cette étude et l'augmentation de l'essai de la microdureté et la résistivité électrique, avec l'augmentation du taux de déformation. On a remarquée une diminution de ces dernier avec l'effet de traitement thermique. L'analyse de la tailles des grains montre une diminution avec l'augmentation du taux de déformation et l'effet du traitement thermique conduit à une homogénéisation des tailles des grains à fort taux de déformation et long durée de maintien de recuit, l'étude de la texture de recristallisation montre que l'état tréfilé et recuit se compose de même renforcement que le fil machine fibre  $\langle 111 \rangle // DN$  et  $\langle 001 \rangle // DN$ . On observe aussi après recuit une forte diminution de l'intensité de la fibre  $\langle 111 \rangle // DN$  majoritaire à l'état tréfilé. En revanche, la fibre  $\langle 001 \rangle // DN$  reste stable.

**Mots Clés**—Tréfilage, La Microdureté, EBSD, Recristallisation, traitement de recuit.

## 1. 1. INTRODUCTION

Le principe de tréfilage est basé sur l'utilisation de la plasticité du matériau pour obtenir une pièce cylindrique d'une section réduite par le passage forcé de ce dernier dans une filière (figure 1).

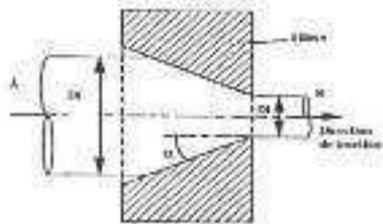


Fig. 1. Principe de tréfilage [Baira, 2017] [1].

Pendant la déformation plastique d'un matériau polycristallin, les grains subissent des orientations qui modifient leur orientation cristallographique, le type de texture dépend à la fois des caractéristiques du matériau et du mode de déformation utilisé, le résultat de cette rotation est la formation

d'orientation préférentielles et par conséquent d'une texture caractéristique. Pour une déformation uni-axiale (comme le tréfilage des fils) nous trouvons une texture dite fibres. Dans le cas des matériaux c.f.c (structure de notre matériaux étudié), ayant été déformés par laminage unidirectionnel (procédé d'obtention des fils machine), on rencontre deux types de textures (la texture de type laiton et la texture de type cuivre) Jakani. 2004 [2]. La texture de type laiton est caractérisée par une orientation proche de la composante idéale  $\{110\} \langle 112 \rangle$  et se développe principalement dans l'argent Hu et al. 1986 [3] et dans les alliages comme le laiton Virnich et Lücke 1978, Hirsch et Lücke 1988 [4-5]. La texture dite cuivre se développe dans presque tous les métaux c.f.c purs (Cu, Al, Ni) ou très peu alliés après un laminage à basse température. La texture cuivre est composée principalement de trois orientations principales ( $\{112\} \langle 111 \rangle$ ,  $\{110\} \langle 112 \rangle$  et  $\{123\} \langle 634 \rangle$ ) décrivant une fibre appelée  $\beta$ , et les fils "machine" présentent une microstructure recristallisée maclée, avec une taille de grains qui augmente du centre à la périphérie. Cette taille moyenne de grains tend à diminuer quand le taux d'impuretés augmente. Jakani. 2004 [2]. La texture de tréfilage est composée principalement de deux fibres  $\langle 001 \rangle$  et  $\langle 111 \rangle$  (où  $\langle hkl \rangle$  sont les directions cristallographiques parallèles à l'axe du fil) Dillamore et Roberts, 1965 et Shin et al. 2000 [6-7]. La proportion relative de ces deux composantes varie d'un matériau à l'autre et dépend entre autres, de l'énergie de faute d'empilement  $\gamma SFE$  Jakani. 2004 [2]. Les composantes de la texture de recristallisation dans les fils de structure c.f.c. (Cu, Ag, Al, etc) sont

identiques à celles de la texture de déformation (fibres <001> et <111>) Grewen, 1966, Shin et Lee, 2000 [7-8]. Cependant, l'origine exacte du développement des textures de recristallisation est objet de controverse entre deux théories depuis plusieurs années. La première théorie avance un mécanisme de germination orientée Dillamore et Katoh, 1974 [9] et la deuxième repose sur un mécanisme de croissance orientée. Les éléments en solution solide et les précipités jouent un rôle important sur les cinétiques de recristallisation, les tailles de grains et les textures finales Jakani. 2004 [2]. Notre travail est consacré pour étudier et comprendre le phénomène de l'évolution des textures de déformation et de recristallisation et d'interpréter l'effet combiné de la déformation par tréfilage et la température de recuit sur la microstructure et les propriétés mécaniques de fil électrique de cuivre dans un objectif d'élargir l'état de connaissance acquises dans L'entreprise EN.I.CA.Biskra utilise le procédé de tréfilage sur plusieurs types des fils machines de différents matériaux et nuances. Dans notre étude, on a utilisé pour le fil machine de cuivre DUCAB fournit par cette dernière. Les fils produits par cette entreprise sont destinés pour répondre les besoins du marché Algérien en câbles électriques.

## 2. 2. MATÉRIAU ÉTUDIÉ ET MÉTHODES DE CARACTÉRISATION

Dans notre étude, on a opté le fil machine de cuivre «DUCAB» 98.33 % de diamètre initial 8,08 mm et trois fils de divers diamètres qui représentent trois différentes déformations ( $\epsilon_1 = 29\%$ ,  $\epsilon_2 = 68\%$  et  $\epsilon_3 = 89\%$ ) à partir d'une gamme de tréfilage de onze filière, Tous ces fils ont été fournis par l'entreprise ENICAB à Biskra (Algérie). Les méthodes de caractérisation utilisées dans le cadre de cette étude afin d'identifier l'évolution de la microstructure et de la texture et ce pour les deux cas (écroui/recuit) sont : la diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), diffraction de neutrons RX, la microscopie optique et électronique, la microdureté, l'essai de traction et de la résistivité électrique.

TABLEAU I. RÉSULTATS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE CUIVRE

Eléments "DUCAB" 98,33%				
Résultats % Max	Fe	Zn	Ni	Pb
	0,021	0,003	<0,08	<0,04

## 3. 3. ETUDE DE L'ÉTAT TRÉFILÉ

La microstructure (fig.2a) du fil machine montre une forme equiaxe des grains. Par contre avec une texture isotropique, La microstructure de fil machine tréfilé à  $\epsilon_2 = 68\%$ , on observe une microstructure de grains allongés suivant l'axe du tréfilage (fig.2b). D'après Zidani et al [10-11] lorsque le taux de déformation augmente, le fil tréfilé acquies une microstructure texturée (texture fibreuse). Cette texture est fréquemment observée dans les fils tréfilés est connue sous le nom de texture de fibre ou de texture fibreuse. A l'échelle structurale, elle consiste simplement à une orientation selon une direction cristallographique parallèle à l'axe du fil. Cette texture est symétrique autour de l'axe du fil, connu sous le nom de (axe de fibre). Des mesures de la microdureté montrent une augmentation de la dureté des fils tréfilés avec l'accroissement de taux de déformation. Cette augmentation est très forte au premier stade de la déformation puis tend à se stabiliser. Ce résultat a déjà été rencontré sur des fils d'acier tréfilés M. Zidani et al [12-13]. Et ce durcissement de matériau est interprété par le mécanisme d'écrouissage, provoque une très forte densité de la dislocation dans le matériau déformé (énergie stockée à l'intérieure de matériau tréfilé



Fig. 2. Microstructures optique de fil machine et fils tréfilés,

Fil machine; C) Fil tréfilé à 88%.

Après laminage à chaud, les fils de cuivre ont été tréfilés à froid jusqu'à une réduction d'aire de 90.58 % en plusieurs passes. Cette déformation entraîne d'importantes modifications de la microstructure et de la texture. Après tréfilage, il apparaît un renforcement notable de la texture, et ce en fonction de l'accroissement de la déformation par tréfilage (fig. 4). Les composantes de la texture s'accroissent quand le taux d'impuretés augmente. La (fig. 3) présente la figure de pôles directe {111} (FDP) issue de mesure de texture par diffraction de neutrons après tréfilage à froid et une coupe à  $\phi_2 = 45^\circ$  de la fonction de distribution des orientations cristallines

(FDOC), et ce pour l'étape de tréfilage fortement déformée  $\epsilon_3 = 90,58\%$ . La texture est composée principalement de la fibre  $\langle 111 \rangle // \text{DN}$  (DN//axe de tréfilage) (majoritaire) et de la fibre  $\langle 001 \rangle // \text{DN}$  (minoritaire) (fig.5a). La fibre  $\langle 001 \rangle // \text{DN}$  est constituée d'un renforcement  $\{001\} \langle 110 \rangle$  qui est convoluté avec la composante  $\{001\} \langle 120 \rangle$ . Par ailleurs, on observe que la fibre  $\langle 111 \rangle // \text{DN}$  est constituée d'un renforcement principal  $\{111\} \langle 112 \rangle$  correspondant au maximum de la FDOC Jakani. 2004 [1].

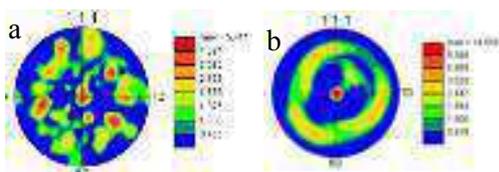


Fig. 3. Figures de pôles [111] mesurés sur le matériau : Cu 98.33 (DUCAB), a) Fil machine et b) fil tréfilé à  $\epsilon_3 = 89\%$ .



Fig. 4. Figures Changement de texture au cours du tréfilage du fil d'aluminium de diamètre 9,5 mm.15% de réduction à chaque passe à une vitesse de 20 m/min.

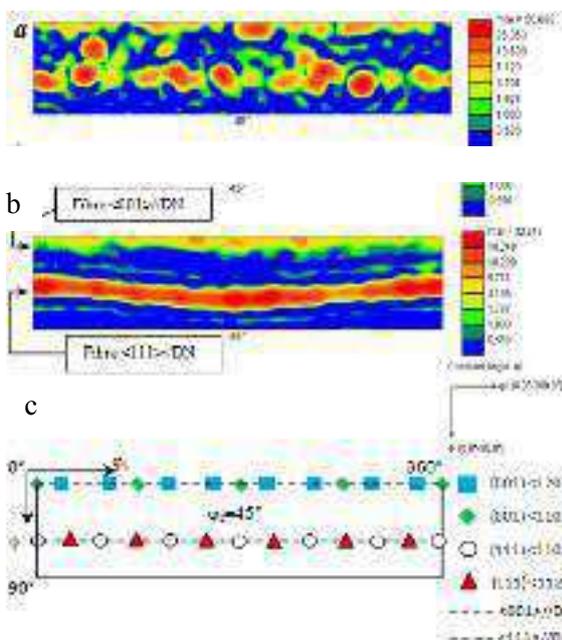


Fig. 5. La FDOC [111] obtenu par RX mesurés sur le matériau : Cu 98.33 (DUCAB), a) Fil machine b) fil tréfilé à  $\epsilon_3 = 89\%$ . c) position des orientations idéales.

#### 4. ETUDE DE L'ÉTAT RECUIT

Le mécanisme de recristallisation se déclenche juste après les premières minutes de maintien 10 min à 260°C notamment pour le fil le plus déformé (fig.6) et (fig.7). La structure de fil tréfilé se développe avec le prolongement du temps de maintien. Ce résultat est en accord avec les différents travaux et théories sur la recristallisation, car une forte déformation plastique conduite une grande énergie stockée dans les fils tréfilés et un accroissement de la densité dislocations, ce qui cause le déclenchement du mécanisme de recristallisation Jakani. 2004 [1]. Les courbes de la microdureté montrent une diminution de la dureté pour l'ensemble des fils recuit à 260°C, cette diminution est plus importante pour le fil le moins déformé (fig8).

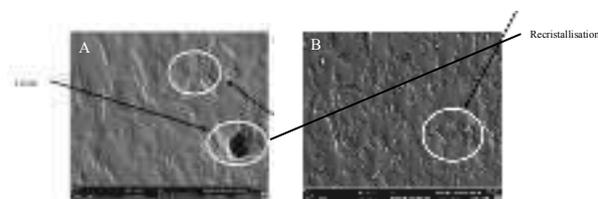


Fig. 6. Microstructures en MEB du fil machine et du fil fortement tréfilé fil fortement tréfilé recuit à 260°C pendant 30 minutes. A) fil machine; B) fil tréfilé à 89%

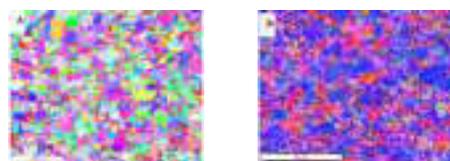


Fig. 7. Cartographie reconstruite par EBSD des fils de cuivre tréfilés et recuits à 260C° pendant 10 min : A) fil tréfilé à 29%. B) fil tréfilé 60%.

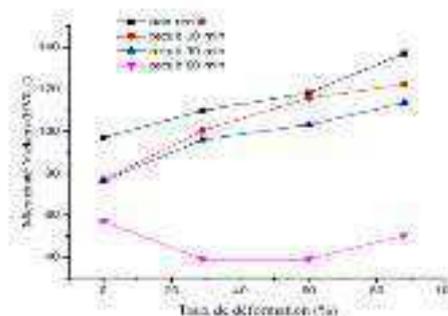


Fig. 8. Evolution de la microdureté Vickers des fils Tréfilés et recuits en fonction de taux de déformation.

#### 5. 5. CARTOGRAPHIE EBSD (FDOC/ FDP)

L'étude de l'évolution des composantes de la texture au cours des recuits interrompus a montré que : la texture de recristallisation est constituée des mêmes composantes que la texture de tréfilage,

des fibres  $\langle 111 \rangle // DN$  et  $\langle 001 \rangle // DN$  (fig9). L'acuité de la fibre  $\langle 001 \rangle // DN$  semble se maintenir, l'acuité de la fibre  $\langle 111 \rangle // DN$  s'atténue fortement au profit des orientations aléatoires, sans qu'il y ait apparition de nouveaux renforcements, la cinétique de recristallisation est d'autant plus lente que la teneur en impuretés augmente Jakani. 2004 [2].

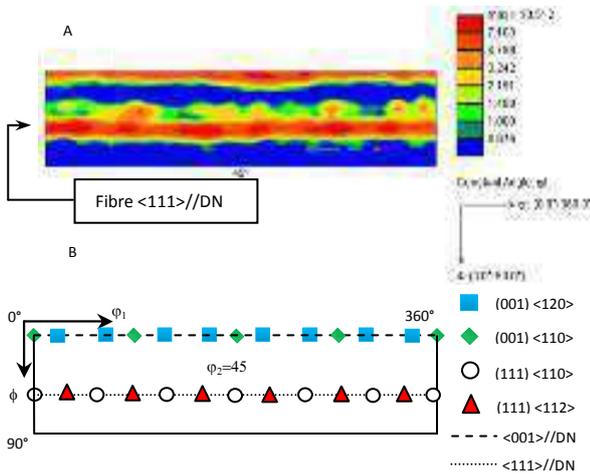


Fig. 9. La FDOC [111] obtenu par RX mesurés sur le matériau : Cu 98.33 (DUCAB), A) fil tréfilé à  $\epsilon_3= 89\%$ , B) position des orientations idéales.

La figure (9) montre que le maximum de l'intensité sur la figure de pôle directe  $\{111\}$  du fil machine recuit à 260°C après 10 minutes de maintien et de l'ordre  $Max_i=6,175$  ce qui correspond à un état isotopique relativement similaire à celui de fil machine non recuit (état initial). Par contre on observe qu'il y'a renforcement de l'intensité de la texture avec le taux de déformation par tréfilage.

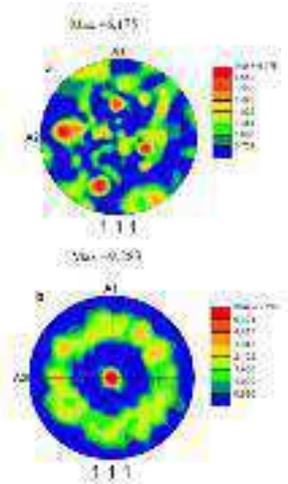


Fig. 10. Figures de pôle obtenu par RX correspondante au fils tréfilés et recuits à 260°C pendant 10 min : a) fil machine b) fil tréfilée à 29%

6. EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES POUR LES DEUX CAS (TRÉFILÉ/RECUIT)

La problématique de notre étude consiste à comprendre et expliquer l'anisotropie du comportement mécanique et électrique lors du tréfilage des fils électrique de cuivre. C'est pourquoi des essais mécaniques (essai de traction) et électriques (essai de résistivité électrique) (Fig.10) ont été menés pour mettre en évidence le lien entre la déformation et les propriétés mécanique et électrique. Les résultats de l'essai de traction de (fil machine / fil tréfilés) avant et après recuit présentés dans les figures (Fig.10 -a) montre que la résistance à la rupture augmente quand le taux déformation par tréfilage augmente par contre l'allongement chute. Et dévoilent clairement le retour de l'ensemble des propriétés mécaniques vers un état proche de l'état du fil machine après recuit. Des travaux ont montré que les propriétés mécaniques des fils tréfilés sont influencés par la les impuretés emprisonnés dans la matière première ou ajoutés Jakani, 2004 [2]. Les résultats de la résistivité électrique avant et après recuit à 260°C sont illustrés dans la figure (Fig.10-b). D'une part on remarque clairement une augmentation de la résistivité électrique avec l'accroissement de taux de réduction par tréfilage. Et d'autre part le recuit à 260°C pendant 30 minutes de maintien provoque une légère diminution de la résistivité électrique par rapport de l'état tréfilé Zidani et al et Takata et al [14-15-16]. Des travaux ont montré que la résistivité électrique augmente avec la teneur en impuretés, et ce linéairement pour les très faibles teneurs jusqu'à 0,2% Pops, 1997 [17]. Selon les travaux de Pops, la conductivité électrique augmente avec l'ajout d'oxygène jusqu'à une teneur de 200 ppm en poids (pour Cu-ETP), puis décroît pour des teneurs supérieures Pops, 1997 [17]. La teneur optimale en oxygène est choisie pour avoir un bon compromis entre les comportements au recuit (durée de recuit plus courte) et à la déformation, et ce, afin d'éviter des problèmes possibles de fragilisation du matériau au cours de la mise en forme par tréfilage Jakani et al. 2004 [2].

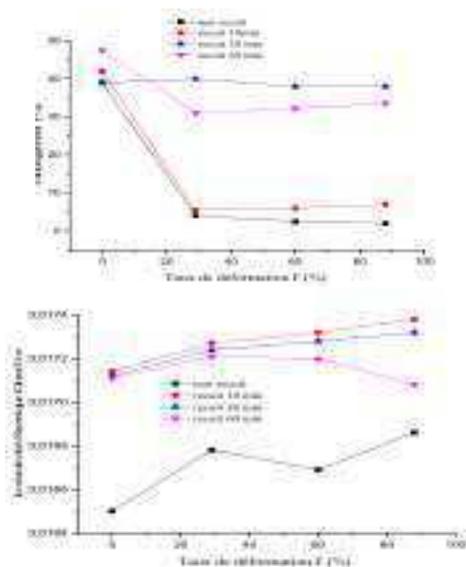


Fig. 11. Evolution de a) l'allongement des fils tréfilés et recuits en fonction du taux de déformation, et b) Evolution de la résistivité électrique des fils tréfilés et recuits en fonction du taux de déformation.

### 7. EVOLUTION DE LA TAILLES DES GRAINS AVEC ET SANS MACLES

Le tableau (2) présente les analyses de la taille moyenne des grains recristallisés à 260°C pendant 10 min de fil machine et fils tréfilé respectivement à (29 et 88 %) sans et avec macle. L'analyse de la taille moyenne de grains pour le fil machine montre une différence remarquable (la taille moyenne de grains du fil machine avec macle et sans macle sont respectivement de l'ordre de 12,8 μm et 23,7μm). Cette taille moyenne des grains maclés et non maclés diminuée avec l'augmentation du taux de déformation jusqu'elle atteindre une valeur pratiquement quasiment identique de 3 μm après 88% de déformation.

TABLEAU2. REPRÉSENTATION DES TAILLES DES GRAINS AVEC ET SANS MACLES

Taille moyen des grains		
	Avec macle	Sans macle
Fil machine		
	diamètre moyen 12,8 μm	diamètre moyen 23,7 μm
Fil tréfilé à 29% recuit à 260°C 10min		
	Diamètre moyen 12,9 μm	diamètre moyen 15,1 μm
Fil tréfilé à 88% recuit à 260°C 10min		
	diamètre moyen 3,0 μm	diamètre moyen 3,1 μm

### 7. 7. CONCLUSION

Le tréfilage des fils de cuivre provoque un développement d'une texture fibreuse accompagné d'une augmentation de la dureté avec l'accroissement de taux de déformation par tréfilage, ainsi la texture de déformation est constituée essentiellement de la fibre <111>//DN (majoritaire) et de la fibre <001>//DN (minoritaire). La fibre <001>//DN est constituée d'un renforcement {001}<110> qui est convolué avec la composante {001}<120>. Une augmentation de la résistivité électrique avec le taux de réduction par tréfilage. Les mesures de la microdureté après recuit montrent une diminution de la microdureté avec le prolongement temps de recuit. Le recuit conduit à une recristallisation notamment pour les fortes déformations avec un retour de l'ensemble des propriétés mécaniques vers un état proche de l'état du fil machine. La texture de recristallisation est composée des mêmes composantes que la texture de tréfilage, fibres <111>//DN et <001>//DN. Nous observons après le traitement de recristallisation une forte diminution de l'intensité de la fibre <111>//DN majoritaire à l'état tréfilé. En revanche, la fibre <001>//DN reste stable. Le recuit à 260°C pendant un maintien de 30 minutes provoque une légère diminution de la résistivité électrique par rapport de l'état tréfilé.

### 1. Références

- [1] F. Baira, Thèse de doctorat, université de Biskra (2017)
- [2] S. Jakani, Thèse de doctorat, Université Paris XI (2004).
- [3] H. Hu, Proceedings of The Seventh Risø International Symposium, Edited by N. Hansen, D. Juul Jensen, T. Leffers, B. Ralph, Roskilde, Denmark, p. 75 (1986).
- [4] K.H. Virnich, K. Lücke, Proceedings of the fifth International Conference on Textures of Materials, p. 397 (1978).
- [5] J.Hirsch, K. Lücke, Acta Metallurgica, Vol. 36, N°11, p. 2863 (1988).
- [6] I.L. Dillamore and W.T. Roberts, Metallurgical Reviews Vol. 10, p.22 (1965).
- [7] H.J. Shin, H.T. Joeng and D.N. Lee, Mater Sci. Eng., Vol. A279 p. 244 (2000).
- [8] J. Grewen, Zeitschrift für Metallkunde, Vol. 57, p. 581 (1966).
- [9] I.L. Dillamore, H. Katoh, Metal Science, Vol. 8, p. 73 (1974).
- [10] M. Zidani, Z.Boumerzoug, T. Baudin. Sci. Forum, Vol. 514-516 (2006), p. 554-558.
- [11] M. Zidani, Z.Boumerzoug, T. Baudin and D. Sci. Forum, Vol. 550 (2007), p. 447-452.
- [12] M. Zidani, S.Messaoudi, T.Baudin, D.Solas and M. H. Mathon, Deformation textures in wire drawn perlitic steel Int. J. Mater. Form, Vol. 3 (2010) , 7-11.
- [13] M.Zidani, S.Messaoudi, C.Derfouf, T.Baudin and M.H.Mathon, Textures evolution in annealed wire drawn perlitic steel, 15th International Conference on the Strength of Materials, , Dresden – Allemagne, 16-21 Août (2009).
- [14] M. Zidani, S. Messaoudi, C. Derfouf, A. Boulagroun, M.H. Mathon and T. Baudin, AIP Conf. Proc. 1400, 579-584; doi:10.1063/1.3663185 (2011).
- [15] N.Takata, S.H. Lee and N. Tsuji, Materials Letters, Vol. 63 (2009), p. 1757–1760.
- [16] F. Baira, M. Zidani, H. Farh and T. Baudin, S. Messaoudi, T. Ziar, A.L. Helbert, International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 31, pp 20-28 (2017)
- [17] H. Pops, J. Holloman, Wire Journal International, Vol. 5, p. 70 (1994).

# Modélisation systémique d'un système de propulsion d'un Moteur-Roue du Véhicule Electrique avec les Bond Graphs

Sihem Dridi<sup>#1</sup>, Ines Ben Salem<sup>#2</sup>, Lilia EL Amraoui<sup>#3</sup>

<sup>#</sup> *Département Électrique, École Nationale d'Ingénieurs de Carthage*

*Université de Carthage, Charguia II, 2035, Tunisa*

<sup>1</sup>dridi.dridi2@gmail.com

<sup>2</sup>Ines.bensalem@enicarthage.rnu.tn

<sup>3</sup>Lilia.elamroui@enicarthage.rnu.tn

**Abstract**—Cet article est consacré à la modélisation systémique d'un système de propulsion de type Moteur-Roue pour le véhicule électrique en utilisant l'outil graphique : le Bond Graph.

L'actionneur de la roue est de type synchrone à aimants permanents, commandé par la technique Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de type sinus-triangle. Le modèle de l'actionneur permet de mettre à l'évidence le couplage entre les sous-modèles électriques, magnétiques et mécaniques.

Les résultats de simulations du modèle systémique développé sous l'environnement 20-Sim qui ont permis d'évaluer les performances du modèle élaboré ainsi que de montrer la haute performance et l'efficacité du système contrôle simulé.

**Keywords**— Approche systémique; Bond Graph, Moteur-Roue; Commande MLI; Modélisation.

## I. INTRODUCTION

Les majeurs facteurs qui ont donné plus d'intérêts pour le développement des véhicules électriques sont : le facteur économique qui mène à une réduction de la consommation de carburant, le facteur environnemental en réduisant le taux de pollution [1].

En se basant sur l'implémentation du moteur de propulsion au sein d'un véhicule électrique, les architectures possibles sont catégorisées en deux classes : avec le monomoteur centralisé et celui du types Moteurs-Roues (M-R).

Dans ce papier nous intéressons à la technologie M-R du véhicule électrique. Dans cette technologie, le moteur de propulsion est intégré à l'intérieur de chacune des roues. En comparant celle-ci au véhicule électrique monomoteur les composants mécaniques (l'arbre de transmission, le différentiel, la boîte de vitesses et embrayage) sont éliminés [2]. La suppression de ces composants offre certains avantages, nous citons à titre d'exemple : la réduction du bruit, l'amélioration de la sécurité et la contrôlabilité, la diminution des pertes par frottement et une efficacité énergétique meilleure [3].

Le système de propulsion du M-R est la combinaison synergique et systémique d'un grand nombre d'éléments ou sous-systèmes (actionneur électrique, systèmes de commande, convertisseur de puissance, dynamique du véhicule, source d'alimentation (batterie)) qui sont issues de différentes sources d'énergie telles que: électriques, mécaniques, magnétiques et électrochimies, qui sont en forte interaction entre elles et avec leurs environnements.

Ce système rencontre des certaines difficultés telles que :

- L'hétérogénéité qui engendre l'accroissement du niveau de complexité du système
- La complexité de modélisation
- La diversité des composants énergétiques couplés

Ces difficultés appellent de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de modélisation. Dans ce sens, nous avons adopté une approche systémique pour modéliser tous les phénomènes énergétiques du système de propulsion de type M-R en mettant en outre à profit le caractère unifiant de l'outil graphique : le Bond Graph. L'avantage de la modélisation systémique avec l'outil Bond Graph est d'analyser la globalité du système avec la prise en compte de leurs différentes interactions énergétiques en s'appuyant sur les aspects technologiques, phénoménologiques et structurels offants par Bond Graph.

Cet article est organisé comme suit : la section 1 présente le système de propulsion du type M-R. La modélisation du système est présentée dans la section 3, et certains résultats de simulation sont présentés puis discutés dans la section 4.

Pour une meilleure compréhension de cet article, les spécifications des éléments constituant le système de propulsion sont listées dans la table de nomenclatures.

## II. PRESENTATION DU MOTEUR-ROUE ELECTRIQUE

Le M-R électrique représente un nouveau pas vers la mobilité électrique. L'intégration du moteur électrique à la roue offre le double avantage la diminution de consommation du véhicule automobile et la commande indépendante du couple ce qui améliore la sécurité du véhicule.

La motorisation de la roue est assurée par un actionneur synchrone à aimants permanents qui est implanté dans la roue. Cet actionneur est composé par des parties : le stator situé à l'essieu de la roue et le rotor à faible vitesse monté directement sur la jante de la roue.

La figure 1 présente la technologie d'un Moteur-Roue pour le véhicule électrique.

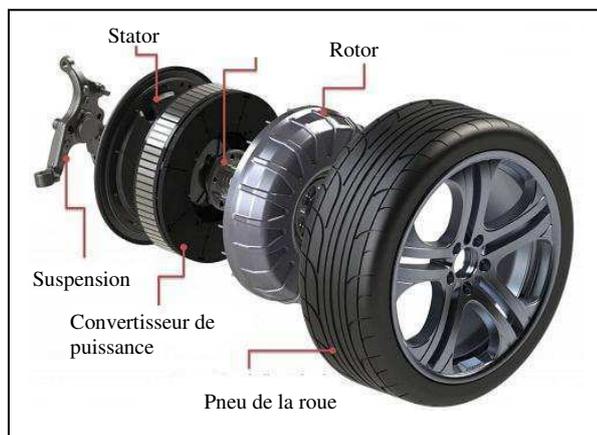


Fig. 1 Technologie du Moteur-Roue du véhicule électrique

Le choix de ce type d'actionneur est justifié par les critères significatifs suivants : une grande fiabilité et une bonne dynamique du mouvement [4].

La figure 2 présente la structure physique du système de propulsion du M-R qui est un système mécatronique. La partie mécanique présente la dynamique du véhicule. La partie électrique se compose de l'ensemble des éléments : source d'alimentation de type batterie ; actionneur synchrone à aimants permanents; convertisseur DC-AC de type onduleur de tension. En effet, l'actionneur sert à fournir le couple mécanique de la propulsion de la roue permettant l'avancement du véhicule. Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs via un onduleur de tension. La partie électronique de commande permet de contrôler la vitesse du moteur électrique qui est équivalente à la vitesse de la roue et donc à la vitesse du véhicule. La technique adoptée pour le contrôle de la vitesse est la technique Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de type sinus-triangle qui génère des signaux de commande à l'onduleur.

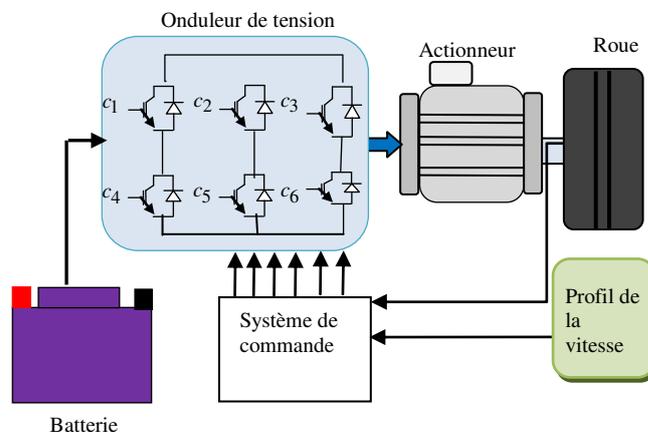


Fig. 2 Structure physique du système de propulsion du type Moteur-Roue

## III. MODELISATION DU SYSTEME DE PROPULSION M-R

L'architecture physique du système de propulsion inclue de plus en plus de phénomènes physiques qui sont en forte interaction. Ces phénomènes augmentent le niveau de complexité du système proposé. Par conséquent, sa modélisation nécessite une approche et un outil de représentation de phénomènes énergétiques et leurs interactions.

Dans ce sens, l'environnement de modélisation utilisé est la combinaison de [5]:

1) Une approche systémique qui permette de faciliter la compréhension et l'analyse globale du système (choix des composants, description de leurs liens). Elle le considère comme le couplage de différents sous-systèmes. Elle met l'accent sur les fonctionnalités de chaque composant.

2) Un outil de représentation énergétique tel que le Bond Graph qui est utilisé pour l'élaboration des modèles de composants constituant le système. Le Bond Graph est un outil graphique de modélisation qui est fondé sur le transfert d'énergie au sein d'un système. Son choix est basé sur les multiples critères suivants [6]:

- La possibilité de modéliser des systèmes dynamiques multi-physiques
- La conception modulaire de modèles
- L'élaboration systématique des modèles
- L'aspect graphique unifié et propriétés causales et structurelles

### A. Analyse Systémique du Système

La première étape vers l'élaboration d'un modèle systémique est l'analyse systémique qui peut être subdivisée en quatre étapes :

- L'analyse de la structure physique du système : qui consiste à définir ses principaux composants fonctionnels et leurs interactions. Le système proposé se compose des modèles : d'alimentation, d'onduleur de tension, d'actionneur et de charge
- L'identification des phénomènes physiques : qui consiste à définir les phénomènes physiques de chaque composant. Dans notre application les phénomènes physiques sont le courant-tension, couple-vitesse angulaire et force-vitesse linéaire
- La détermination des transformations : il consiste à déterminer les transformations qu'y subissent des différents phénomènes physiques pour chaque composant qui est déjà identifié dans la deuxième étape. Dans cette application, les transformations énergétiques sont: chimique-électrique, électrique-magnétique, électromagnétique-mécanique et mécanique (rotation)-mécanique (translation)
- L'établissement du bilan global du système proposé : il consiste à assembler les différents sous-modèles des composants fonctionnels avec la prise en compte des interactions

La figure 3 présente l'analyse systémique du système de propulsion avec l'outil Bond Graph à mot. Il se compose de quatre sous-modèles : batterie, actionneur, onduleur de tension et charge (contact Roue-chaussée).

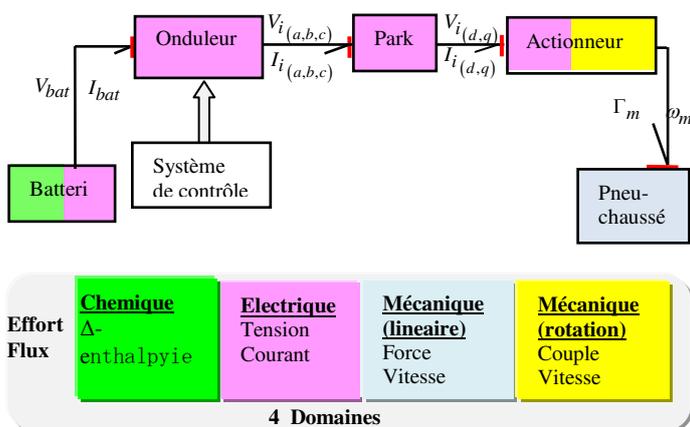


Fig. 3 Modèle systémique du système de propulsion du M-R avec Bond Graph à mot

### B. Modèle Bond Graph du Système de Propulsion M-R

#### 1) Modèle d'Actionneur Synchrone à Aimants Permanents:

L'actionneur de motorisation de la roue est composé de trois parties physiques qui interagissent entre elles. Ces parties sont exprimées par les équations (1), (2) et (3) dans le repère de Park [7].

#### Équation de tension de stator :

Le circuit du stator est régi par les équations différentielles de tension suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega_m L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p \Omega_m (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

L'expression du couple moteur est donnée par la relation suivante :

$$\Gamma_{em} = p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2)$$

La dynamique de l'actionneur est régie par la relation fondamentale de la dynamique :

$$\begin{aligned} \Omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt} \\ J_m \frac{d\Omega_m}{dt} &= \Gamma_{em} - \Gamma_{res} - f_m \Omega_m \end{aligned} \quad (3)$$

Le modèle analytique de l'actionneur conduit au modèle Bond Graph représenté par la figure 4.

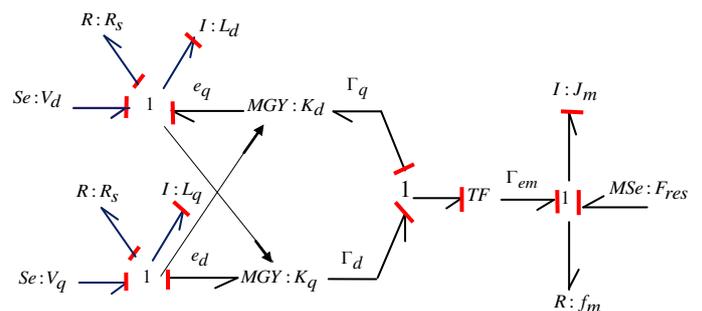


Fig. 4 Modèle systémique de l'actionneur avec Bond Graph

En se basant sur le concept de l'outil Bond Graph, les tensions d'entrées " $V_{i=(d,q)}$ ", les résistances électriques " $R_{i=(d,q)}$ ", et les inductances " $L_{i=(d,q)}$ " sont modélisées respectivement par : des sources d'efforts contrôlés, des éléments dissipation de l'énergie "R" et des éléments de stockage de l'énergie "I". Ces différents éléments partagent une même variable de flux (courant) pour cela ils sont reliés à la jonction 1.

L'inertie et le phénomène du frottement visqueux de la partie mécanique de l'actionneur sont modélisés

respectivement par un élément de stockage de l'énergie "I" et un élément de dissipation de l'énergie "R". Ces deux éléments sont reliés entre eux par la jonction 1 car ils sont traversés par la même variable de flux (vitesse angulaire).

L'élément gyrateur modulé 'MGY' représente la conversion électrique-magnétique. Le couplage entre les phénomènes énergétiques provoqués par les deux parties électrique et mécanique est modélisé par un élément de transformation 'TF'.

### 2) Modèle de l'onduleur de tension :

La figure 5 illustre la structure physique de l'onduleur de tension à trois cellules de commutation qui sont complémentaires.

Chaque cellule est munie de deux interrupteurs comprenant un transistor et une diode qui sont montés en antiparallèle. Les transistors sont commandés par des signaux de commande  $c_{i=(1,..6)}$  générés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) [8]. Cette stratégie consiste à comparer les tensions de référence sinusoïdales à une porteuse sinus-triangulaire [9].

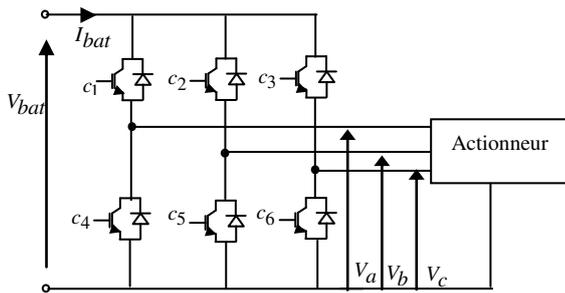


Fig. 5 Structure physique de l'onduleur de tension

Le système de tension triphasé de sortie de l'onduleur est lié aux états de conduction et la tension d'alimentation par la relation (4) :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{bat}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} V_{bat} \quad (4)$$

La relation (4) conduit à la représentation du modèle Bond Graph de l'onduleur présenté par la figure 6. L'onduleur est représenté par trois transformateurs modulés possédants des gains  $\eta_1, \eta_2$  et  $\eta_3$ .

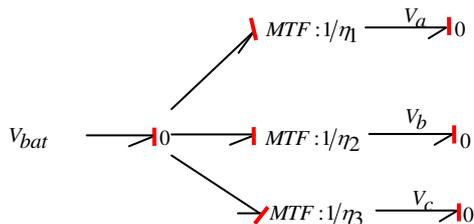


Fig. 6 Modèle systémique de l'onduleur de tension avec Bond Graph

### 3) Modèle de contrôle :

Le modèle de contrôle est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant ' $I_{qref}$ '. Le courant ' $I_{dref}$ ' est imposé nul.

Les références des courants ' $I_{qref}$ ' et ' $I_{dref}$ ' sont comparées respectivement avec les courants réels de la machine ' $I_q$ ' et ' $I_d$ '.

Les sorties des comparateurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques du type PI. Les sorties de régulateurs génèrent les tensions de référence ' $V_d$ ' et ' $V_q$ '.

En utilisant une transformation (dq-abc) inverse, pour faire le passé du système de tension biphasé au système de tension triphasé. La référence de tension triphasée est envoyée au modulateur de largeur d'impulsion pour produire la séquence de commutation.

Les interactions entre les blocs du modèle de contrôle sont réalisées par des signaux d'informations contrairement aux modèles du système d'étude qui sont des signaux énergétiques.

### 4) Modèle de la charge :

La dynamique du véhicule est considérée comme une charge. Sa modélisation consiste à décrire le modèle mathématique de la dynamique du véhicule et de la force résistance appliquée au véhicule électrique en mouvement.

La dynamique du véhicule est donnée par l'équation suivante :

$$M_r \frac{dV_r}{dt} = F_{roue} - F_{res} \quad (5)$$

La force de résistance est la somme des forces dues à l'interaction du véhicule avec son environnement. Elle se compose de la :

- Force au roulement représente l'interaction de pneu de la roue avec la route.

$$F_{rol} = f_r M_r g \cos \alpha \quad (6)$$

- Force aérodynamique représente l'interaction de l'air avec la carrosserie du véhicule.

$$F_{areo} = \frac{1}{2} \rho C_d A_F V_r^2 \quad (7)$$

- Force de gravité

$$F_{slope} = M_r g \sin \alpha \quad (8)$$

Selon le concept de l'outil Bond Graph, la force de résistance est modélisée par une source d'effort contrôlée 'MSe'.

La figure 7 présente le modèle systémique du système de la propulsion du type M-R avec l'outil Bond Graph et son modèle de contrôle.

- Cas1: Route plate avec 10% de pente à la vitesse constante.
- Cas 2: Route plate à la vitesse variable.

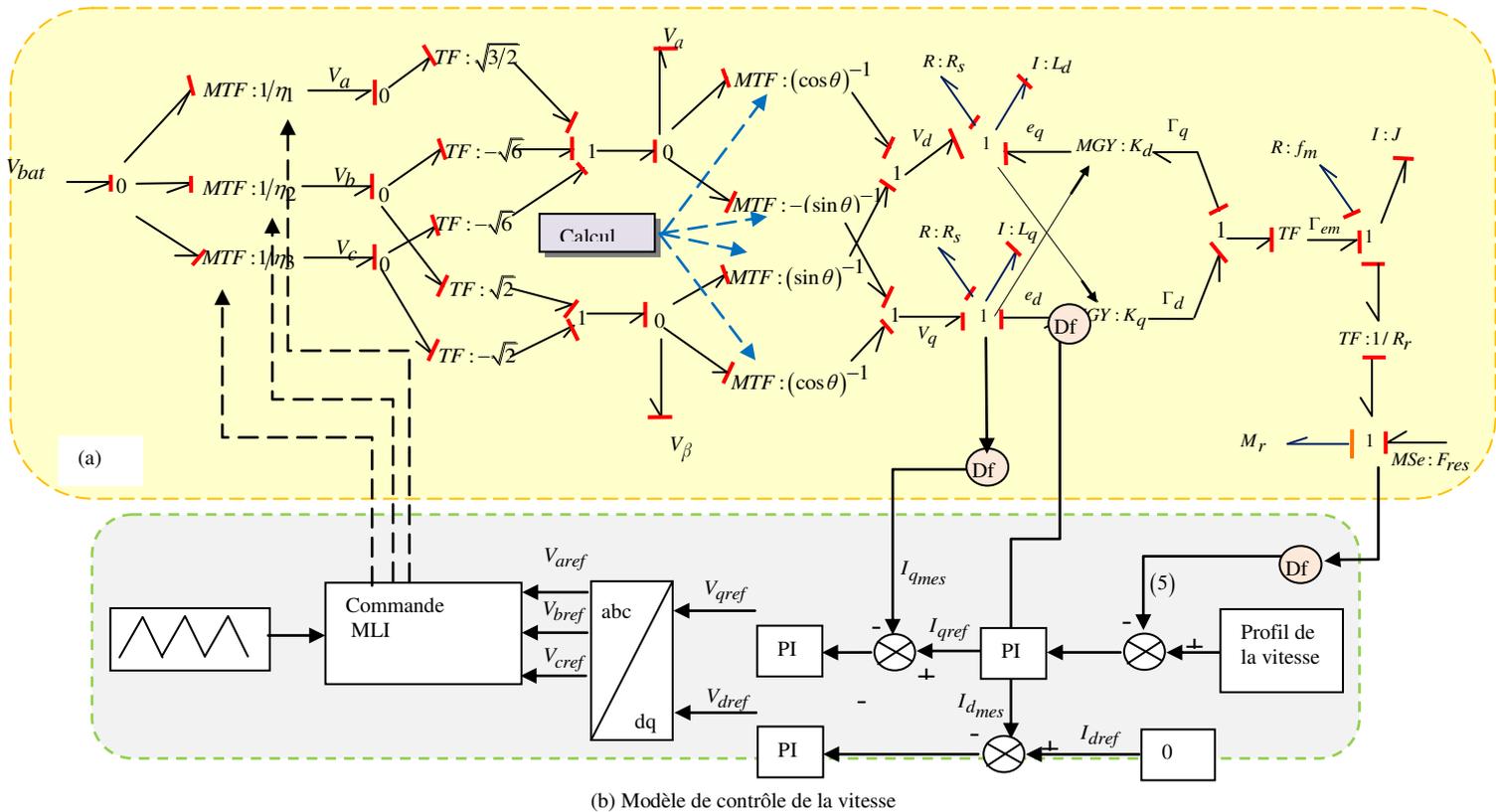


Fig. 7 Modèle systémique du système de propulsion M-R avec l'outil Bond Graph (a) ; Modèle de contrôle de la vitesse (b)

#### IV. RESULTATS DE SIMULATION ET ANALYSE

Le modèle systémique du système de propulsion du type M-R est simulé à l'aide du logiciel 20-Sim. Ce logiciel est dédié à l'outil Bond Graph. Ce logiciel constitue un programme d'aide à la modélisation et à la simulation du comportement dynamique des systèmes multi-physiques. Ce logiciel s'avère performant puisqu'il présente la possibilité d'affectation de causalité automatique aux ports et aux jonctions ainsi que la possibilité de conception et l'analyse des systèmes hétérogènes complexes [10].

Afin de caractériser le comportement du système et les performances de l'approche proposée, des simulations ont été effectuées en utilisant le modèle de la figure 6 (a) et (b).

Les paramètres de simulations du système de propulsion du type M-R sont donnés dans les tables I et II.

Les simulations sont réalisées pour les deux cas suivants:

TABLE I  
 SPECIFICATIONS DU SYSTEME DE PROPULSION DU TYPE M-R

Symbole	Description	Valeur
$J$	Inertie totale	0.8e-3 Kg/m <sup>2</sup>
$L_d, L_q$	Inductance axe d,q	0.2 mH
$R_d, R_q$	Resistance axe d,q	0.34 Ohm
$\Psi_d, \Psi_q$	Flux axe d,q	0.08 Wb
$P$	Pairs de pole	4
$C_d$	Coefficient aérodynamique	0.55
$\rho$	Densité de l'air	1.25
$A_F$	Front area of véhicule	1.8m <sup>2</sup>
$R_r$	Rayon de la roue	0.296 m

1) Cas1: Route plate avec 10% de pente à la vitesse constante égale à 80km/h: Dans ce cas, nous avons

appliqué une vitesse constante égale à 80Km/h avec la condition que la route est inclinée de 10% à 2,5s. La figure 8 présente l'évolution de la vitesse de la roue mesurée et sa valeur de référence.

La vitesse de la roue atteint une valeur constante après un léger dépassement. À l'instant 2.5s, on note un faible dépassement, puis la vitesse est égale à la vitesse de sa référence. La pente de la route n'affecte pas le contrôle de la vitesse de la roue.

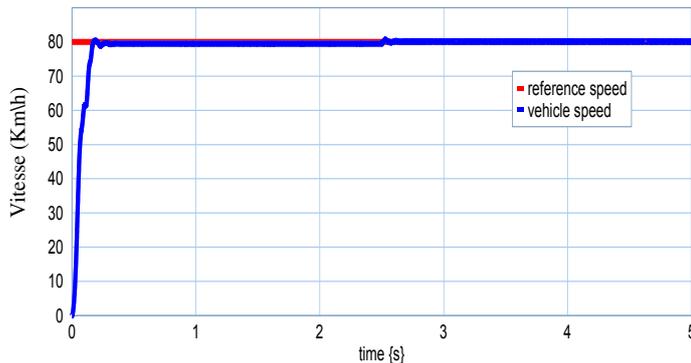


Fig.8 Évolution de la vitesse de la roue

2) *Cas2: Route plate à la vitesse variable.* La figure 9 présente l'évolution de la vitesse mesurée de la roue et sa valeur de référence. Entre 0 et 1s la vitesse est nulle, le véhicule est en arrêt ; de 1s à 4s la vitesse de la roue est égale à 20km/h ; de 4s à 6s la vitesse est augmentée à 55km/h et de 6s à 8s, la vitesse est diminuée à valeur égale à 30km/h. La vitesse mesurée est identique à celle de la référence.

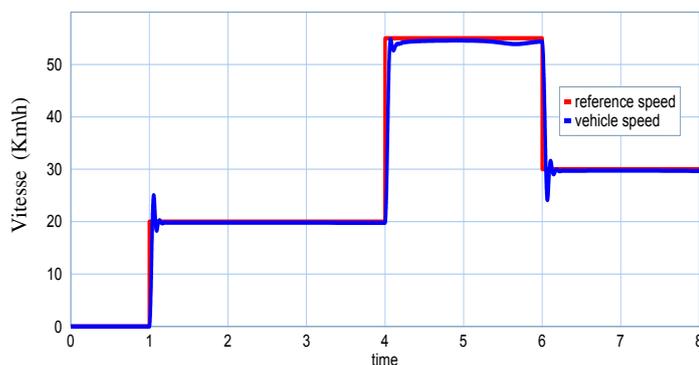


Fig.9 Évolution de la vitesse de la roue

## V. CONCLUSION

Les travaux exposés dans cet article décrivent l'élaboration du modèle systémique du système de propulsion de type Moteur-Roue du Véhicule Électrique avec l'outil énergétique Bond Graph. Ce système est composé des modèles électriques, magnétiques, mécaniques et de charge. Le couplage de ces modèles est réalisé en vue de l'étude des phénomènes physiques de chaque modèle et des propriétés structurelles et énergétiques de l'outil Bond Graph.

Le modèle développé a été construit et simulé sous l'environnement 20-Sim. L'avantage de ce logiciel est la

facilité de construire des modèles hétérogènes et couplés et aussi d'analyser leur comportement dynamique.

Nous envisageons de poursuivre ces travaux essentiellement dans le sens de l'élaboration de stratégies de commande plus adaptées.

## NOMENCLATURES

Symbole	Description
$J$	Inertie roue et motor
$M_r$	Masse de la roué
$\alpha$	Angle de la pente
$f_r$	Coefficient de friction
$V_{rmes}$	Vitesse mesurée de la roue
$V_{aref}, V_{bref}, V_{cref}$	Tension de référence axe (a,b,c)
$V_r$	Vitesse linéaire de la roue
$i_d, i_q$	Courant axe d,q
$R_r$	Rayon de la roue
$\Gamma_m$	Couple moteur
$\Omega_m$	Vitesse angulaire
$V_d, V_q$	Tension axe d,q
$R_d, R_q$	Resistance axe d,q
$L_d, L_q$	Inductance axe d,q
$\psi_f$	Flux permanent
$\psi_d, \psi_q$	Flux axe d,q
$J_m$	Inertie du rotor
Df	Detecteur du flux
$I_{dref}, I_{qref}$	Courant de référence axe (d, q)
$V_{dref}, V_{qref}$	Tension de référence axe (d, q)
$I_{dmes}, I_{qmes}$	Courant mesuré axe (d, q)
$V_{dmes}, V_{qmes}$	Tension mesurée axe (d, q)

## REFERENCES

- [1] J. Liu and H. Peng, "Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle", IEEE, vol. 16, no. 6, pp.1242-1251, Nov.2008.
- [2] C. ESPANET, *Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inverse application du moteur-roue*, Thèse de Doctorat ; 1999.
- [3] A. Nasri, B. Gasbaoui and B. M. Fayssal, "Novel four wheel drive propulsion system control using backstepping strategy," *Science Direct*, vol. 22, pp. 509–517, Oct. 2015.
- [4] k. Jaber, B.Ben Salek, A. Fakhfakh, R.Neji, "Modeling and Simulation of Electrical Vehicle in VHDL-AMS," IEEE Conference, pp.908-911, 2009.
- [5] R. Gicquel, "Systèmes énergétiques, Volume 1", Mines Paris Tech., 2009.
- [6] M. Vergé, D. Jaume, "Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs," Editions Technip, Paris, 2004.
- [7] S.Dridi, I. B. Salem and L. E. Amraoui, "Dynamic modeling of nonlinear longitudinal automotive system using graphically based techniques", IEEE Conferences, SETIT, pp.349-354, Juin 2017.

- [8] S.Dridi, I. B. Salem and L. E. Amraoui, “Dynamic modeling of an automotive power steering graphic tool: Bond graph”, IEEE Conferences, CISTEM, pp.1-8, April, 2015.
- [9] K. Jaber, A. Fakhfakh, and R. Neji, “Comparison of SPWM and SVPWM Control of Electrical Vehicle in VHDL-AMS,” IEEE Conferences, SETIT, pp.171-176, March 2013.
- [10] J. Broenink, “20-SIM software for hierarchical bond-graph/ block-diagram models,” ELSIVER, pp. 48-492, 1999.

# Simulation de la température de sortie de l'eau dans un concentrateur solaire cylindro-parabolique à Batna-Algérie

T.Reddah<sup>1,2</sup>, H.Benmoussa<sup>2</sup>, M.Aissani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center in Industriel Technologies CRTI, p.o.box 64, Chéraga 16014 Algiers, Algeria, [redahtaki@yahoo.fr](mailto:redahtaki@yahoo.fr), [t.reddah@crti.dz](mailto:t.reddah@crti.dz), [m.aissani@crti.dz](mailto:m.aissani@crti.dz)

<sup>2</sup>LESEI, Université de Batna, avenue Chahid Boukhrouf, 05000 Batna, Algérie, [hocine\\_b@hotmail.com](mailto:hocine_b@hotmail.com)

**Résumé**— Dans cette étude, on s'intéresse à la simulation de la température de sortie de l'eau dans un concentrateur solaire de type cylindro-parabolique. Pour étudier le phénomène de chauffage de l'eau à partir de l'énergie solaire, deux parties essentielles sont traitées: la première partie est consacrée au calcul du flux solaire incident dans un plan incliné qui correspond à la latitude de la ville de Batna, Algérie ( $\Phi=35,55^\circ$ ) avec un programme en langage FORTRAN. La deuxième partie est réservée à l'étude des échanges thermiques dans le tube absorbeur du concentrateur pour déterminer la température de sortie du fluide caloporteur. La simulation est effectuée heure par heure du lever du soleil jusqu'au coucher. Les résultats obtenus montrent que les températures de sorties varient en fonction du temps et l'éclairement solaire incident. Dont ce dernier dépend de latitude de la région étudiée et l'état climatique cette région.

**Mots-clé**— Concentrateur cylindro-parabolique, Température de sortie, Rayonnement solaire, Absorbeur.

## I. INTRODUCTION

Actuellement, la conservation des ressources énergétiques est devenue une priorité à l'échelle planétaire, ce qui a poussé les spécialistes à trouver de nouvelles techniques, tel que les énergies renouvelable (solaire, éolien, hydraulique,...etc.). Dans le domaine des énergies solaires, on trouve les concentrateurs cylindro-paraboliques, les capteurs plans, les concentrateurs paraboliques, les séchages solaires,...etc. [1].

Les concentrateurs cylindro-paraboliques prennent un intérêt croissant par la communauté scientifique grâce à leur développement permanent avec des coûts plus faibles. Ils sont utilisés pour la production de l'électricité en exploitant l'énergie solaire. Un absorbeur conventionnel est principalement constitué d'un tube métallique droit contenu dans une enveloppe cylindrique en verre. L'ensemble de ce concentrateur est positionné sur la ligne focale de son miroir réfléchissant. Sous l'effet de la concentration solaire le fluide caloporteur en circulation dans le tube absorbeur est chauffé à des températures très élevés, véhiculant ainsi l'énergie thermique emmagasinée vers un système de stockage où il va permettre de produire de la vapeur d'eau qui sera utilisé par les turbines. L'énergie mécanique des turbines sera transformée par la suite en énergie électrique. Les concentrateurs cylindro-paraboliques sont les systèmes les plus prometteuses pour prendre la place des énergies non

renouvelables (les énergies fossiles et les énergies nucléaires) surtout dans le domaine industriel (centrales électriques, systèmes hybrides, le dessalement, l'air conditionné, la réfrigération, irrigation, ...etc.) [2, 3].

En 2010 Z.D.Cheng et al [4], ont travaillé sur l'identification de distribution de la température à la surface externe du tube absorbeur d'un Concentrateur cylindro-parabolique (CCP), en 2011 Ya-Ling He et al [5], ont réalisé une multitude de simulation sur différentes configurations du concentrateur en diminuant le diamètre du tube absorbeur et en variant l'angle de la jante, en 2013 P. Wang et al [6], ont concentré leur étude sur le tube absorbeur d'un CCP. Nous on va étudier l'évolution de la température de sortie du fluide caloporteur dans un tube absorbeur d'un CCP.

Dans cette étude, on s'intéresse à la région de Batna dont on veut bien exploiter leur avantage climatique en utilisant ces concentrateurs solaires. L'étude du chauffage de l'eau par le concentrateur considéré repose tout d'abord sur l'estimation exacte du rayonnement solaire incident à Batna. L'étude thermique postérieure du concentrateur nous permet de suivre l'évolution de la température de l'eau qui circule à l'intérieur du tube absorbeur en mode de convection forcée et la température de sortie. Ainsi, on pourra par la suite optimiser les paramètres du concentrateur et améliorer son rendement thermique et ses dimensions.

## II. Etude du rayonnement solaire

### A. Rappel des composantes du rayonnement solaire

Selon la littérature [7], le rayonnement solaire global (G) parvenant au sol peut être subdivisé en deux composantes principales, qui sont l'éclairement direct (S) et l'éclairement diffus (D).

#### a) Eclairement direct (S)

C'est l'éclairement parvenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide. L'expression de l'éclairement direct  $S(i, \sigma)$  sur un plan d'inclinaison  $i$  et angle d'orientation  $\sigma$  quelconque est donné par [7]:

$$S(i, \sigma) = I_0 [\cos(h) \sin(i) \cos(\sigma - a) + \sin(h) \cos(i)] \quad (1)$$

Avec :

a : Azimuth du soleil [degré].  
 h : Hauteur du soleil [degré].  
 $I_0$  : Est l'intensité du rayonnement solaire direct provenant vers un point M de la surface de captation, il varie avec la hauteur du soleil h. Cette variation peut être exprimée par la formule suivante [7] :

$$I_0 = A \exp \left[ -\frac{1}{B \sin(h+C)} \right] \quad (2)$$

Les variables A, B et C dépendent de l'état des troubles atmosphériques, leurs valeurs sont données par le tableau 1[7].

Tableau. I: Valeur des variables A, B et C

Hypothèses	Variables		
	A	B	C
Conditions normales	1230	3.8	1.6
Ciel très pur	1220	6	1
Zone industrielle	1260	2.3	3

b) Eclairage diffus (D)

C'est l'éclairage diffusé par les composantes de l'atmosphère, provenant de la totalité du ciel à l'exception du disque solaire. La composante verticale  $D^*$  du rayonnement direct diffus parvenant au sol vaut alors [7]:

$$D^* = 0.5(I_e - I_0) \sin(h) \quad (3)$$

Avec :  $I_e$  c'est la quantité qui se déduit de la constante solaire [W/m<sup>2</sup>]. Finalement, on a la forme de l'éclairage diffus (D) [7] :

$$D(i) = \left( \frac{1 + \cos(i)}{2} \right) D^* + \left( \frac{1 - \cos(i)}{2} \right) p G^* \quad (4)$$

Avec :

$G^*$  : L'éclairage global reçu par la même surface [W/m<sup>2</sup>].

P : l'albédo du sol [%].

i : l'angle de l'inclinaison du concentrateur [degré].

$G^*$  est donné par les relations suivantes [7]:

1) Conditions normales:

$$G_{\max}^* = 1130(\sin(h))^{1.25} \quad (5)$$

2) Zone industrielle:

$$G_{\min}^* = 995(\sin(h))^{1.25} \quad (6)$$

3) Par ciel très pur:

$$G_{\text{moy}}^* = 1080(\sin(h))^{1.25} \quad (7)$$

Le rayonnement global (G) est égal à la somme du rayonnement direct (S) et le rayonnement diffus (D).

B. Principe de captation du rayonnement solaire

Les capteurs plans sont considérés comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions (rayonnement direct et diffus), par contre les capteurs à concentrations (comme notre cas) absorbent que le rayonnement solaire direct (S) [8]. La figure (1) présente les différents modes de captation du rayonnement.

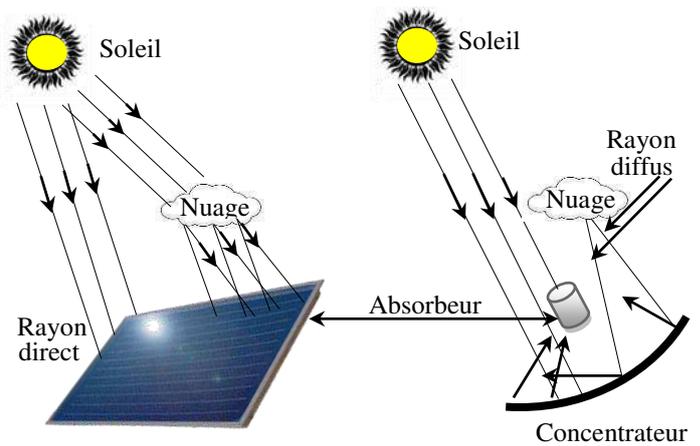


Fig.1 : Schématisation du principe de captation du rayonnement solaire.

C. Rappel des données astronomiques

a) La déclinaison ( $\delta$ ) :

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année comme, elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'été (+23,27°) et au solstice d'hiver (-23,27°). Elle est donnée par l'expression suivante [9]

$$\delta = 23,45 \sin \left[ 360 \left( \frac{d-80}{365} \right) \right] \quad (8)$$

b) L'angle horaire ( $\omega$ ):

L'angle horaire est donné par la relation suivante [9] :

$$\omega = 15^\circ(TSV - 12) \quad (9)$$

Avec TSV est temps solaire vrai [heure] calculé par cette expression :

$$TSV = TSM + \left( \frac{Et}{60} \right) \quad (10)$$

$E_t$  : variable de temps [minute]

c) Azimuth (a):

L'azimut (parfois orthographié azimut) est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence.

$$\sin(a) = \frac{\sin(\omega)\cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (11)$$

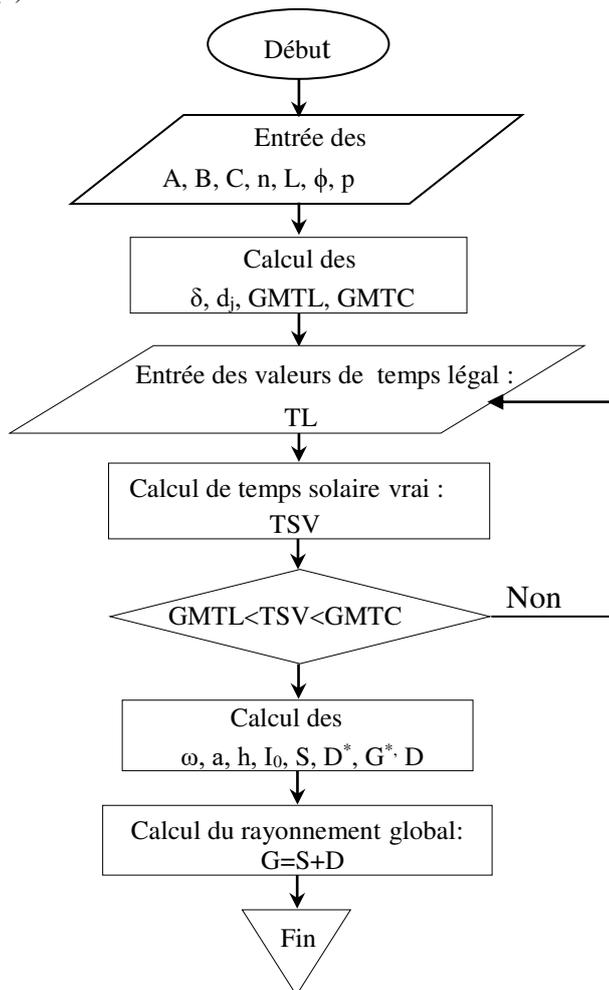
d) Hauteur du soleil (h):

Est donné par l'expression mathématique suivante [9] :

$$\sin(h) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\omega)\cos(\delta)\cos(\phi) \quad (12)$$

### III. CALCUL THERMIQUE DU CONCENTRATEUR

Un programme informatique a été développé pour simuler le rayonnement solaire global (G) à Batna. Le programme est écrit en langage FORTRAN. Il est formé de deux parties essentielles : La première partie fait le calcul des facteurs géométriques tel que: La déclinaison ( $\delta$ ), la durée du jour ( $d_j$ ), l'heure du lever et du coucher du soleil (GMTL et GMTC), le numéro du jour (n), et le temps solaire vrai (TSV). La deuxième partie fait le calcul des paramètres suivants l'angle horaire( $\omega$ ), la hauteur angulaire du soleil (h), l'éclairement direct et diffus et finalement l'éclairement global(G). L'organigramme de ce programme est présenté dans la figure (2).



**Fig.2 :** Organigramme du programme de calcul du rayonnement solaire global.

Le composant le plus important dans le concentrateur est le tube absorbeur, dans lequel circule le fluide caloporteur, et il est entouré d'une enveloppe transparente en verre pour éliminer les pertes par convection vers l'environnement. L'énergie solaire incidente absorbée, n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur, une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre.

Afin de calculer le bilan énergétique du concentrateur, on prend en considération les hypothèses suivantes:

- Le fluide caloporteur est incompressible (l'eau).
- La forme de la parabole est symétrique.
- La température ambiante autour du concentrateur est uniforme.
- L'effet de l'ombre du tube absorbeur sur le réflecteur est négligeable.
- Le flux solaire au niveau de l'absorbeur est uniformément réparti.

La température de sortie de l'eau ( $T_s$ ) est calculée à travers l'équation [10].

$$T_s = T_e + \frac{q_{utile}}{mcp} \quad (13)$$

Avec :

$T_e$  : Température d'entrée égale à 293[k].

$m$  : Débit massique d'eau [kg/s].

$cp$  : Chaleur spécifique d'eau égale à 4186 [joule/Kg.K].

On peut calculer la puissance utile par cette équation [11] :

$$q_{utile} = \eta_{th} \times S \times A_a \quad (14)$$

Avec :

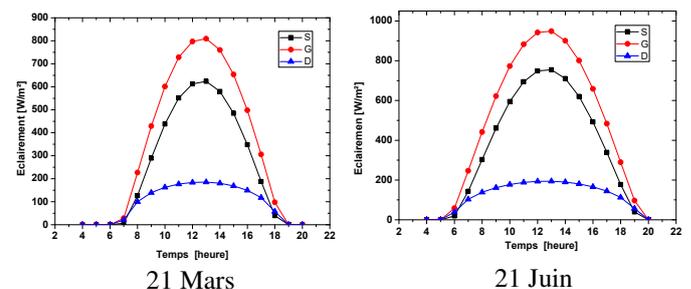
$S$  : Rayonnement direct [ $W/m^2$ ].

$A_a$  : Surface du concentrateur [ $m^2$ ].

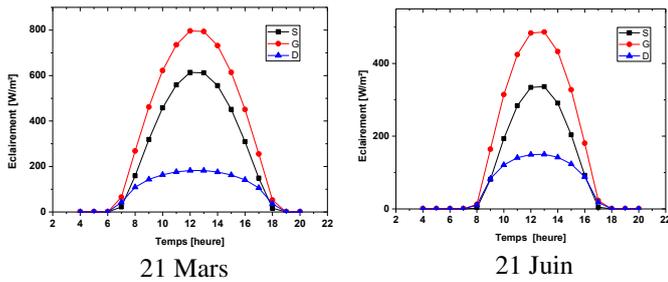
$\eta_{th}$  : Rendement thermique du concentrateur égale à 0,6

### IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les figures 3 et 4 représentent l'éclairement solaire global (G), direct (S) et diffus (D) sur un plan incliné de  $35^\circ,55$  et orienté vers le sud dans la région de Batna - Algérie pour les journées de : 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 décembre respectivement de la même année.

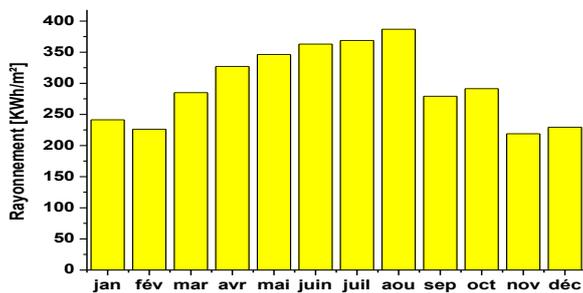


**Fig.3 :** Evolution du rayonnement solaire pour le 21 Mars et 21 juin.

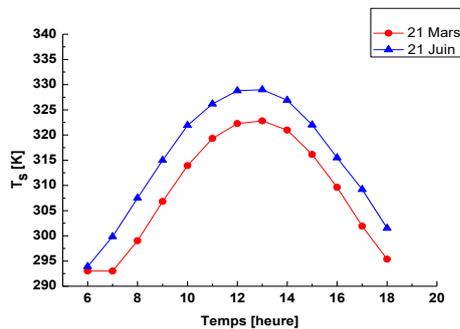


**Fig.4 :** Evolution du rayonnement solaire pour le 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre.

Le rayonnement global moyen mensuel à Batna est représenté sur la figure 5, on remarque que la valeur maximale vaut 400[KWh/m<sup>2</sup>] au mois d’août et la valeur minimale se situe en mois de novembre avec 210[KWh/m<sup>2</sup>].



**Fig.5 :** Le rayonnement solaire global mensuel à Batna.



**Fig.6:** Evolution de la température de sortie de l’eau pour le 21 Juin et le 21 Mars à Batna

Sachant que le débit massique moyen de l’eau à l’intérieur du tube absorbeur est 0.015kg /s, la figures 6 représente l’évolution de la température de sortie pour les journées du 21 Mars et 21 juin. On constate que la valeur maximale est presque 330 [K]à midi en temps solaire vrai en été.

Les résultats montrent que la température de sortie de l’eau dépend du flux solaire incident et les paramètres de l’absorbeur qui peuvent être optimisés.

## V. CONCLUSION

Ce travail propose une étude thermique d’un concentrateur Cylindro-parabolique qui utilise l’eau comme fluide caloporteur et circule dans un absorbeur. Ce dernier est l’élément le plus essentiel du capteur solaire, il absorbe les rayons solaires et transmette la chaleur vers ce fluide caloporteur. L’étude entamée a été basée au premier lieu sur le calcul du rayonnement solaire global, diffus et direct à la ville de Batna. La puissance thermique utilisée par le concentrateur est calculé par la suite à partir de l’éclairement direct de cette région.

La température de sortie du tube absorbeur est presque 60 C° pour la journée du 21 juin dans la région de Batna avec une température d’entrée de 20 C° avec un débit d’eau utilisé de 0.015kg/s. Les résultats obtenus sont très encourageant pour plusieurs applications industrielles.

## REFERENCES

- [1] M.Ghodbane et al."Simulation Numérique d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique en El Oued, Algérie", International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), vol. 3, pp.68-74, 2015.
- [2] A.Hepbasli,Z.Alsuhaibani,"A key review on present status and future directions of solar energy studies and applications in Saudi Arabia", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 5021–5050, 2011.
- [3] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela and M.Pérez, "Parabolic-trough solar collectors and their applications", Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 1695–1721, 2010.
- [4] Z.D.Cheng et al. "Three dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector", International Communications in Heat and Mass Transfert vol.37, pp 782-787, 2010.
- [5] Ya-ling.He et al, "A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector", Renewable Energy, vol 36, pp.796-985, 2011.
- [6] P.Wang et al, "Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams", Applied Energy, vol 102,pp.449-460, 2013.
- [7] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, "Le rayonnement solaire conversion thermique et applications", Technique et documentation, Paris, 1980.
- [8] D. Guerraiche, "Simulation et Prédiction de la Radiation Solaire Directe Absorbée par un Champ deCapteurs Cylindro-Parabolique", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [9] J.A.Duffie, and .W.A.Beckman, "Solar energy thermal process", 2<sup>nd</sup> edition 1996.
- [10] M. Li and L.L. Wang, "investigation of Evacuated Tube Heated by Solar Trough Concentrating System", Energy Conversion and Management, vol. 47, pp. 3591 –3601, 2006.
- [11] S. Kalogirou, "Solar Energy Engineering- Processes and Systems", chap: Thermal analysis of parabolic trough collectors, 1<sup>st</sup>edition, pp. 199-202, 2009.



APRIL 28 – 30, 2018, SOUSSE - TUNISIA

## 5<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

### Effet de l'induction électromagnétique sur la désorption d'hydrogène

*Sihem Belkhiria, Chaker Briki, Mouhamed Housine Dhaou, Nasr Sdiri, Abdelmajid Jemni, Faouzi Askri, Sassi Ben Nasrallah,*

*Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques, ENIM, Université de Monastir  
[Sihem\\_belkhiria@yahoo.fr](mailto:Sihem_belkhiria@yahoo.fr), [chaker\\_briki@yahoo.fr](mailto:chaker_briki@yahoo.fr), [dhaou\\_2000tn@yahoo.fr](mailto:dhaou_2000tn@yahoo.fr), [sdirinasr@yahoo.fr](mailto:sdirinasr@yahoo.fr),*

*[abdelmajid.jemni@enim.rnu.tn](mailto:abdelmajid.jemni@enim.rnu.tn), [faouzi.askri@enim.rnu.tn](mailto:faouzi.askri@enim.rnu.tn), [sassi.bennasrallah@enim.rnu.tn](mailto:sassi.bennasrallah@enim.rnu.tn)*

#### Résumé

L'épuisement des sources fossiles et la demande croissante d'énergie ont poussé les chercheurs à développer de nouvelles techniques de stockage d'énergie. Parmi lesquelles, le stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques dans des Réacteurs Métal-Hydrogène (RMH) est recommandé. Bien que l'hydrogène puisse être stocké sous forme de gaz comprimé, de liquide cryogénique, le stockage sous forme d'hydrure métallique est considéré comme étant plus prometteur parce qu'il offre une grande capacité de stockage de l'hydrogène dans des conditions de pression et de température proches de l'ambiance (plus de sécurité). Le processus absorption/désorption de l'hydrogène par un métal (hydrure) est assez complexe. En effet, des transferts simultanés de chaleur et de masse ont lieu lors de la sorption de l'hydrogène par l'hydrure. Le processus de désorption nécessite l'apport de la chaleur au RMH (réaction endothermique). Cet apport est souvent fourni via des échangeurs de chaleur. Vu la faible conductivité thermique effective des hydrures métalliques, la propagation de la chaleur dans le milieu est difficile et le chauffage ne se fait pas d'une façon uniforme. Afin d'assurer un chauffage uniforme du milieu, on se propose d'utiliser l'induction électromagnétique. Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement le comportement d'un RMH lors de la désorption de l'hydrogène par le métal. L'effet de la tension appliquée sur la bobine est étudié. Une comparaison des résultats obtenus par induction électromagnétique et par échangeur de chaleur montre une amélioration de l'efficacité du réacteur.

#### Mots clés :

Hydrure métallique, Désorption d'hydrogène, transfert de chaleur, induction électromagnétique

#### 1. Introduction

L'épuisement des combustibles fossiles et l'augmentation de la demande d'énergie ont incité la communauté internationale à exploiter les énergies renouvelables. En raison de leurs caractères intermittents, ces énergies nécessitent un système de stockage. Le développement de nouvelles technologies de stockage d'énergie continue d'intéresser les chercheurs. L'hydrogène, en tant que vecteur d'énergie, pourrait émerger comme une solution efficace sérieuse pour utiliser l'énergie renouvelable et pour sauver le système énergétique mondial. Bien que l'hydrogène puisse être stocké sous forme de gaz comprimé et de stockage de liquide cryogénique, l'hydrure métallique est considéré comme plus prometteur car il offre une grande capacité de stockage de l'hydrogène à la pression atmosphérique et à la température; par conséquent, il est plus sûr que les systèmes de stockage gazeux et cryogéniques [3,4]. La forme de stockage solide est un moyen très attrayant car il est plus sûr et plus facile à manipuler que le stockage gazeux et cryogénique. Mais son développement est limité par un problème de transfert de chaleur dans le lit d'hydrure. En effet, la réaction d'absorption est fortement exothermique et la désorption est endothermique [5]. En conséquence, nous avons toujours besoin d'une température d'alimentation externe de refroidissement (chauffage), dans le cas de l'absorption (désorption). Les

hydrures métalliques sont généralement classés en fonction de leur température de fonctionnement: température basse ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ou température élevée ( $200\text{ }^{\circ}\text{K}$  -  $400\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) [6]. Mahran Valizadeh et al. [7] montrent que l'augmentation de la température du fluide améliore la cinétique de désorption de l'hydrure intermétallique LaNi<sub>5</sub>. Ha et al. [8] montrent que l'absorption d'hydrogène par l'intermétallique LaNi<sub>5</sub> est régie par le transfert de chaleur du lit d'hydrure au fluide de refroidissement entourant le système de stockage. Le taux de désorption, ainsi que le taux d'absorption, dépendent fortement des quantités de chaleur éliminées ou fournies au système métal-hydrogène. Beaucoup de recherches montrent que le transfert de chaleur est un phénomène très important et doit être pris en compte pour améliorer les performances de stockage de l'hydrogène sous forme solide et donc pour développer un réservoir d'hydrogène efficace. Pour améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur du lit d'hydrure et par conséquent les performances du stockage d'hydrogène, il est nécessaire d'optimiser la conception du système de stockage en l'équipant par des échangeurs de chaleur efficaces. En général, les réacteurs métal-hydrogène peuvent être classés en 3 catégories: tubulaire, disque et réservoir ou réacteur à chambre [9]. Parmi les réacteurs conventionnels, ceux qui sont équipés d'un échangeur de chaleur spirale présentent une meilleure performance par rapport à d'autres configurations [9]. Une étude expérimentale et numérique a été réalisée par Demircan et al. [10] pour deux configurations système de stockage contenant l'alliage LaNi<sub>5</sub>. Le premier est un réacteur cylindrique refroidi sur sa surface latérale et sa base. Le second est formé par deux tubes concentriques et la poudre est introduite dans l'espace entre les deux tubes. Dans ce cas, en plus du refroidissement sur la surface latérale, il y a un échange de chaleur dans la cavité du tube interne. Ataer et al [11] ont montré que la configuration du réacteur de deux tubes concentriques présente un meilleur taux d'absorption d'hydrogène que celle du cylindre. S. Mellouli et al. [12] ont étudié l'effet de l'utilisation d'un échangeur de chaleur en spirale pour améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur du lit d'hydrure. Les résultats expérimentaux montrent que les temps de charge / décharge du réacteur sont considérablement réduits. Ensuite, un modèle mathématique a été développé par le même groupe de recherche [13] pour évaluer les différents modèles de réservoir de stockage de métal-hydrogène. Les résultats sont comparés avec des données expérimentales. Mitsutake et al [14] ont étudié expérimentalement et numériquement la possibilité d'équiper un système de stockage de spires longitudinales et radiales. Ces échangeurs permettent un transfert de chaleur plus rapide et plus puissant entre le lit d'hydrure et le fluide de chauffage. Malgré que toutes ces méthodes améliorent considérablement le transfert de chaleur, mais elle restent souffrir, pour une faible conductivité thermique effective des hydrures intermétalliques, de la difficulté de la propagation de la chaleur entre le fluide chaud et le lit d'hydrure. Le chauffage n'est pas donc uniforme dans le lit d'hydrure, en particulier lorsque le réacteur a une masse importante. En conséquence, le temps de réaction est encore long et il ya une perte de chaleur le long de l'installation. D'autre part, la désorption sous une température élevée ( $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nécessite une quantité importante d'énergie. En outre, l'intégration de l'échangeur dans le réacteur affecte sa capacité en termes de capacité de stockage. En effet, le volume occupé par l'échangeur sera au détriment de sa capacité de la poudre d'hydrure.

L'idée de ce papier est d'utiliser un autre système de chauffage: le chauffage par induction électromagnétique (IEM). Le chauffage par IEM a une particularité de générer de la chaleur directement dans les matériaux. Cette caractéristique présente de nombreux avantages par rapport aux procédés de chauffage traditionnels, tels que la réduction du temps de chauffage ou la capacité de chauffer le milieu uniformément. Le chauffage par IEM a été adopté dans diverses applications. L'exemple le plus concret est basé sur le fonctionnement d'une plaque d'induction. Il est également utilisé pour les techniques de trempe, de soudage, de fonderie et de scellage des conteneurs. Pour les procédés de fabrication modernes, le chauffage EMI offre une combinaison attrayante en termes de vitesse, de consistance, de contrôle et d'efficacité énergétique. Il respecte l'environnement et économique en termes d'énergie.

## 2. Dispositif et procédure expérimentale

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Il est constitué essentiellement par un petit réacteur en cuivre (diamètre intérieur: 30 mm, diamètre extérieur 38 mm, hauteur intérieure 15 mm, hauteur extérieure 20 mm masse 0,8 kg) contenant 30 g D'une poudre LaNi<sub>5</sub> activée par des cycles successifs d'absorption-désorption. La granulométrie est d'environ 15  $\mu\text{m}$  et la porosité est d'environ 0,5. Le réacteur est entouré d'une petite bobine de 128 spires (rayon  $a = 40\text{ mm}$  et longueur  $h = 24\text{ mm}$ ). La résistivité de la bobine est d'environ 0,8  $\Omega$ . La bobine est traversée par un courant alternatif délivré par un générateur de fréquence de 50 Hz à tension réglable. Le réacteur est également équipé d'un échangeur de chaleur externe appliqué sur la surface latérale. Un bain thermostatique (9,2 A, 2024 W) est utilisé pour alimenter l'échangeur de chaleur avec de l'eau dont la plage de températures est comprise entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le réacteur est relié à un réservoir d'hydrogène ( $134,6\text{ cm}^3$ ) par des tubes de raccordement ( $29,13\text{ cm}^3$ ).

Deux thermocouples positionnés à l'intérieur et à l'extérieur du réacteur sont utilisés. La pression dans le lit d'hydrure est mesurée en installant un capteur entre le réservoir d'hydrogène et le lit d'hydrure. Tous ces capteurs sont connectés à une carte d'acquisition installée sur un ordinateur. Elle permet de mesurer les évolutions temporelles de température et de pression.

L'expérience commence par l'absorption. On charge le réservoir d'hydrogène à la pression désiré et on le met en contact avec le réacteur. La pression d'hydrogène diminue jusqu'à atteindre une valeur stable. Puisque la réaction d'absorption est exothermique, on refroidi le lit d'hydrure par le l'eau froide provenant du bain thermostaté. La désorption est la réaction inverse. L'hydrogène passe du réacteur vers le réservoir. Elle est endothermique, on chauffe, donc, le lit d'hydrure pour la déclencher. Le dispositif expérimentale utilisé équipé de deux systèmes de chauffage se: chauffage par fluide chaud provenant du bain thermostaté et chauffage par IEM avec une tension de 5 V et 7 V.

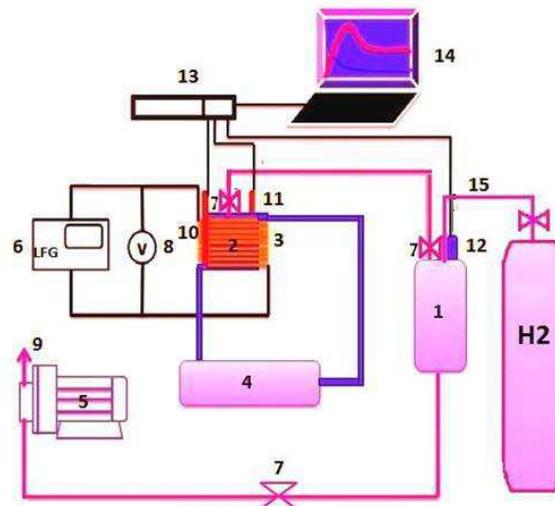


Figure 1 : Dispositif expérimentale

### 3. Résultats et discussion

Notre étude se focalise à l'étude de l'effet de l'IEM sur le vitesse de chauffage, le temps de réaction et l'énergie dissipée.

Figure 2 montre la variation des températures à l'intérieur de la paroi du réacteur. On observe que, pour les deux modes de chauffage, la paroi de cuivre se réchauffe plus vite que l'échantillon. Ceci est du à la différence de chaleur massique entre le réacteur et l'échantillon.

Le chauffage par induction se produit plus rapidement que le chauffage par le fluide provenant du bain thermostatique. La vitesse de chauffage, lors de l'utilisation de l'IEM, augmente avec l'augmentation de la tension. Il est à noter que la température à l'intérieur du réacteur et la température sur la paroi deviennent égales, dans le cas du chauffage par induction, après un court laps de temps. Dans le cas du chauffage par fluide chaud, les courbes de température ne se croisent pas. Cette intersection des températures, lorsque le chauffage est par IEM, est due à l'importance de l'accumulation de chaleur dans le lit d'hydrure.

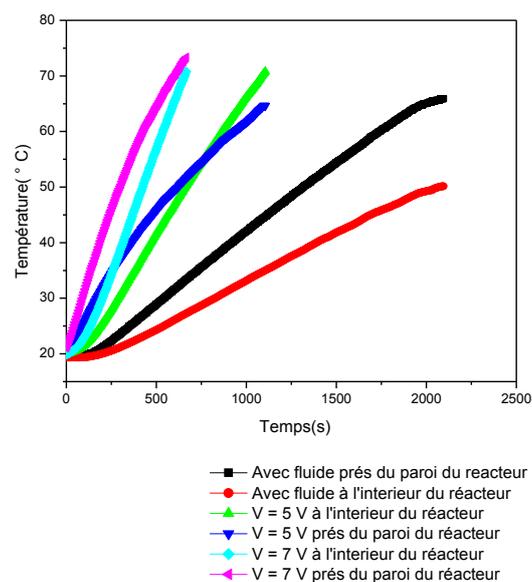


Figure 2 : Température à l'intérieur et près de la paroi du lit d'hydrure

Pour démontrer l'effet de l'IEM sur le temps du chauffage et sur le temps du réaction de désorption on a tracé la masse désorbé en fonction du temps pour différentes températures (50 ° C, 60 ° C et 70 ° C) lorsque le chauffage se fait par fluide chaud et lorsque le chauffage se fait par IEM à 5 V et 7 V (Figure 3, Figure 4 et Figure 5). La désorption est assurée par la mise en contact du lit d'hydrure saturé à un réservoir dont la pression initiale est fixée. Cette mise en contact est effectuée lorsque la température dans le milieu d'hydrure atteint celle fixé. On remarque d'après ces figures que le temps de réaction de désorption se réduit considérablement, pour les trois températures, lorsque le chauffage se fait par IEM. Cette réduction du temps de réaction est plus importante lorsque la tension appliquée est de 7 V.

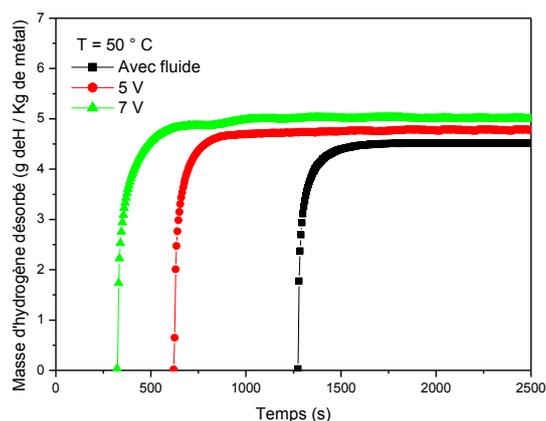


Figure 3 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 50 ° C

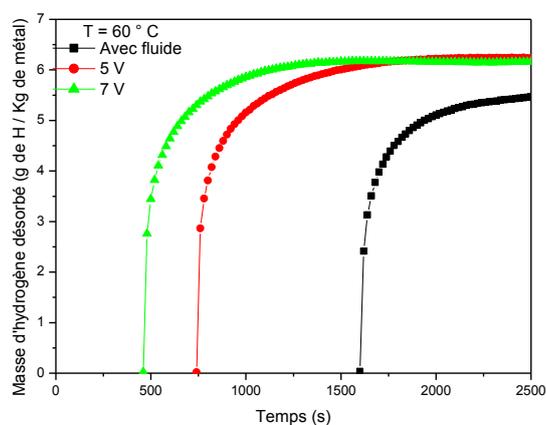


Figure 3 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 60 ° C

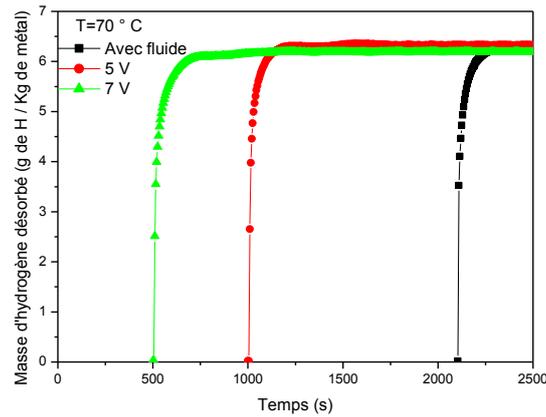


Figure 4 : Masse d'hydrogène désorbé à T = 70 ° C

La figure 5 et la figure 6 montrent que l'énergie dissipée pour désorber 80 % de la masse de l'hydrogène stocké lorsque le chauffage se fait par circulation du fluide chaud, est largement plus élevée que celle dissipé dans le cas du chauffage par IEM. Ceci est due à la longue durée mise pour chauffer l'échantillon à la température souhaité.

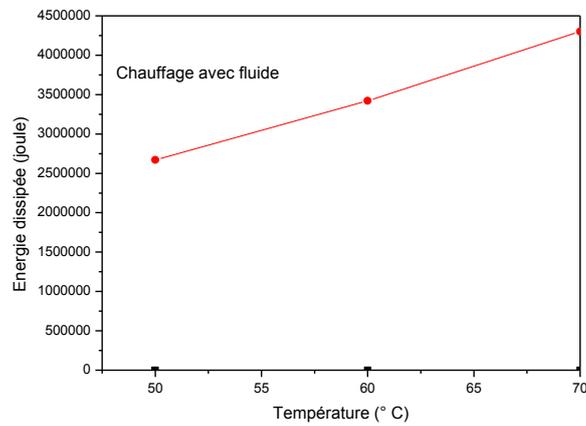


Figure 5 : Energie dissipée pour désorber 80 % de la masse lors que le chauffage se fait par circulation du fluide chaud

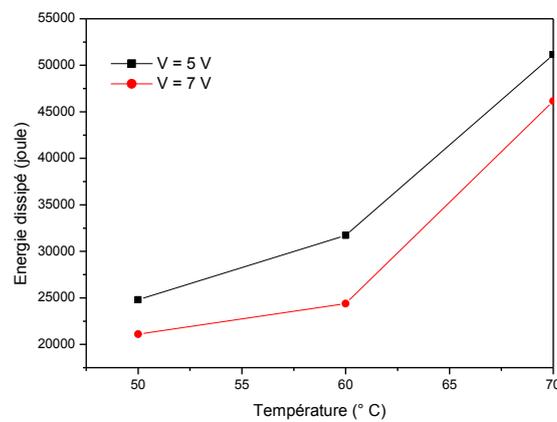


Figure 6 : Energie dissipée pour désorber 80 % de la masse lors que le chauffage se fait par IEM à 5 V et 7 V

## Conclusion

Dans ce travail nous avons expérimentale relative à l'amélioration des performances de réaction métal-hydrogène lors de la désorption. Deux types de chauffage du réacteur ont été considérer à savoir : chauffage par circulation d'eau chaude et chauffage par IEM. Les résultats montrent que l'utilisation de l'IEM améliore largement les performances du réacteur métal-hydrogène lors de la désorption en terme du temps de désorption et en terme d'énergie consommé

## Références

- [1] I.P. Jain, Hydrogen the fuel for 21st century, International Journal of Hydrogen energy, volume 34, page 7368-7378, 2009.
- [2] M. Anik, F. Karanfil, N. Kuçökdıveci, Development of the high performance magnesium based hydrogen storage alloy, International Journal of Hydrogen energy, volume 37, page 299-308, 2012.
- [3] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, International Journal of Hydrogen energy, volume 41, page 14535-14552, 2016.
- [4] S. Mellouli, E. Abhilash, F. Askri, S. Ben Nasrallah, Integration of thermal energy storage unit in a metal hydride hydrogen storage tank, Applied Thermal Engineering, volume 102, page 1185-1196, 2016.
- [5] A. Jemni, S. Ben Nasrallah, J. Lamloumi, Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor, International Journal of Hydrogen energy, volume 24, page 631-642, 1999.
- [6] S. Mellouli, E. Abhilash, F. Askri, S. Ben Nasrallah, Integration of thermal energy storage unit in a metal hydride hydrogen storage tank, journal of Applied Thermal Engineering, volume 102, page 1185-1196, 2016.
- [7] M. Valizadeh, M. Aghajani Delavar, M. Farhadi, Numerical simulation of heat and mass transfer during hydrogen desorption in metal hydride storage tank by Lattice Boltzmann method, International Journal of Hydrogen energy, volume 41, page 413-424, 2016.
- [8] M. Yeong Ha, I. Kyu Kim, H. Song, S. Sung, D. HyukLee, A numerical study of thermo-fluid phenomena in metal hydride beds in the hydriding process, International Journal of Heat and Mass Transfer, volume 47, page 2901-2912, 2004.
- [9] S. Shafiee, MH. McCay, Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride hydrogen storage systems- a review, International Journal of Hydrogen energy, volume 41, page 9462-9470, 2016.
- [10] A. Demircana, M. Demiralp, Y. Kaplan, M.D. Mat, T.N. Veziroglu, Experimental and theoretical analysis of hydrogen absorption in LaNi<sub>5</sub>-H<sub>2</sub> reactors, International Journal of Hydrogen energy, volume 30, page 1437-1446, 2005.
- [11] M. Bilgili, Ö. Ataer, Numerical analysis of hydrogen absorption in a P/M metal bed, Powder Technology, volume 160, page 141-148, 2005.
- [12] S. Mellouli, F. Askria, H. Dhaoua, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, A novel design of a heat exchanger for a metal-hydrogen reactor, International Journal of Hydrogen energy, volume 32, page 3501-3507, 2007.
- [13] S. Mellouli, F. Askri, H. Dhaou, A. Jemni, S. Ben Nasrallah, Numerical study of heat exchanger effects on charge/discharge times of metal-hydrogen storage vessel, International Journal of Hydrogen energy, volume 34, page 3005-3017, 2009.
- [14] Y. Mitsutake, M. Monde, K. Shigetaka, S. Tsunokake, T. Fuura, Enhancement of heat transfer in hydrogen storage tank with hydrogen absorbing alloy (optimum fin layout), Heat Transfer-Asian Research, volume 37, page 165-183, 2008.



5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
(GEEE-2018)

## **Etude de l'effet des particules sur les paramètres cinétiques de jet diphasique turbulent**

Mariem Bayouhd, Touati Hazem, Ben N'Ticha Hmaied,

Ecole Nationale d'ingénieurs Monastir Rue Ibn El Jazzar 5000 Monastir

[bayouhdmaryam@live.fr](mailto:bayouhdmaryam@live.fr); [touati\\_2001@yahoo.fr](mailto:touati_2001@yahoo.fr); [hmaied\\_benticha@yahoo.fr](mailto:hmaied_benticha@yahoo.fr);

### **Abstract**

**Des simulations numériques utilisant un modèle eulérien à deux fluides ont été réalisées pour des jets axisymétriques bidimensionnels issus d'une buse circulaire de 20 mm de diamètre. La taille des particules est comprise entre 30 et 180 µm et la charge de particules varie de 0.1 à 1. Les modulations sur les structures d'écoulement et les caractéristiques turbulentes de l'écoulement de gaz dues aux particules solides avec différentes tailles et taux de chargement de particules sont étudiées. L'étalement du jet et la décroissance de la vitesse moyenne de la ligne centrale sont calculés pour toutes les tailles et taux de chargement de particules considérées dans la présente étude. Les ajouts de particules solides dans le flux de gaz modulent de manière significative la turbulence du gaz dans la buse ainsi que les débits d'écoulement. Les particules fines suppriment la turbulence, tandis que les particules grossières l'améliorent.**

**Mots clés :** écoulement diphasique, turbulence, jet diphasique, taux de chargement

### **I. Introduction**

Les écoulements turbulents de gaz particules -solides dans les conduites ont de nombreuses applications allant des systèmes de transport pneumatique aux gazéificateurs de charbon. Ces écoulements sont très complexes et influencés par divers phénomènes physiques, tels que les interactions particule-turbulence, les forces de traînée, gravitationnelles et visqueuses et les forces de portance, etc. Dans ce travail, on se propose d'étudier numériquement le comportement dynamique de l'écoulement et analyser l'effet du taux de chargement en particules sur l'écoulement du gaz et sur la turbulence. . On a adopté une approche eulérienne-eulérienne pour modéliser la phase solide et le modèle k-ε

pour modéliser la turbulence. Plusieurs auteurs se sont intéressés par les écoulements diphasiques

**Patro et Al** [1] ont montré que les petites particules atténuent la turbulence, tandis que les plus grosses augmentaient la turbulence dans le jet. **Abramovich** [2] a étudié explicitement des jets monophasés turbulents, ronds et symétriques. Les jets ronds et symétriques chargés de particules ont également été étudiés par de nombreuses personnes expérimentalement et numériquement [3-6].

### **II. Modélisation numérique :**

Le modèle numérique résout les équations standards pour la conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement dans la géométrie d'un brûleur coaxial.

Le modèle k-ε présenté par Launder et Spalding [7] est utilisé pour modéliser l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique ε.

Les équations directrices pour une description eulérienne des écoulements gaz-solide dilués et turbulents suivent celles données par Bolio et al [8].

#### **i. Modélisation de la phase fluide :**

##### **• Equation de conservation de la masse :**

$$\bullet \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_f U_{fi}) = 0$$

##### **• Équations de conservation de la quantité de mouvement :**

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_f \rho_f U_{fi} U_{fj}) \\ = -\alpha_f \frac{\partial P}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \mu_f \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \right] \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_f \mu_f \langle U_{fi} U_{fj} \rangle) + \alpha_f \rho_f g_i + S_{pui} \end{aligned}$$

tel que  $S_{pui} = \frac{\alpha_f \rho_p}{\tau_p} (U_{pi} - U_{fi})$

- Equation de d'énergie cinétique turbulente :

$$\begin{aligned} \alpha_f \rho_f U_{fj} \frac{\partial k_f}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \rho_f \left( v_f + \frac{v_{tf}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \right] - \\ \alpha_f \rho_f \langle U_{fi} U_{fj} \rangle \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_j} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + S_{pk} \end{aligned}$$

tel que

$$S_{pk} = \frac{\alpha_p \rho_p}{\tau_p} \left( |U_{pi} - U_{fi}|^2 + (|k_p - k_f|) \right)$$

- Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente :

$$\begin{aligned} \alpha_f \rho_f U_{fj} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \rho_f \left( v_f + \frac{v_{tf}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_j} \right] - \\ \alpha_f \rho_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} \left[ C_{\varepsilon 1} f_1 \langle U_{fi} U_{fj} \rangle \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon_f \right] + S_{p\varepsilon} \end{aligned}$$

Tel que

$$S_{p\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\kappa} C_3 S_{pk}$$

$$\begin{aligned} \langle U_{fi} U_{fj} \rangle = \frac{2}{3} k_f \delta_{ij} - v_{tf} \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \text{ avec } v_{tf} \\ = C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \end{aligned}$$

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.33

tel que les constantes de modèle  $\kappa$ - $\varepsilon$  sont :

ii- Modélisation de la phase particule :

Conservation de nombre des particules :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (n_p U_{pi}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right)$$

Conservation de quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (n_p U_{pj} U_{pi}) \\ = n_p g_i + n_p (U_{fi} - U_{pi}) \frac{1}{\tau_{pf}} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ n_p v_p \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_p}{\sigma_p} \left( U_{pj} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} + U_{pi} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned}$$

Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente :

les grandeurs de turbulence pour la phase solide sont obtenues en utilisant le modèle algébrique de Hinze-Tchen [9] de dispersion de particules discrètes par turbulence homogène.

Les grandeurs turbulentes (telles que l'énergie cinétique turbulente et la vitesse de dissipation turbulente) de la phase solide sont données en fonction des caractéristiques moyennes de la phase gazeuse :

$$\begin{aligned} \kappa_p = \kappa_f * \left( 1 + \frac{\tau_p}{\tau_T} \right)^{-1} \text{ avec } \tau_T = \frac{\kappa_f}{\varepsilon_f} \\ \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f} \end{aligned}$$

**3. Configuration :**

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

Le jet émerge d'un tube de diamètre 2 cm, avec pour vitesse débitante 12,6 m/s. Il est entouré par un écoulement de confinement co-courant de diamètre 0,6 m, de vitesse 0,05 m/s faible devant la vitesse débitante du jet. A la sortie du tube de longueur 90 fois son diamètre, la turbulence est pleinement développée. La vitesse des billes est proche de celle de l'air si l'on se fie aux mesures de Modarres et al. Des billes de verre sphériques de taille uniforme et de densité de 2990 kg / m ont été introduites dans le jet.

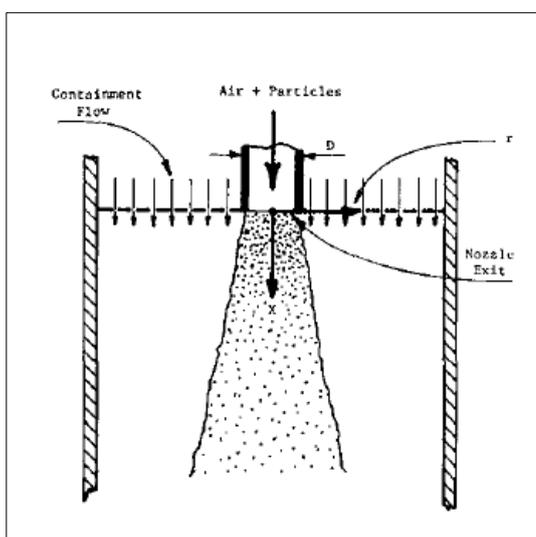


Figure1. Champ d'écoulement autour d'un jet

**Résultats et interprétations**

**1. Validation**

Pour les positions axiales  $X/D=20$  (Figure2.a) et  $X/D=30$  (Figure2.b) et on a représenté les courbes de vitesses radiales ainsi que l'intensité turbulente trouvés.(Figure3.et 4.). Les résultats trouvés montrent un accord satisfaisant avec les mesures expérimentales.

**1. Profil Radiale de vitesse axiale :**

\*pour  $\phi=0.32$   $x/D=20$

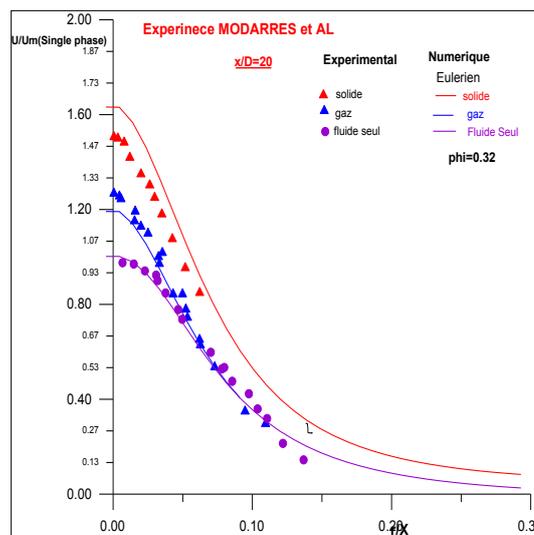


Figure2.a. Profil radial de vitesse axiale à la section  $x/D=20$   
 et pour  $\phi=0.32$

\*pour  $\phi=0.32$   $x/D=30$

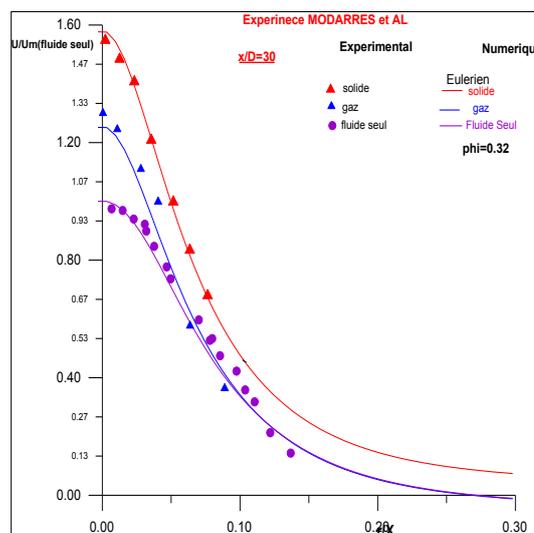


Figure2.b. Profil radial de vitesse axiale à la section  $x/D=30$   
 et pour  $\phi=0.32$

**1. Profil axiale de vitesses : ( $x/d = 20 - \phi_m = 0,32$ )**

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

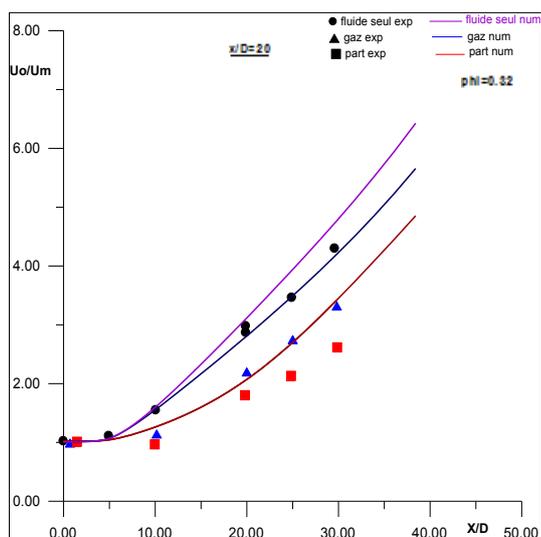


Figure3. Profil axiale de vitesse axiale pour  $\phi=0.32$

2. Profil radiale de l'énergie cinétique turbulente :

$(x/d = 20 - \phi_m = 0,3$

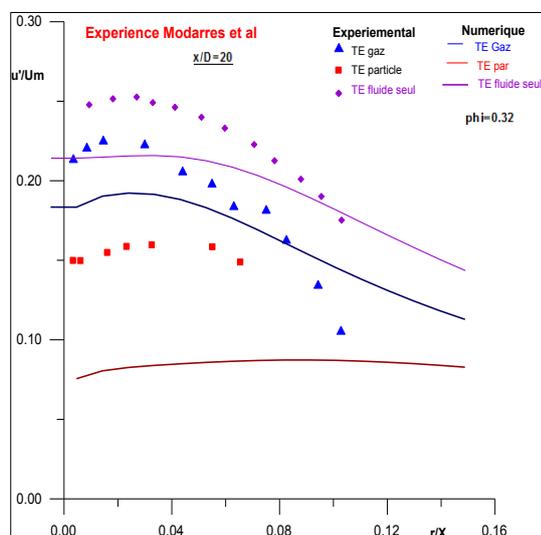
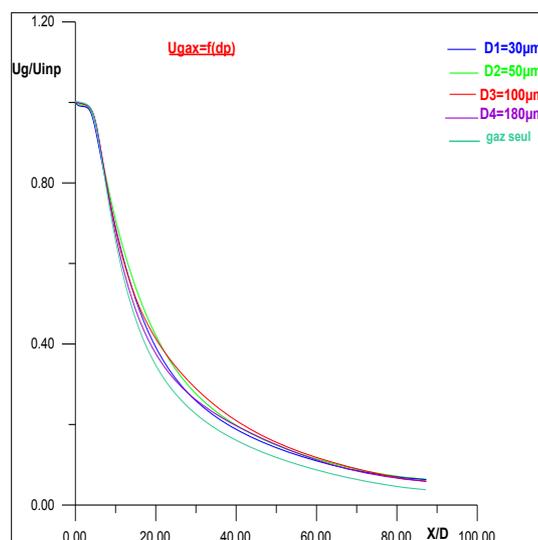


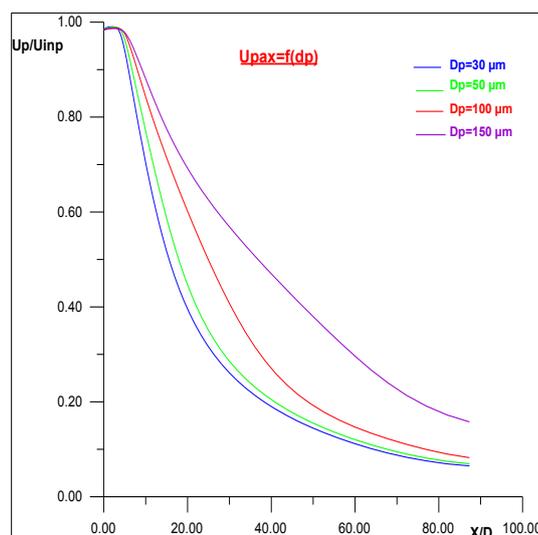
Figure4. Profil radial de l'énergie cinétique turbulente axiale à la section  $x/D=20$  et pour  $\phi=0.32$

**I- Variation de la vitesse axiale le long de la ligne centrale.**

1. Effet de variation de diamètre de la particule :



(a)



(b).

Figure5. Variation de la vitesse de la ligne centrale pour différentes tailles de particules : (a) phase gazeuse et (b) phase solide  $\rho_s = 1000 \text{ kg / m}^3$ ,  $\text{taux}=0.4$

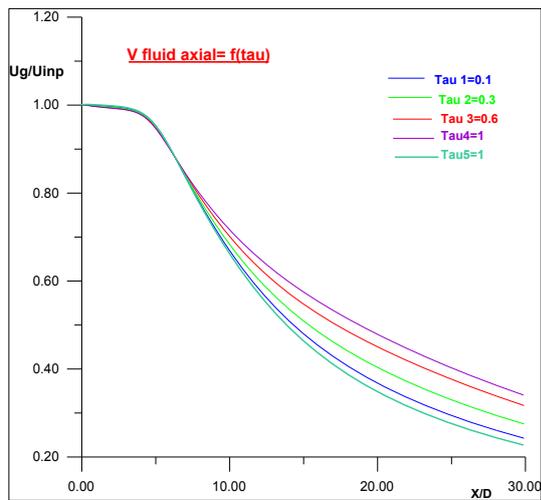
L'effet de la variation des diamètres des particules sur l'écoulement des deux phases est illustré à la figure 5 qui montre l'allure de la vitesse sur l'axe pour différents diamètres des particules..

L'augmentation de la taille des particules augmente le déclin de la vitesse de la phase gazeuse et diminue la vitesse de décroissance de la vitesse de la phase solide le long de la ligne centrale. Les

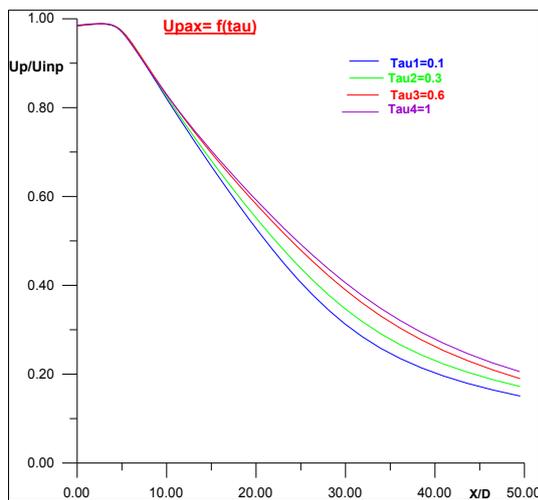
5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

particules les plus lourdes se dispersent lentement le long de la direction radiale, en raison de l'inertie, et par conséquent, la plupart d'entre elles sont distribuées près de la ligne médiane du jet. Ceci obstrue le mouvement du fluide près de la région centrale et la vitesse du gaz diminue.

Effet de la variation du taux de chargement :



(a)



(b)

Figure6. Variation de la vitesse de la ligne centrale pour différents taux de chargements de particules : (a) phase gazeuse et (b) phase solide  $\rho_s=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_p=50 \mu\text{m}$

La figure 6 montre l'influence du taux de chargement sur la décroissance axiale de la vitesse moyenne. On constate que le taux de décroissance de la vitesse axiale devient lent à mesure que le taux de chargement augmente. Les grands tourbillons produits par l'air entraîné se divisent en tourbillons plus petits lorsque le taux de chargement d'une taille fixe des particules augmente [10]. Ainsi, l'énergie turbulente associée à ces tourbillons est atténuée. Par conséquent, avec une grande charge de particules, l'échange de quantité de mouvement entre les phases devient minimal. Par conséquent, le taux de décroissance de la vitesse est ralenti.

**II-Distribution radiale des profils de vitesse :**

**Effet du taux de chargement.** La figure 7 présente l'effet de taux de chargement sur la vitesse moyenne à  $X/D=20$  pour des particules de  $50 \mu\text{m}$ . La vitesse axiale des deux phases croît en augmentant le taux de chargement, cette croissance est plus nette pour la phase gazeuse. Il en résulte un jet plus étroit que le jet monophasé.

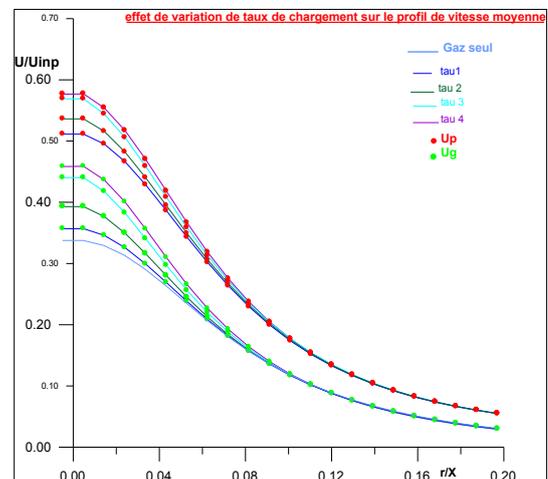


Figure7. Effet du taux de chargement sur les profils de vitesse moyenne à  $X/D=20$ ,  $d_p=50 \mu\text{m}$  et  $U_m=10 \text{ m/s}$ ,  $\rho_p=1020 \text{ Kg/m}^3$

**L'intensité turbulente :**

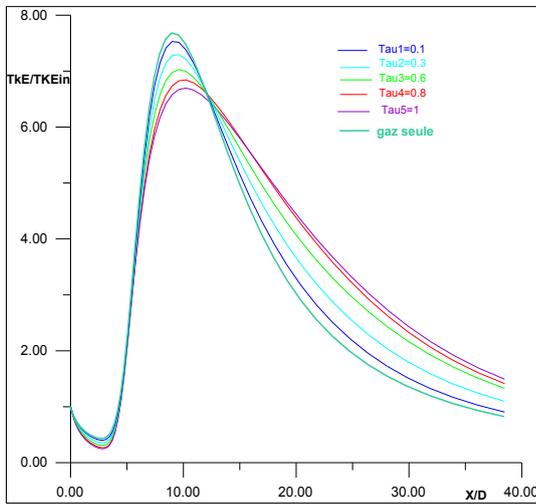
La fluctuation de la turbulence est supposée être isotrope dans le modèle  $k-\epsilon$ . Pour quantifier la modification de la turbulence due à l'addition de particules, on va utiliser le pourcentage de modulation de turbulence (TM) est calculé comme :

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

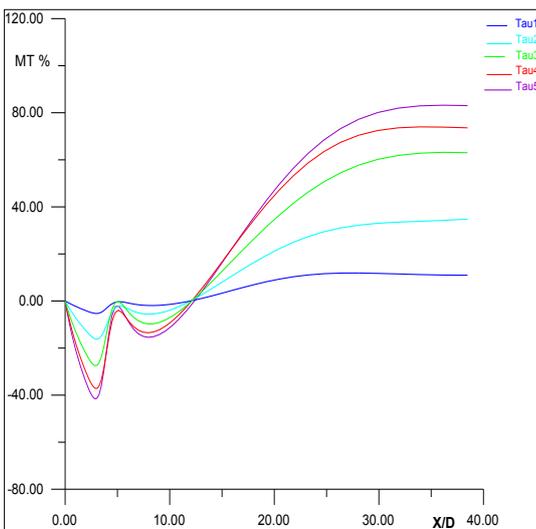
$$\text{Pourcentage TM} = \frac{K_{g,TP} - K_{g,SP}}{K_{g,SP}} \times 100$$

Les indices TP et SP se réfèrent au flux diphasique et au flux monophasé, respectivement. Une valeur positive pour le pourcentage TM indique une amélioration de la turbulence, tandis qu'une valeur négative indique une atténuation de la turbulence.

**1. Effet du taux de chargement sur l'intensité turbulente**



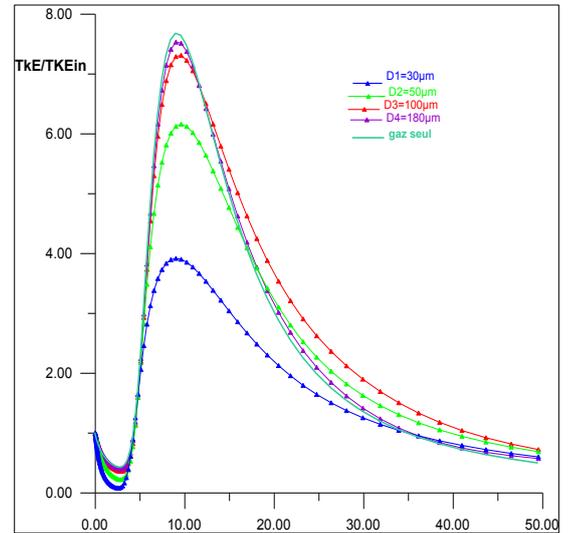
(a)



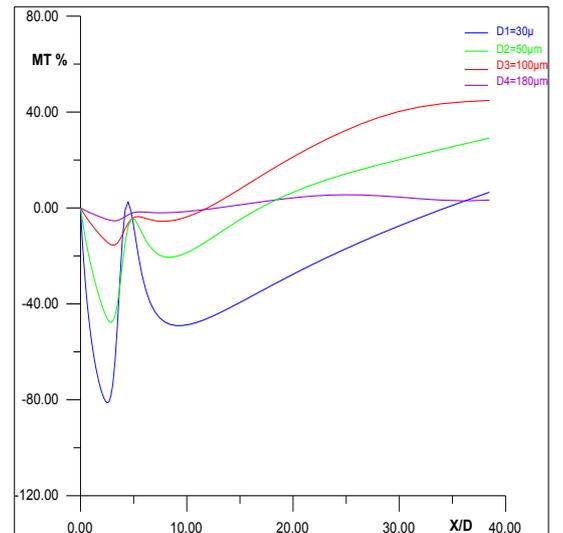
(b)

Figure8. Variations pour différents taux de chargement des de particules de (a) énergie cinétique turbulente et (b) modulations turbulentes sur la ligne centrale en

fonction de la distance axiale,  $\rho_s = 3000 \text{ kg / m}^3$ ,  $d_p = 50 \mu\text{m}$



(a)



(b)

Figure9. (a) énergie cinétique turbulente et (b) modulations turbulentes le long de la ligne centrale,  $\rho_s = 1000 \text{ kg / m}^3$ ,  $\text{Taux} = 0.4$

La distribution axiale de l'énergie cinétique turbulente, normalisée par sa valeur initiale, est présentée aux Fig. 8 (a) et 9 (a) pour différentes tailles de particules et taux de chargement. On observe que, après une diminution initiale due au développement du jet, l'énergie cinétique turbulente augmente fortement et diminue ensuite.

Le résultat en monophasé est également représenté sur la

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
(GEEE-2018)

figure 9 (a). Les petites particules dissipent la turbulence plus que les grosses particules. Ceci est lié à une augmentation significative de l'échelle de longueur turbulente intégrale avec le diamètre des particules.

D'après la figure 9 (a), on peut voir qu'avec l'augmentation du taux de chargement, l'énergie cinétique turbulente diminue dans la région du développement de l'écoulement pour augmenter ensuite le long de la ligne centrale. Les figures 8 (b) et 9 (b) présentent le pourcentage de modulation de turbulence (TM) dans le jet à deux phases le long de la ligne centrale. On observe que les particules fines (30  $\mu\text{m}$ ) atténuent la turbulence dans toute la ligne centrale.

Les autres particules grossières provoquent une atténuation dans la région en développement (jusqu'à  $X/D=15$ ) et un rehaussement dans la région où l'échelle de longueur intégrale de turbulence ( $L_0$ ) est plus élevée. Une tendance similaire se produit pour différents taux de chargement.

### Conclusion

Une simulation CFD a été effectuée pour un écoulement de gaz turbulent contenant des particules solides dispersées diluées dans une buse agissant dans la direction verticale vers le bas.

Le modèle d'Euler-Euler a été réalisé pour les flux de gaz solide pour différentes tailles et taux de chargements des particules. Le modèle de turbulence  $k-\epsilon$  avec des termes supplémentaires représentant l'effet des particules solides avec la fonction de la paroi log-loi a été utilisé pour la phase gazeuse.

Cette étude a montré que la taille des particules et le taux de chargement sont les deux paramètres qui influencent considérablement l'écoulement diphasique.

Les particules solides ont affecté de manière significative la structure de la turbulence de la phase gazeuse dans la buse. De plus petites particules atténuent la turbulence, tandis que les plus grosses augmentent la turbulence dans le jet.

### Références

[1] **Patro P. and Dash S.** 2014, "Computations of Particle-Laden Turbulent Jet Flows Based on Eulerian Model" *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136 / 011301-1

[2] **Abramovich, G. N.**, 1963, *The Theory of Turbulent Jets*, MIT, Boston.

[3] **Hedman, P. O., and Smoot, L. D.**, 1975, "Particle-Gas Dispersion Effects in Confined Coaxial Jets," *AIChE J.*, 21, pp. 372–379.

[4] **Modarress, D., Tan, H., and Elghobashi, S.**, 1984, "Two Component LDA Measurements in a Two Phase Turbulent Jet," *AIAA J.*, 22(5), pp. 624–630.

[5] **Crowe, C. T., Gore, R. A., and Troutt, T. R.**, 1985, "Particle Dispersion by Coherent Structures in Free Shear Flows," *Part. Sci. Technol.*, 3, pp. 149–158.

[6] **Hardalupas, Y., Taylor, A. M. P. K., and Whitelaw, J. H.**, 1989, "Velocity and Particle-Flux Characteristics of Turbulent Particle-Laden Jets," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 426, pp. 31–78.

[7] **Lauder et Spalding B.E.** Launder et D. B. Spalding, *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Computer Methods in Mechanics and Engineering, Volume 3, Pages 269-289, 1974.

[8] **Bolio, E. J., Yasuna, J. A., and Sinclair, J. L.**, 1995, "Dilute Turbulent Gas-Solid Flow in Risers With Particle-Particle Interactions," *AIChE J.*, 41(6), pp. 1375–1388.

[9] **Hinze-Tchen J. O.**, 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, New York.

[10] **Gillandt, I., Fritsching, U., and Bauckhage, K.**, 2001, "Measurement of Phase Interaction in Dispersed Gas-Particle Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, 27, pp. 1313–1332.

# Evolution de la microstructure des aciers T91 / T22 et leurs joints soudés

Walid Jhinaoui<sup>#1</sup> Doctorant, Seifallah Fetni<sup>#2</sup>, Jaleledine Briki<sup>#3</sup>

<sup>#</sup> Laboratoire de la Mécanique Appliquée et Ingénierie, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis  
Tunis el Manar, Tunisie

<sup>1</sup> [walidjh@gmail.com](mailto:walidjh@gmail.com)

<sup>2</sup> [seifallah.el.fetni@gmail.com](mailto:seifallah.el.fetni@gmail.com)

<sup>3</sup> [jalel.briki@enit.rnu.tn](mailto:jalel.briki@enit.rnu.tn)

Centrale Thermique de Rades-STEGER

Rades, Tunisie

[cprades@steg.com.tn](mailto:cprades@steg.com.tn)

**Résumé**— Ce document présente une étude sur l'évolution microstructurale des aciers ASTM A213 T91 et ASTM A213 T22 ainsi que leurs joints soudés après l'opération du soudage, l'éventuel traitement thermique post-soudage et l'exposition au fluage. La microstructure est examinée après fluage après traitement thermique, puis des essais de fluage pour une température de 625°C et différents niveaux de chargement sont appliqués afin d'estimer la tenue au fluage des joints soudés dans les conditions avancées de pression et de vapeur.

**Mots-clés**— Centrale thermique – Environnement - Soudage – Traitement thermique – Comparaison.

## I. INTRODUCTION

Les centrales thermiques telles que les installations à flamme, jouent un rôle très important à travers le monde pour la production de l'électricité, néanmoins elles doivent satisfaire la sécurité de leurs installations, la réduction de l'émission des gaz polluants tout en favorisant une meilleure efficacité du rendement et le moindre coût de maintenance.

Le bon fonctionnement des installations de ces centrales nécessite l'utilisation des aciers de hautes performance afin de résister à un milieu corrosif très avancé de point de vue température de vapeur et pression [650°C, 300MPa].

Les aciers martensitiques (de 9 à 12 % de chrome) représentent des candidats privilégiés pour assurer le bon fonctionnement de ses installations. Parmi ces aciers, on cite : les T91, T22.

Ces aciers permettent d'optimiser le fonctionnement des chaudières en se dotant des bonnes caractéristiques mécaniques notamment la résistance au fluage, fissures et à la corrosion.

Dans notre étude on s'intéresse sur L'acier T91 et T22 utilisé dans la centrale de production d'électricité de Rades (centrale à flamme) sous forme de tubes assemblés par soudure dans la surchauffeur secondaire (SH2).

## II. CENTRALES DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE

### A. Principe de fonctionnement

Les brûleurs intégrés au niveau de la chaudière chauffent par l'intermédiaire de la combustion du fuel, du charbon ou gaz naturel le fluide présent (généralement de l'eau) pour favoriser son passage de l'état liquide à l'état Vapeur, ce qui engendre l'entraînement d'une turbine moyennant la création d'une dépression à sa sortie par la condensation du gaz à son entrée à l'aide d'une source froide.

La Turbine est couplée à un Alternateur qui permet la transformation de l'énergie cinétique créée par la rotation de cette dernière en énergie électrique utilisable.

L'acier T91 est fréquemment utilisé dans les centrales à flammes surtout dans les surchauffeurs secondaires où la pression et la température sont potentiellement élevées.

L'acier T22 est fréquemment utilisé dans les centrales à flammes surtout dans les surchauffeurs primaires où la pression et la température sont modérées.

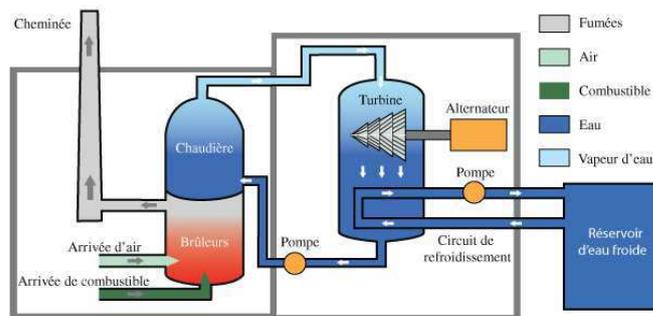


Fig. 1 Principe de fonctionnement du centrale thermique à flamme

**B. Mise en situation**

**1) Architecture générale de surchauffeur**

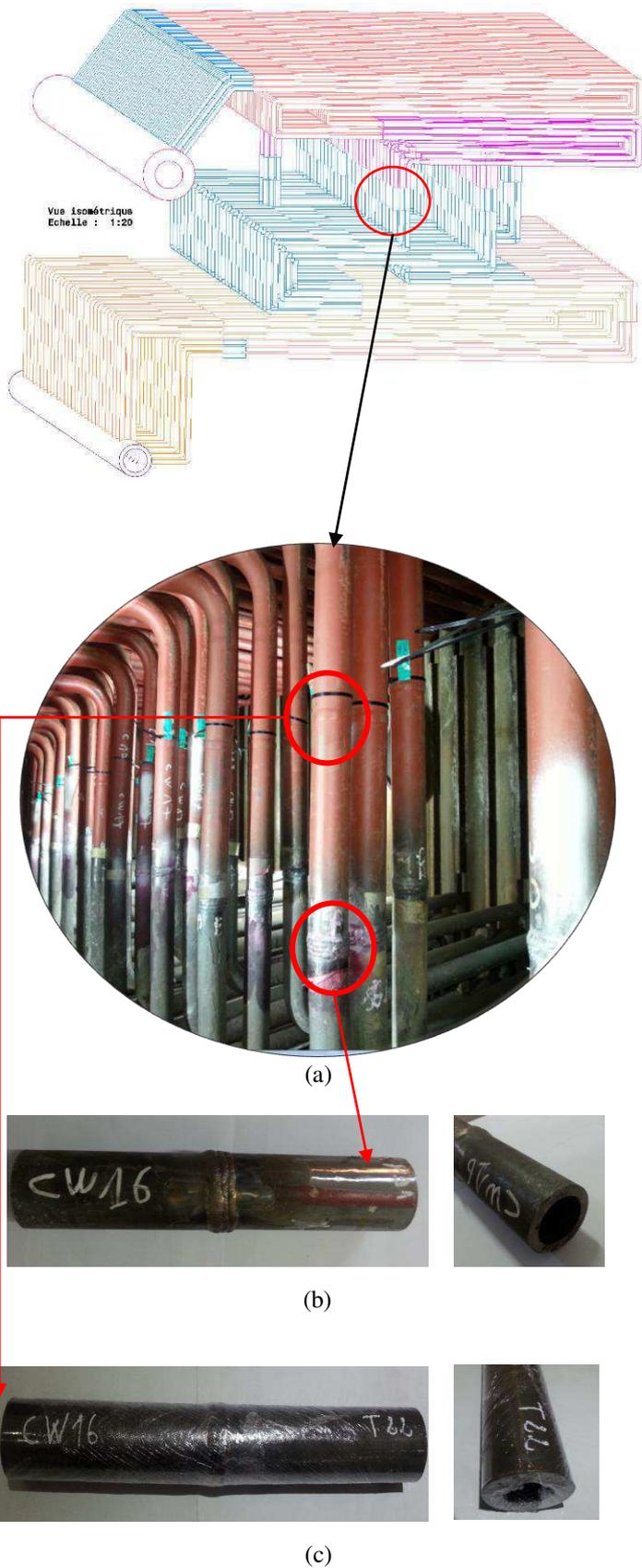


Fig. 2 (a) structure interne de la surchauffeur SH2, (b) Tube rond T91, (c) Tube rond T22

**III. CARACTERISATION DE L'ACIER ASTM A213 T91**

**A. Structure cristallographique**

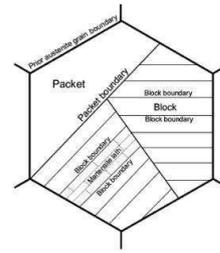


Fig. 3 Illustration simplifiée d'une structure martensitique

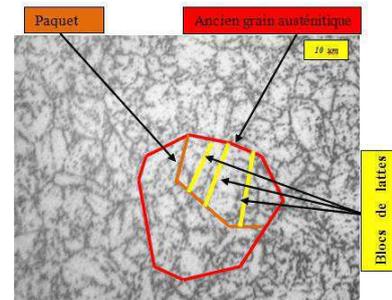


Fig. 4 Microstructure de l'acier T91 obtenue par microscope optique

La Fig. 4 illustre un ancien grain austénitique typique, il est subdivisé en paquets, et chaque paquet est scindé en blocs de lattes. La microstructure des aciers à 9% de chrome est complexe, en effet en changeant le paquet, l'orientation des blocs des lattes change.

Cette désorientation est plus nette dans les images obtenues par microscopie électronique à balayage Fig .5

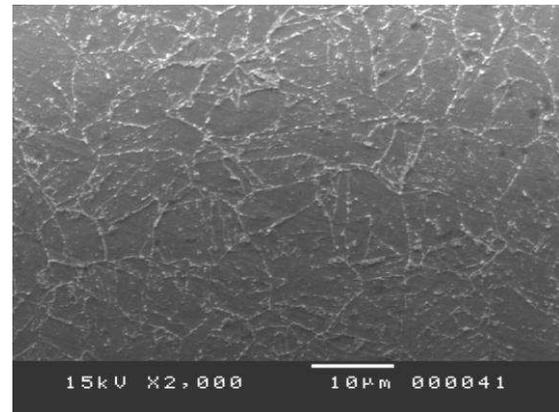


Fig. 5 Microstructure de l'acier T91 : obtenue par microscopie électronique à balayage

La bonne tenue de l'acier T91 est due à sa matrice de martensite tempérée riche en précipités fines, il existe deux topologies de précipités : les précipités M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (M=Cr/Mo) le long des anciens grains austénitiques, des joints des paquets et joints de blocs, et les précipités MX (M=Nb/V et X=C/N). Ces précipités constituent des obstacles devant les dislocations mobiles ce qui a pour effet de maintenir la stabilité de la microstructure.

**B. Spécification chimique**

L'acier de l'étude a été fourni sous forme de tube (diamètre extérieur = 45 mm, épaisseur = 9 mm). L'analyse spectrométrique a donné la composition chimique suivante :

TABLE I

Spécification chimique			
	Métal utilisé	ASTM standard [2]	Métal d'apport AWS 9015-B9
C	0.143	0.05 – 0.15	0.08 – 0.13
Fe	88.6	-	-
Si	0.26	0.2 – 0.5	0.3 max
Mn	0.4	0.3 – 0.6	1.2 max
Cr	8.72	8 – 9.5	8 – 10.5
Mo	1.208	0.85 – 1.2	0.85 – 1.2
Ni	0.26	0.4 max	0.8 max
Al	0.005	0.004 max	0.004 max
Co	0.01	-	-
Cu	0.07	0.25 max	0.25 max
Nb	0.111	0.02 – 0.1	0.02-0.1
Ti	0.005	-	-
V	0.178	0.18 – 0.25	0.15 – 0.3
W	0.02	-	-
Pb	0.023	-	-

**C. Soudure et cycle thermique proposés par [1]**

*1) Propriétés mécaniques:*

Propriétés mécanique du matériau de livraison utilisé T91

TABLE II

Propriétés Mécaniques	
<b>Limite élastique</b>	363 Mpa à 500 °C Et 276 Mpa à 600 °C
<b>Traitement</b>	1060°C/30 min
<b>Tempering</b>	760°C/30 min
<b>Hardness</b>	220 Hv
<b>Contrainte maximale</b>	585 Mpa

*2) Préparation des portions:*

Pour la soudure, seifallah et al ont utilisées, des portions du tube P91 de longueur 26 mm avec la réalisation de chanfreins en X comme l'indique la Fig 6.

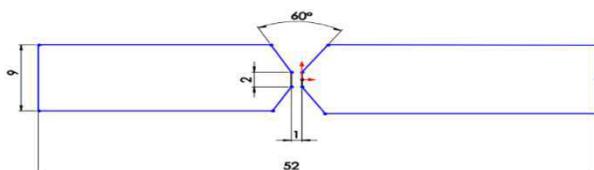


Fig. 6 Géométrie du chanfrein

*3) Paramètres de soudure utilisée par [1]:*

Les paramètres de la soudure sont également illustrés dans le tableau III

TABLE III

Paramètres de soudure	
<b>Technique</b>	Smaw
<b>Préchauffage</b>	200°C
<b>Nombre de passes</b>	monopasse
<b>Voltage</b>	~26V
<b>Ampérage</b>	160A
<b>Vitesse</b>	~~~2cm/min

*4) Traitement thermique:*

Trois temps de maintien sont appliqués par [1] lors des traitements thermiques, comme le montre la Fig. 7.

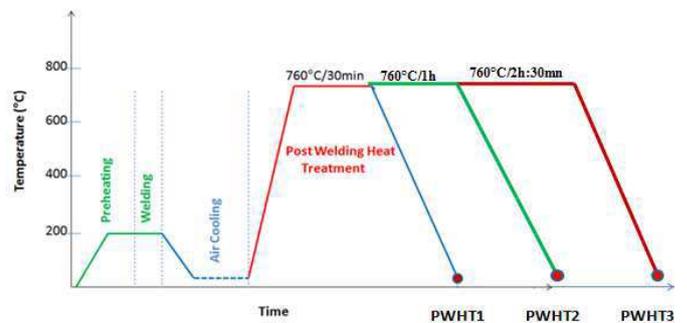


Fig. 7 Cycle de traitement thermique

**D. Résultats et interprétations données par [1]**

*1) Microstructure des zones métallurgiques :*

Après une investigation métallurgique du joint de soudure, Fetni et al.[1] ont interprétés que le gradient de température engendré par le soudage fait apparaître 03 zones métallurgiques hétérogènes La zone fondue, la zone à gros grains (CGHAZ), la zone à petits grains (FGHAZ) et une zone inter-critique (ICHAZ) Fig 8.

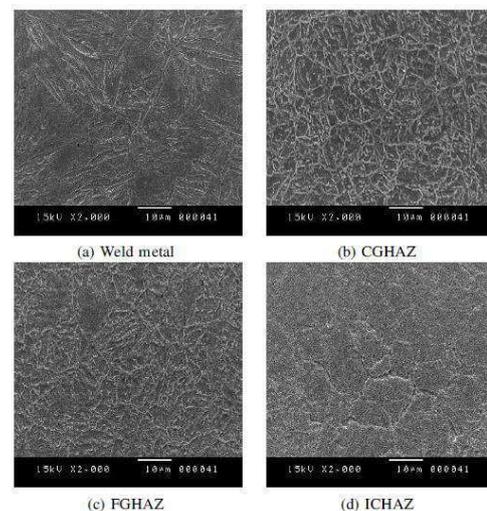


Fig. 8 Images MEB de différentes zones du joint soudé

### 2) Evolution de la micro-dureté :

Seifallah et al. ont utilisées trois temps de maintien lors des traitements thermiques Fig. 7 afin d'adoucir la microstructure et réduire les tensions induites par le soudage. Ils ont affirmés qu'une température de 760°C est trop conseillée pour les aciers à 9% du chrome avec la variation du temps de traitement pour l'obtention d'une dureté équi-répartie sur tout l'échantillon, ce qui traduit une structure homogène.

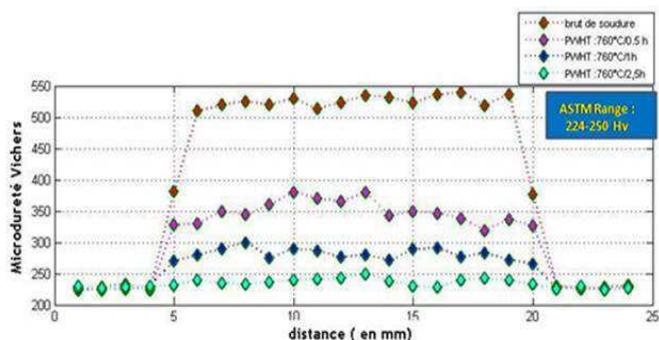


Fig. 9 Evolution de la micro-dureté en fonction du temps

### 3) Tenue au Fluage de l'acier T91 :

L'essai de Fluage réalisé par [1] on choisissant une température de 625°C, afin de réaliser des essais relativement courts en termes de temps. Deux essais sont menés avec deux charges différentes : 100 Mpa et 40Mpa.

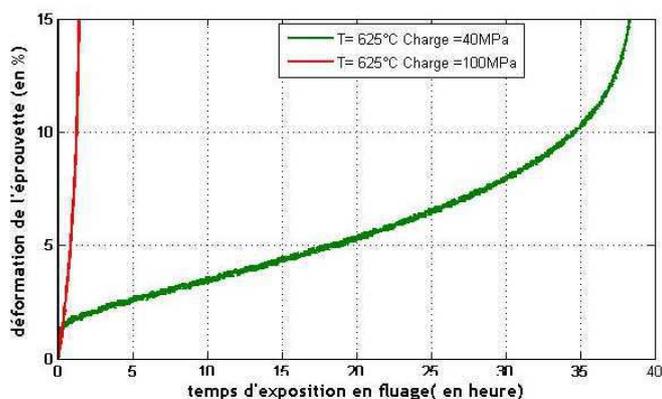


Fig. 10 Déformation en fonction du temps de fluage

Pour 100 Mpa l'échantillon passe directement du stade I au stade III, la rupture rapide. Par contre, pour une charge modérée (40 Mpa), le stade secondaire de rupture a eu lieu, au niveau de la microstructure plus précisément dans la ZAT danc on remarque que les travaux de [1] sont en accord avec les résultats donnés par [3] sur le même acier le T91.

## IV. AMELIORATION DU PROCEDE DE SOUDAGE

### A. Amélioration des paramètres de soudure

Procédé de soudage	GTAW	Manuel	Position				
	SMAW	Manuel	Position du chanfrein 6G				
Joints			Préchauffage				
			Température de préchauffage minimum 200°C				
			Température maximum entre passes 300°C				
			Traitement thermique Post-soudage				
			Gamme de températures 720°C				
			Gamme de durée 0,5 h				
Métal de Base ASTM A 213 T91							
Analyse chimique 9Cr-1Mo-V							
Métal d'apport	GTAW	SMAW	Size of Filler	2,4	2,5		
Spec.No	SFA-5,28	SFA-5,5	Nature du métal	File	Baguette		
AWS No	ER90S-B9	E9018-B9	Chanfrein (mm)	2	4,7		
Caractéristiques techniques et électriques							
Couches de soudures	Procédé	Métal d'apport		Courant			Gamme de vitesse (cm/min)
		Classification	Diamètre	Polarité	Ampérage(A)	Energie(KJ/s)	Voltage(V)
Racine	GTAW	ER90S-B9	2,4	DC-	50-80	0,5-1,6	10-20
Remplissage	GTAW	ER90S-B9	2,4	DC-	80-120	0,8-2,4	10-20
	SMAW	E 9018-B9	2,5	DC+	60-90	1,32-2,25	22-25
Couverture	SMAW	E 9018-B9	2,5	DC+	60-90	1,32-2,25	22-25

Fig.11 Paramètres de soudure

### B. Préparation des joints et soudage des aciers T91 et T22



Fig. 12 Préparation des chanfreins selon les paramètres utilisés



Fig. 13 Soudure qualifiée des joints



Fig. 14 Joint de soudure de l'acier T91



Fig. 18 Répartition des zones métallurgiques au niveau du cordon obtenu



Fig. 15 Joint de soudure de l'acier T22

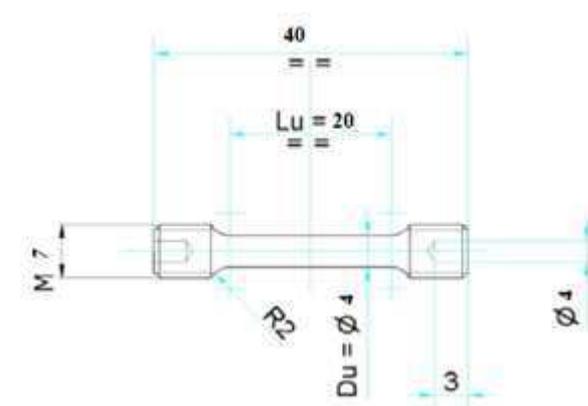


Fig. 19 Géométrie de l'éprouvette

### C. Préparation des éprouvettes

#### 1) Découpage sur fraiseuse :



Fig. 16 Utilisation d'un plateau diviseur et une fraise disque pour le découpage



Fig. 20 Chariotage et dressage des éprouvettes par outil coudé



Fig. 17 la réalisation d'une forme prismatique selon la géométrie Fig.6



Fig. 21 Filetage et finition des éprouvettes

## V. CONCLUSIONS

D'après les travaux réalisés par [1] on remarque que les joints soudés de l'acier P91 ont un temps de tenue à la rupture plus court que le métal de base, l'assemblage soudé peut favoriser l'apparition des défauts (inclusions, retassures etc.) dont l'effet est néfaste sur la résistance au fluage du joint. Sous une charge modérée, la rupture a lieu dans la ZAT, en outre on remarque que le PWHT affecte directement la durée de vie des joints soudés donc une bonne préparation avant et en cours de soudage paraît très obligatoire pour minimiser l'hétérogénéité, les inclusions, les microfissures, les fissures au raccordement, les fissures à chauds suite à cette interprétation nous avons améliorés les paramètres du procédé de soudage afin de révéler l'impact engendré sur le comportement des matériaux utilisés de point de vue métallurgique et tenue au fluage, donc il reste à comparer les résultats obtenus par [1] avec les résultats des essais qui sont en cours d'exécution dans le but de les présenter lors de la conférence.

## RECONNAISSANCE

Nous tenons à remercier les membres de l'équipe de la centrale thermique de Rades de leurs soutiens pour la préparation de ce présent travail.

## REFERENCES

- [1] S. Fetni, I. Mkaour, J. Briki, *Optimization of the high temperature properties of T91 welds by controlling PWHT parameters*, Journal of Mechanical Engineering Science class Files, Vol.11, No.4, August 2016.
- [2] ASTM A213/A213M-06a, Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes.
- [3] Charlotte Klack, Benjamin Fournier, Françoise Barcelo, Laurent Forest, France Dalle, Pierre-François Giroux, Ivan Tourni, and Anne-Françoise Gourgues-Lorenzon. High temperature creep properties and microstructural examinations of P92 welds. In T. Beck B. Kuhn J. Lecomte-Beckers, Q. Contrepois, editor, 9<sup>th</sup> Liege conference : materials for advanced power engineering, pages 424-434, Liege, Belgium, September 2010. Julich forschungszentrum.

# Vers un instrument local de protection de l'environnement pour la ville algérienne

D<sup>r</sup>. Mohamed GHERBI<sup>#1</sup>

*#Département d'Architecture, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Larbi Tebessi  
02, Route de Constantine, Tébessa, Algérie*

<sup>1</sup>archi\_teb@yahoo.fr

**Résumé** — Le présent article de recherche s'intéresse à analyser, selon l'approche globale, l'édifice instrumental relatif à la protection de l'environnement et l'aménagement du territoire dans une perspective de développement durable. Il a été édifié au cours de plus d'une décennie sur la base d'un arsenal juridique et s'organise de l'amont en aval, où chaque niveau renferme ses propres instruments d'études et d'intervention. Grâce à cette approche, des lacunes ont été identifiées, qui, par voie de conséquence, ont participé dans la réduction considérable des effets de ces instruments hiérarchiques sur le niveau local, particulièrement la ville algérienne, en matière de préservation et de protection du patrimoine, par exemple. La coupure repérée entre l'échelle locale et les échelles supérieures et la stigmatisation de l'environnement entre les plans d'urbanisme et d'aménagement devenus inefficaces sensés de le prendre en charge, constituent des principaux résultats de la recherche. Cet état de fait incite à revoir et satisfaire ces manquements et plaider pourquoi pas pour l'institution d'un instrument spécifique intervenant au niveau local (particulièrement urbain et architectural) capable de prendre, concrètement, en charge tous les problèmes de l'environnement, en vue de sa meilleure protection et préservation. Il complètera harmonieusement les autres instruments existants.

**Mots clefs** — 1-Interférences des échelles et instruments d'intervention, 2-Faiblesse des instruments d'appui de la politique de développement, 3-Instrument local de préservation et protection durables de l'environnement.

## I. INTRODUCTION

L'Algérie s'est intéressée depuis plus d'une décennie, à la protection de l'environnement et de l'aménagement du territoire dans une perspective du développement durable.

A cet effet, un arsenal juridique a été produit et a créé un ensemble d'instruments et plans spécifiques emboîté pour encadrer et développer soigneusement et harmonieusement l'ensemble du territoire, allant de la dimension nationale jusqu'à le local. Un objectif qui reste à ce jour, loin d'être atteint pour différentes considérations.

Il fallait un temps considérable pour que cet édifice se construise en pratique, devant les anciennes pratiques qui continuent d'être exercées par les acteurs concernés et la lenteur des changements nourris par la diffusion de la culture de partage, de coordination et de conciliation des efforts dans la conduite de études et programmes de développement et leurs réalisations.

Ce qui constitue un obstacle devant la réussite de toute forme de politique de développement adoptée, qu'elle soit locale ou nationale.

Les instruments d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement de différentes échelles constituent les outils de concrétisation de cette politique. Donc, l'analyse inter scalaire de cette boîte à outils selon l'approche globale, servira à mieux comprendre les décalages qui peuvent résulter entre ce qui se passe dans la réalité des villes algériennes et ce qui a été défini dans le cadre de ces instruments.

## II. APPROCHE GLOBALE : AMENAGEMENT TERRITORIAL ET ENVIRONNEMENTAL A ECHELLES VARIABLES DANS LESQUELS SE REPERENT DES PROBLEMATIQUES

La protection de l'environnement a été instaurée par un important texte juridique promulgué en 2003 [19] qui a incité à créer un plan national d'action environnementale et de développement durable (PNAEDD) pour une durée de cinq ans, qui sera géré par le haut comité de l'environnement et du développement durable.

Et ce n'est qu'en 2015, soit douze ans après, pour qu'une loi suivie de son décret exécutif explicites à cet instrument (documents, contenus, modalités d'élaboration) soient promulgués [14] et [23].

Ce plan recoure à une évaluation périodique, une fois tous les 5 ans. Il identifie dans son rapport national environnemental (RNE) issu d'une large concertation intersectorielle, les vulnérabilités d'ordre physique du territoire, les dysfonctionnements d'ordre institutionnel et juridique, les carences dans les actions environnementales menées et les coûts des dommages environnementaux, des inefficiences et de remédiation.

Il constitue une action encourageante entreprise par l'Etat, cependant, son intégration ou sa relation opérationnelle transversale avec le SNAT, n'a pas été évoquée de manière claire, ce qui constitue le premier niveau de problématique dans la hiérarchie instrumentale.

De l'autre côté, la loi relative à l'aménagement et de développement durable du territoire qui est parue en 2001, était venu pour remplacer la loi de l'aménagement du territoire de 1987 et porter l'intérêt à la protection de l'environnement au sens large du terme.

Elle avait institué des instruments d'aménagement spécifiques qui visent l'aménagement des espaces, allant de

l'échelle nationale (SN) à l'échelle régionale (SRAT) en passant par les échelles intermédiaires (SDPTTD et SDAL), sans pour autant expliquer les types, contenus et conditions de mise en œuvre des relations qui doivent s'opérer entre ces instruments pour assurer leur cohérence en application.

Le niveau métropolitain situé en l'aval de cette hiérarchie évoquée par la loi 2001 et représenté par le SDAM ne concerne que quatre grandes villes algériennes : Alger, Oran, Annaba et Constantine.

Il a posé un autre niveau de problématique concernant les relations (natures et degrés) qui doivent s'établir, en pratique, entre le PDAU intercommunal, par exemple, et le SDAM de chacun des 4 villes métropoles algériennes mentionnées ci-dessus.

Car du moment que le PDAU intercommunal se caractérise par sa souplesse, l'étendue de son périmètre d'intervention peut coïncider avec ou dépasser le périmètre de l'aire urbaine de chacune des villes concernées.

Et de là, le risque de la confusion du pouvoir d'intervention de chacun de ces deux instruments que leur incohérence dans la définition et le lancement des programmes arrêtés comme outils de la politique de développement local est grand.

Pour l'échelle wilayale, elle continue d'exister encore et son instrument : le Plan d'Aménagement de Wilaya (PAW) instauré en 1990 par la loi relative à la wilaya, est resté opposable qu'aux administrations, en l'absence de toute précision ou directive relative à son intégration à l'ensemble des nouveaux instruments d'aménagement territorial instaurés, soit par la loi [21] ou [17] ou [15].

D'ailleurs, le rapport des synthèses des études de SNAT menées (rubrique : gouvernance territoriale) publié et approuvé dans la loi [17], concernant ce sujet, avait juste mentionné que la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (DPAT) avec les acteurs locaux sont responsables du PAW.

Et de ce fait, son statut et son rôle demeurent à ce jour, ambigus en pratique, que ce soit par rapport à ces nouveaux instruments créés en amont et/ou par rapport aux autres plans PDAU et POS, situés en aval de cette hiérarchie spatio-scalaire.

En effet, le périmètre du PDAU intercommunal comme la loi [22] stipule, et selon des situations particulières, telles que les enjeux stratégiques de développement des communes, peut s'étendre et atteindre même le périmètre de la wilaya.

Et de là, une question se pose : ceci ne crée pas un problème de confusion d'intervention sur le même territoire entre le PAW et le PDAU si le PDAU est intercommunal ? Dans ce cas, la présence du PAW est-elle vraiment nécessaire ou au contraire doit-il disparaître ?

### III. CONSEQUENCES SUR LE NIVEAU LOCAL (VILLE ALGERIENNE)

Il paraît évident dans cette logique que les directives en matière de protection de l'environnement et d'aménagement émanant du niveau national par exemple, ne peuvent, en pratique, être transmises de manière explicite, aux

instruments des échelles inférieures, particulièrement, de l'échelle locale.

D'autant plus que les quelques orientations si elles existent, figurant dans les instruments d'aménagement du niveau régional et/ou métropolitain, restent générales voire même ambiguës, n'ayant pas d'effet sur la réalité du terrain.

Cette situation reflète, en pratique, une coupure entre le niveau local et les niveaux supérieurs qui, normalement, lui servent de cadre de référence, d'encadrement et d'appui pour l'élaboration cohérente et judicieuse de ses instruments.

Elle explique, entre-autre, les décalages observés entre ce qui a été prévu dans le cadre des plans d'aménagement et d'urbanisme des villes algériennes et ce qui a été opéré réellement sur terrain. Cela traduit, de l'autre côté, l'absence d'instruments spécifiques pour les niveaux inférieurs.

Ces manquements observés semblent, en partie, avoir encouragé l'accroissement exponentiel de l'urbanisation dévorant les espaces à l'intérieur que dans les périphéries des villes algériennes, souvent au détriment des terres agricoles et devant l'inefficacité des PDAU, POS et les plans de transport élaborés qui sont devenus, rapidement, dépassés suite à leur incohérente intervention.

Cette urbanisation a porté atteinte à leurs environnements immédiat et lointain qui se sont traduites par les différentes formes de pollutions et la consommation abusive des matières premières que les énergies, en l'occurrence non renouvelables.

Le littoral et pour sa très forte concentration en population et d'activités par rapport au reste du pays, a bénéficié d'un intérêt urgent.

En effet et depuis 2002, les communes riveraines à la mer ont été tenues d'élaborer leur plan d'aménagement et de gestion du littoral ou leur PAC (plan d'aménagement côtier) afin de faire face aux conséquences néfastes de l'urbanisation galopante et au phénomène de conurbation qui se produit dans les villes ou agglomérations proches riveraines.

Le PAC se réserve la mission principale de protéger les espaces côtiers et sensibles comme la loi de 2002 le préconise [20], cependant, ses relations avec le SDAL (niveau national) ou avec les PDAU et POS (niveaux intercommunal, communal et urbain) déjà existants et leur mise en œuvre, n'ont pas été précisées.

### IV. QUELQUES AMBIGUÏTES LEVEES PAR LE SNAT

L'approbation du SNAT en 2010 dans le cadre de la loi [17] a apporté des éléments de réponse à pour lever des ambiguïtés autour des questions déjà évoquées ci-haut, dans la mesure où il a pris en charge des instruments suivants : le SDAL, les SDPTTD, les Schémas d'Aménagement des Espaces de Programmation Territoriale (SEPT) et les Schémas directeurs d'Aménagement des 4 grandes villes : Alger, Oran, Constantine et Annaba autour de 3 lignes directrices en vue de développer durablement le territoire national et rééquilibrer le littoral et l'intérieur du pays dans le long terme.

Les deux premières lignes dont l'une est intitulée "vers un territoire durable" et l'autre "créer les dynamiques du rééquilibrage territorial" sont composées chacune de 5 Programmes d'Action Territoriale (PAT).

Quant à la dernière ligne directrice "créer les conditions de l'attractivité et de la compétitivité des territoires" est fondée sur 7 PAT. Le Total fait 17 PAT énumérés comme suit : PAT1 : Durabilité de la ressource en eau, PAT2 : Conservation des sols et la lutte contre la désertification, PAT3 : Ecosystèmes, PAT4 : Risques majeurs, PAT5 : Patrimoine culturel, PAT6: Freinage de la littoralisation et l'équilibrage du littoral, PAT7 : l'Option Hauts Plateaux, PAT8 : l'Option développement du Sud, PAT9 : Délocalisation des activités et la déconcentration administrative, PAT10 : Système urbain hiérarchisé et articulé, PAT11 : Modernisation et le maillage des infrastructures de travaux publics, de transport, de logistique, de technologies de l'information et de la communication, PAT12 : Mise à niveau et la modernisation des grandes villes, PAT13 : Pôles d'Attractivité et Zones Intégrées de Développement Industriel (ZIDI), PAT14 : Espaces de Programmation Territoriale (EPT), PAT15 : Développement local, PAT16 : Ouverture à l'international et PAT17 : Le Maghreb.

Ces projets de grandes envergures restent prometteurs sur le plan théorique et nécessitent le lancement d'un grand chantier dont le rôle des différents acteurs, en l'occurrence les acteurs locaux dans le cadre d'une politique de développement continue et harmonieuse, est déterminant.

#### A. *Faiblesses des instruments d'urbanisme et des études d'impact environnemental*

Les PDAU comme les POS, n'avaient pas la compétence et la responsabilité d'intégrer convenablement les problèmes liés à l'environnement et/ou les risques urbains majeurs pluriels qui menacent les villes algériennes, telles qu'Alger, Sétif et Tébessa ([2] - [13]).

Dans ce contexte, la ville de Tébessa, par exemple, est exposée aux risques urbains pluriels (présence forte du sol agressif et/ou argileux et des inondations) comme le montre les études des PDAU de Tébessa et les recherches, analyses et observations menées par mes étudiants de Master 2, option architecture et environnement (2014 - 2016) sur cette ville.

D'autre part, des équipements initiés dans le cadre de l'investissement privé qui doivent être soumis, au préalable, aux études ou notices d'impact environnemental à Tébessa à titre d'exemple, ont été, en pratique, réduites à une simple formalité d'octroi d'autorisation de la direction de l'environnement, dans le but de renforcer leur dossier du permis de construire, comme confirment les enquêtes de Mesloub et Mebarka en 2015 et 2016 [2].

Une des raisons évoquée, relate à l'absence de modèle officiel pour l'élaboration de ces études en question, compte tenu de l'insuffisance du texte de 2007 [24] dans l'explication du contenu et modalités de leur conduite.

Ceci a, probablement, poussé le Ministère chargé de l'environnement d'inciter dans son communiqué présenté en 2012 -soit près d'une décennie de l'apparition de la loi [19] ayant instauré les études d'impact-, d'élaborer des guides relatifs aux études d'impact environnemental.

Le motif de leur nécessité est resté inconnu mais tourne autour de deux éventualités évidentes : soit pour combler un manque d'expertise ou bien pour mieux préciser l'élaboration de ces études.

#### V. DIMENSION ENVIRONNEMENTALE ENFIN INTEGREE DANS LES DOCUMENTS D'URBANISME

Le rattrapage des PDAU et POS en matière de prise en charge des problèmes d'environnement a été clairement lisible à l'occasion de la promulgation des textes importants en 2004 et 2005 ([18], [26] - [27]) pour leur donner plus de force et de crédibilité. En effet, ces textes ont, et pour la première fois, exigé l'association de nouveaux acteurs représentés par les représentativités décentralisées de l'Etat au niveau local, à savoir les services responsables de l'environnement, du tourisme et de l'aménagement du territoire (longtemps absents) dans l'élaboration des PDAU et POS.

Ces derniers, et selon ces textes, sont censés de prendre en charge, non seulement, les préoccupations particulières sur la bande littoral des activités économiques autorisées qui sont édictées par le PAC prévu par la loi de 2002.

Mais également, de reprendre l'ensemble des prescriptions d'aménagement du territoire, de protection du littoral et d'atténuation des risques naturels et technologiques définies dans le cadre des plans relatifs à la prévention et à la réduction des risques majeurs édictés par la loi [18] comme les Plans Généraux de Prévention (PGP), Plans d'Exposition aux Risques (PER), Plans Particuliers d'Intervention (PPI) et Plans d'Organisation Interne de l'entreprise (POI).

Au-delà de la présente extension de leur pouvoir, d'autres missions leurs ont été dévolues, à savoir la définition et délimitation -au moyen d'études sismiques, géotechniques, micro zonations sismiques, et/ou spécifiques effectuées et sur proposition des services chargés de l'urbanisme- des périmètres de :

- zones et terrains exposés aux risques naturels, glissements ou effondrements de terrain, coulées de boue, tassements, liquéfaction, éboulements, inondations et risques majeurs découlant du plan général de prévention et des plans particuliers d'intervention, jusqu'aux échelles de cartes de 1/500° ou 1/1000° pour les POS.
- protection de zones et terrains exposés aux risques technologiques pluriels.
- zones sismiques et à risque sismique.
- protection des établissements, installations ou des infrastructures pouvant constituer une source des risques technologiques.

L'intercommunalité et la solidarité intercommunale comme dimension et échelle d'intervention peuvent servir de socle adéquat pour la meilleure prise en charge effective des problèmes environnementaux et l'aménagement ou le développement harmonieux des territoires des communes adjacentes qui s'associent dans le cadre de leur PDAU intercommunal, comme a été notifié par la loi [16] en 2011.

Cet état de fait a conduit à la révision de la plupart des PDAU et POS en Algérie pour s'aligner à ces textes, au vu des manquements ressentis qui persistent relatifs à la forte intégration de ces plans et leur corrélation avec l'ensemble d'instruments créés, appartenant aux niveaux supérieurs (national, régional et wilayal).

#### VI. OR, LA PRISE EN CHARGE DE L'ENVIRONNEMENT TELLE QUE CONÇUE ET PRATIQUÉE RESTE STIGMATISÉE

À côté des résultats obtenus quant aux manquements repérés et mentionnés ci-dessus, deux remarques importantes complétant la présente analyse, sont mises à l'évidence. La première concerne l'instabilité de l'environnement en tant que département qui a été rattaché à différents ministères depuis sa création.

Ceci est dû aux différents remaniements et restructurations opérés dans l'organigramme organisationnel du gouvernement. Depuis l'année 2000, le département de l'environnement a atterri au Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE), qui est devenu après MATET en intégrant le secteur du tourisme.

Mais depuis 2012, le MATET a été complètement dissous et par voie de conséquence, l'environnement a été rattaché à un autre département ministériel qu'est le Ministère des ressources en eau (MREE).

Quant à l'aménagement du territoire, il a été relié au Ministère de l'Intérieur et des Collectivités locales (MIC), alors que les instruments d'urbanisme et d'aménagement, en l'occurrence les PDAU, relèvent de la responsabilité du Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville (MHUV).

Donc, en résumé, trois préoccupations majeures proches chacune l'une à l'autre : environnement, aménagement du territoire et l'urbanisme, ayant une relation directe avec la ville se trouvent sous l'égide de trois ministères différents et leurs directions décentralisées présentes dans les 48 wilayas.

Et dans ce cas, l'absence de coordination entre ces directions et services dans la confection et la réalisation des programmes locaux d'environnement, d'aménagement et de développement ne risque-t-elle pas engendrer des incohérences et des décalages entre ce que prévoient les plans et instruments d'aménagement et d'environnement et la réalité vécue dans la ville algérienne ? Quels sont, dès lors, les mécanismes opérationnels à concevoir et adopter pour garantir la coordination durable de des efforts déployés par les différents acteurs locaux concernés, surtout qu'à ce jour, ces instruments et plans élaborés sont déjà dépassés avant même leur mise en œuvre ?

La deuxième remarque concerne la segmentation ou stigmatisation repérée dans la vision environnementale et d'aménagement du territoire allant du macro au micro ou de l'échelle nationale vers l'échelle locale, vu la complexité du cadre institutionnel, des limites et des conflits d'échelles qui peuvent être engendrés.

En effet, les schémas régionaux (SRAT) par exemple, ne peuvent pas jouer pleinement leur rôle en pratique, dans l'encadrement des programmes de développement des niveaux qui leur sont inférieurs, et sont restés au stade de

documents de référence. Ceci est dû, partiellement, à l'absence de l'institution des conférences régionales responsables de leur mise en œuvre et leur suivi.

Dans ce cas, comment peuvent leurs orientations et directives en matière de protection d'environnement et d'aménagement être transmises aux PDAU (intercommunal) et POS par exemple, surtout lorsqu'on sait ces derniers n'arrivent pas à imposer leurs règlements sur terrain ? N'a-t-on pas surchargé ces plans en question quand on leur a attribué de prendre en charge la protection de l'environnement avec tous ces problèmes complexes et connexes ?

N'est-il pas judicieux au lieu de cela, de plaider, aujourd'hui, pour la création d'un instrument local spécifique auxiliaire à ces plans qui s'occupe de tous les problèmes liés à la préservation et protection durables de l'environnement oscillant entre les niveaux intercommunal, communal, urbain et pourquoi pas architectural ? Car au regard du projet de nouvelle loi sur l'aménagement et l'urbanisme qui sera présenté en 2018, devant le parlement national selon le Ministre de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville, s'est accentué que sur la dimension écologique, en particulier les espaces verts dans l'habitat et la ville.

Le but est d'embellissement l'image des villes dans le cadre de la promotion d'un urbanisme adapté qui tient compte des caractéristiques de chaque région algérienne (sa nature, ses styles traditionnels et sociologiques).

Dans ce cadre, l'évaluation des programmes de logements se fera dorénavant sur la base du degré de respect de la dimension écologique et des espaces verts. Ce projet de loi, pour rappel, a été initié pour remplacer la loi de 1990 [17], jugée dépassée et inadéquate avec le contexte socio-économique actuel de l'Algérie.

#### VII. CONCLUSION

L'idée d'intégrer les préoccupations d'aménagement durable du territoire et de protection de l'environnement dans un seul instrument de niveau national, qu'est le SNAT, semble être ingénieuse. Surtout lorsque ce dernier englobe leurs instruments créés de niveau qui lui sont inférieurs comme les SDAL, SDPTTD, SRAT et SADM. En aval de cette hiérarchie instrumentale, les PDAU et POS sont sensés de projeter les directives de ces instruments vers le local (la ville algérienne) de manière cohérente et coordonnée.

Cet édifice instrumental a été construit avec le temps grâce à la production d'un arsenal juridique important comme l'a étayé la présente analyse. Elle a montré les points forts et les points faibles en essayant d'expliquer les décalages qui se sont ou risquent de se produire entre ce que prévoient ou aspirent ces instruments et plans et la réalité vécue.

Ces manquements convergent vers une coupure produite n'ayant pas permis la transmission convenable des directives du haut vers le bas, mais aussi de pouvoir faire des remontées sous forme de propositions ou suggestions à prendre, en considération, de l'aval vers l'amont. Elle a été renforcée par la stigmatisation de l'environnement entre les PDAU et POS ne pouvant agir efficacement en pratique alors qu'ils sont

sensés de prendre en charge les prescriptions de protection et préservation environnementale.

Ces prescriptions ainsi dispatchés, peuvent faire l'objet d'un instrument local spécifique aux PDAU et POS mais à échelle variable : intercommunale, communale, urbaine et pourquoi pas architecturale qui s'occupe de tous les problèmes complexes et connexes liés à la préservation et protection durables de l'environnement. Intégré aux instruments des échelles supérieures relatifs à l'environnement de manière harmonieuse, il aidera les PDAU et POS à mieux cerner la problématique de l'environnement depuis l'intercommunal à l'architectural.

#### REFERENCES

- [1] F. Messaoud, "Secteur de l'habitat: bientôt une nouvelle loi sur l'urbanisme et encore plusieurs défis", 2017. [Online]. Available: <http://www.reporters.dz/index.php/item/87626-secteur-de-l-habitat-bientot-une-nouvelle-loi-sur-l-urbanisme-et-encore-plusieurs-defis>.
- [2] S. Bouteraa et N. Hati, "L'impact du centre d'enfouissement technique sur le tissu urbain de Tébessa", rapport séminaires encadré par M. Gherbi, Master 2, option AE, université Tébessa, 41p, 2016.
- [3] T. Mesloub et A. Mebarka, "L'impact des projets sur l'environnement en Algérie", rapport séminaires encadré par M. Gherbi, Master 2, option AE, université Tébessa, 31p, 2016.
- [4] S. Bouteraa, "L'interaction entre la croissance urbaine et la gestion des déchets dans la ville de Tébessa", mémoire encadré par M. Gherbi, Master 2, option AE, université Tébessa, 56p, 2016.
- [5] M. Gherbi, "Instruments of urban planning in Algerian city: Reality and Challenges", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 9, n° 7, pp. 807-812, 2015.
- [6] M. Gherbi, "Du local au national, quels instruments d'aménagement appropriés en Algérie ?", in 3<sup>e</sup> colloque international "Les géosciences au service du développement durable", université Tébessa, 20-21/11, 2013.
- [7] M. Gherbi, "Problematic of environment protection in Algerian cities", *Energy Procedia (SciVerse ScienceDirect)*, vol 18, pp. 265-275, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212008089>.
- [8] M. Gherbi, "Eléments de réflexion pour une stratégie foncière efficace en Algérie", in 1<sup>er</sup> colloque international "Le foncier urbain : Enjeux et horizons". université Batna, 25-27/10/2010.
- [9] M. Gherbi, "L'aménagement du territoire et de l'enjeu l'environnement en Algérie", in séminaire international "Les géosciences au service du développement durable", centre universitaire Tébessa, 26-28/11/2006.
- [10] M. Gherbi, "L'aménagement du territoire en Algérie, instruments et acteurs: Critiques et pistes de réflexion", in colloque international "Aménagement territorial et développement durable: Acteurs et supports", Ecole supérieure de Technologie, Univ. "Mohammed Premier", Oujda, 11-12/05/2006.
- [11] M. Gherbi, "Gestion et protection de l'environnement en Algérie, Eléments de réflexion", in *SIEPC 2005*, université Bejaia, 05-07/06/2005.
- [12] M. Gherbi, "Alger et les instruments de son développement", in colloque international "Alger face aux nouveaux défis de l'urbanisation", université USTHB, Alger, 28-29/02/2004.
- [13] M. Gherbi, "Proposition d'une méthodologie d'élaboration du plan d'occupation des sols (POS) en site à urbaniser, cas du POS<sub>33</sub> (Gaoua) de Sétif". Mémoire de Magister, EPAU, Alger, Algérie, 227p, Sept. 2001.
- [14] Loi 15-207 fixant les modalités d'initiation et d'élaboration du PNAEDD, 27/07/2015.
- [15] Loi 12-07 relative à la wilaya, 21/02/2012.
- [16] Loi 11-10 relative à la commune, 22/06/2011.
- [17] Loi 10-02 portant approbation du SNAT, 29/06/2010.
- [18] Loi 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, 25/12/2004.
- [19] Loi 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, 19/07/2003.
- [20] Loi 02-02 relative à la protection et à la valorisation du littoral, 05/02/2002.
- [21] Loi 01-20 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire, 12/12/2001.
- [22] Loi 90-29 relative à l'urbanisme et l'aménagement, 01/12/1990.
- [23] Décret exécutif 15-207 fixant les modalités d'initiation et d'élaboration du PNAEDD, 27/07/2015.
- [24] Décret exécutif 07-145 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement, 19/05/2007.
- [25] Décret exécutif 05-317 modifiant et complétant le décret exécutif 91-177 relatif aux procédures d'élaboration et d'approbation du PDAU et ses document y afférents du 28/05/1991, 10/09/2005.
- [26] Décret exécutif 05-318 modifiant et complétant le décret exécutif 91-178 relatif aux procédures d'élaboration et d'approbation du POS et ses document y afférents du 28/05/1991, 10/09/2005.
- [27] Décret exécutif 05-318 modifiant et complétant le décret exécutif 91-178 relatif aux procédures d'élaboration et d'approbation du POS et ses document y afférents du 28/05/1991, 10/09/2005.

The International Publisher & C.O (IPCO) is an organization that promotes science & engineering research worldwide without any discrimination. It acts as a bridge between young and experienced professionals through scientific journals. IPCO depends on researchers, academicians and corporate support for bridging relationships with existing scientific & engineering organizations and customizing relationships with standard bodies. The main purpose of this organization is to promote new research and scientific applications in the field of Control, Energy, Engineering, Computer Science and allied fields. IPCO provides high quality and flexible information solutions to researchers. We currently publish international journals and we provide online solutions to help researchers to achieve better results. Active Peer Review: All our journals, which are run by a group of experienced professional editors, are subject to an efficient, fair, and constructive peer review process. Maximum Global Distribution: Our website guarantees visibility, including social bookmarking services, so that your article reaches those people who need to read and cite it. High Quality, Reliable Rapid Production: Our production teams work together to continuously improve and enhance our services, building issues online and our new, even quicker production workflows. We deliver these innovations without compromising our high quality standards.

International Publisher & C.O (IPCO), in its new aspect, represents a new contribution between North African & International researchers and institutions and cover a wide range of academic disciplines. IPCO serves the world's research and scholarly communities, and aims to be one of the largest publishers for professional and scholarly societies. IPCO's journals maintain the highest standards of peer review, with some internationally-recognized editors serving on the editorial boards of IPCO's journals.

Maghreb Arab Street  
Khzema East Sousse - Tunisia  
Email : [ipco.direction@gmail.com](mailto:ipco.direction@gmail.com)  
Phone: (+216) 31 121 155  
[www.ipco-co.com](http://www.ipco-co.com)  
**ISSN: 1737-9334**

## Biographies des éditeurs:



**Dr. Georges Descombes (France)**

Professeur des universités au Cnam

Ingénieur motoriste diplômé du Cnam, spécialiste en conversion d'énergie dans les machines thermiques, professeur des universités au Cnam en énergétique.

[descombesgeorges@gmail.com](mailto:descombesgeorges@gmail.com)



**Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)**

Ingénieur en génie Electrique diplômé de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)

Directeur du Centre International for Innovation & Development (ICID).

[ahmed.rhif@gmail.com](mailto:ahmed.rhif@gmail.com)



**Biographies des éditeurs:**



**Dr. Georges Descombes (France)**  
**Professeur des universités au Cnam**  
**Ingénieur motoriste diplômé du Cnam, spécialiste en conversion d'énergie dans les machines thermiques, professeur des universités au Cnam en énergétique.**  
**[descombesgeorges@gmail.com](mailto:descombesgeorges@gmail.com)**



**Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)**  
**Ingénieur en génie Electrique diplômé de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)**  
**Directeur du Centre International for Innovation & Development (ICID).**  
**[ahmed.rhif@gmail.com](mailto:ahmed.rhif@gmail.com)**