

Université Badji Mokhtar Annaba . Algérie



Direction des Publications

Synthèse

Revue
des Sciences
et de la Technologie

ISSN - 1114 - 4924

Numéro 23

Octobre 2011

Université Badji Mokhtar, Annaba
Direction des Publications

جامعة بادجي مختار - عنابة -
مديرية النشر

Revue des Sciences et de la Technologie
Synthèse

مجلة العلوم و التكنولوجيا

Directeur de la Revue

Pr. Abdelkrim Kadi
Recteur de l'Université Badji Mokhtar - Annaba

Directrice des Publications

Pr. Zahia Hadjoub

Directrice de la Rédaction

Pr. Nadia Aribi

Comité de Rédaction

Pr. Arifa Beddiar, Pr. Ilhem Djellit
Pr. Lakhdar Boulanouar, Pr. Nadir Farah
Dr. Mohamed Fouzi Ghorab, Pr. Rabah Laouar

Secrétariat

M^{me} Nadjat Malki
M^r Nacer Chaoui

Rédaction et Administration

Direction des Publications,
Université Badji Mokhtar,
BP 12, Annaba 23000, Algérie.
Tel/Fax : 213 (0) 38 87 11 12
E-mail : revuesynthese@univ-annaba.org

ISSN – 1114 – 4924.

Comité Scientifique de la Revue des Sciences et de la Technologie de l'Université d'Annaba

Noureddine Aouf	Professeur, Département de Chimie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Bruno Baudin	Professeur, Pharmacie, Université Paris-Sud 11, Hôpital Saint-Antoine, Paris, (France).
Djaffar Benachour	Professeur, Département de Génie des Procédés, Université Farhat Abbes, Sétif (Algérie)
Leila Benmaiza	Professeur, Département de Médecine, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Bachir Bensaker	Professeur, Département d'Electronique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Malk. Benzeggagh	Professeur, Mécanique Matériaux Structure, U.T. Compiègne (France)
Kamel Bouhidel	Professeur, Département de Génie Chimique, Université de Batna (Algérie)
Kaddour Boukhemis	Professeur, Département d'Aménagement, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Anissa Boukhemis	Professeur, Département d'Aménagement, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Chikh Bouzar	Professeur, Département de Mathématiques, Université Es-Senia, Oran (Algérie)
Kamel Chaoui	Professeur, Département de Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Allaoua Chibani	Professeur, Département de Physique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Nasr Eddine Debbache	Professeur, Département d'Electronique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Larbi Djabri	Professeur, Département de Géologie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Mohamed Réda Djebbar	Professeur, Département de Biologie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Patrick Giraudoux	Professeur, Ecologie et Environnement, Université de Besançon (France)
Redjem HadeF	Professeur, Université Larbi Ben-M'hidi, Oum El Bouaghi (Algérie)
Zahia Hadjoub	Professeur, Département de Physique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Tayssir Hamieh	Professeur, Département de Matériaux, Université Libanaise, Beyrouth (Liban)
Hichem Kara	Professeur, Département Sciences de la Mer, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Raoul Karuba	Professeur, Membre chaire UNESCO Eau, Université Sophia Antipolis, (France)
Smail Kharoubi	Professeur, Faculté de Médecine, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Nacer Kherici	Professeur, Département de Géologie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Mohamed Labaiz	Professeur, Département de Métallurgie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Ali Ladjama	Professeur, Département de Biochimie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Mohamed Tayeb Laskri	Professeur, Département d'Informatique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Amar Makhoulouf	Professeur, Dépt. de Mathématiques, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Bachir Merzoug	Professeur, Département de Mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
André Monteil	Professeur, Département de Physique, Université Angers (France)
Jean-Pierre Quignard	Professeur, Département de Biologie Marine, USTL Montpellier (France)
Bachir Redjel	Professeur, Département de Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Zaidi Sahnoune	Professeur, Département d'Informatique, Université Mentouri Constantine (Algérie)
Hocine Sissaoui	Professeur, Dépt. de Mathématiques, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Guy Smagghe	Professeur, Protection des Végétaux, Université Grund (Belgique)
Noureddine Soltani	Professeur, Département de Biologie, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)
Mohamed Taabni	Professeur, Département de Géomorphologie, Poitiers (France)
Lakhdar Tifouti	Professeur, Dépt. de Génie des Procédés, Université Badji Mokhtar, Annaba (Algérie)

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Les instructions aux auteurs complètes sont disponibles sur : <http://www.univ-annaba.org>

Adresses et Soumission du projet d'article

Les auteurs sont invités à soumettre leur article en version électronique (revuesynthese@univ-annaba.org) au format Word en regroupant texte, figures et tableaux dans un même fichier. Parallèlement, le manuscrit (texte, figures et tableaux) en 1 seul exemplaire accompagnés d'un CD contenant l'article est à adresser à : Revue Synthèse des Sciences et de la Technologie, Direction des publications, Université Badji Mokhtar de Annaba, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

Tel. /Fax: 00 213 (0) 38 87 11 12

L'article est préférentiellement rédigé en arabe, en anglais ou en français. Il ne doit avoir fait l'objet d'aucune publication antérieure ni être simultanément soumis à d'autres revues ou journaux. Quand un auteur reprend une figure, une photographie ou un tableau provenant d'une autre publication, il doit indiquer l'origine du document, après avoir obtenu le droit de reproduction auprès de l'éditeur concerné. Tous les articles sont soumis à un comité de lecture. Seuls les articles ayant reçu un avis favorable des experts seront acceptés pour publication. Outre les articles relatant des contributions originales, la Revue des Sciences et de la Technologie publie aussi des contributions synthétisant un problème technique spécifique, l'état de l'art d'un thème ou une lettre à l'éditeur.

Présentation du projet d'article

Le manuscrit, ne devant pas excéder 20 pages est saisi en double interligne avec une police Times New Roman (taille 12) et un mode justifié. Le manuscrit, écrit en recto seulement, avec des marges de 3 cm, doit comprendre, dans l'ordre : une page de titre, une page de résumés, le texte, les références, une nomenclature et, éventuellement, des annexes. Toutes les pages doivent être numérotées. Les titres de chapitres sont numérotés selon la numérotation décimale (1. INTRODUCTION 2. MATERIEL ET METHODES 2.1 Matériel biologique ; 2.1.1 Position systématique ; 3. RESULTATS etc.). Les tableaux, avec leurs titres et les figures, avec leurs légendes, doivent être intégrés dans le corps du texte. Les abréviations, développées lors de la première citation, sont suivies d'un point abrégatif. Les parenthèses et les crochets ouvrants et fermants sont collés aux mots qui les suivent ou les précèdent.

Page de titre

La page de titre contient :

Le titre de l'article doit être en minuscule (exemple : Etude de l'Activité Antibactérienne...), lequel doit être concis tout en étant explicite (Police 14 Times New Roman ou TNR, gras et centré)

Le nom et les prénoms (en entier) de chaque auteur (Police 12 TNR non gras et centré)

Les coordonnées complètes (adresse et e-mail), ainsi que le nom de l'auteur correspondant (Police 10 TNR non gras, italique et centré).

Page des résumés

La page des résumés (une seule page, Police 10 TNR non gras, justifié) doit rappeler le titre de l'article et comporter un résumé en anglais, en arabe et en français, chacun contenant environ 200 mots et suivi de cinq mots clés (écrits en minuscules TNR 10, italiques et séparés par des tirets).

Equations et nombres

Les équations doivent être soigneusement saisies dans l'éditeur d'équations Microsoft Equation 3.0. Quand il est fait référence aux équations dans le texte sous la forme : équation (1), elles doivent être numérotées en chiffres arabes entre parenthèses au bord de la marge droite. Les vecteurs et matrices doivent apparaître en caractères gras. Le logarithme décimal s'écrit log et le logarithme népérien ln. L'abréviation de exp (exponentielle) est le «e». Dans les expressions du type dx/dt le terme d (différentiel) est toujours en romain, tandis que la grandeur physique (x ou t) est toujours en italique. La virgule décimale, à utiliser dans les textes en français, est à remplacer par le point décimal dans les textes en anglais.

Figures et Tableaux

Toutes les figures, tableaux (lignes et colonnes) et iconographies (photos) doivent être cités dans le texte par leur numéro (chiffres arabe). On écrira figure 1 ou tableau 1 en toutes lettres dans le texte lorsque cela fait partie de la phrase, mais on écrira (Fig. 1) ou (Tab. 1) quand il s'agit d'un renvoi. Les figures (éléments d'une même figure doivent être regroupés) et tableaux seront numérotés en chiffres arabes croissant au fur et à mesure de leur apparition dans le texte (Police TNR 10 justifié et non gras). Les tableaux ne doivent pas faire double emploi avec les figures.

Références

Les références sont numérotées par ordre croissant au fur et à mesure de leur apparition dans le texte, en chiffres arabes entre crochets. Toutes les références de la liste doivent correspondre à des références citées dans le texte dans l'ordre chronologique. Les titres des périodiques doivent être abrégés selon les normes officielles (cf. ISI, Current Contents, Physical Abstracts, etc.). Ecrire en toutes lettres les mots pour lesquels aucune abréviation n'est répertoriée. Le style et la ponctuation des références doivent être conformes aux modèles illustrés ci-dessous en indiquant tous les auteurs:

- Article de revue/journal:

[1] Guo G., Park C.B., Lee Y.H., Kim Y.S. & Sain M., 2007. Flame retarding effects of nanoclay on wood-fiber composites, *Polymer Eng. & Sci.*, Vol. 47 (3), 330-336.

- Ouvrage ou thèse publiée :

[2] Dhadialla T.S., Retnakaran A. & Smaghe, G., 2005. Insect growth- and development- disturbing insecticides. In: *Comprehensive Molecular Insect Science* L.I. Gilbert, K. Iatrou, S.K. Gill (Eds), Elsevier- Pergamon, Oxford, UK, vol. 6, 55-116.

[3] Montambeaux G. & Akkermans E., 2009. Physique mésoscopique des électrons. Ed. EDP Sciences. 189p.

[4] Moreau J., 2009. Problèmes unilatéraux..... Thèse de Doctorat enUniversité de....., Pays. 160p.

- Actes colloque ou congrès :

[5] Kanninen M.F., Peggs I.D. & Popelar C.H., 1993. A methodology for forecasting the lifetimes of geomembranes that fail by slow crack growth, *Proceedings of Geosynthetics'93*, Vancouver, Canada, 831-844.

Nomenclature

Tous les paramètres cités dans l'article doivent être rassemblés alphabétiquement, dans une nomenclature à la fin de l'article, avec leurs désignations et leurs unités. Lettres grecques, indices et exposants sont traités séparément. Les symboles utilisés doivent être ceux de la normalisation internationale (ISO) ; ils sont toujours écrits en italique. Les unités doivent être conformes au Système International (SI) et toujours séparées de la valeur numérique par un espace (quelles que soient l'unité et la langue) ; elles sont écrites en romain. Le symbole du litre est L, celui de la minute est min, celui du mètre cube est Nm^3 , °C, K (Kelvin), etc.

Annexes

Dans le but d'assurer l'accessibilité à un plus grand nombre de lecteurs, l'annexe est destinée à expliciter des techniques de calcul ou des développements mathématiques, etc. nécessaires à la clarification d'une idée ou d'un processus.

Sommaire

L'homme et la biodiversité marine : les liaisons dangereuses. Rachid Amara	6
Etude théorique du comportement des tirants d'ancrage dans un sol pulvérulent. Ferial Mekki, Mohamed Meksouine & Mohamed Guenfoud.....	22
Elaboration, caractérisation et comportement à l'oxydation haute température des nanomatériaux $Fe_{1-x}Al_x$ obtenus par mécanosynthèse. Rabah Chater, Sifi Ghrieb & Daoud Chaanbi.....	31
Etude et réalisation de capteurs de gaz à base de silicium poreux. Nassera Ghellai, Anisse Chiali, Nasr Eddine Chabane-Sari & Noureddine Gabouze....	40
Effet <i>in vitro</i> du glucose sur le fibroblaste adventiciel aortique de <i>Psammomys obesus</i>. Billel Chaouad , Fouzia Zerrouk , Adel Ghoul , Khira Othmani-Mecif , Hamid Sahraoui, Samia Neggazi, Souhila Aouichat-Bouguerra & Yasmina Benazzoug.....	48
Transfert de chaleur dans un canal partiellement rempli d'une matière poreuse. Benmerkhi Meriem & Afrid Mohamed.....	56
Etude de l'activité antibactérienne des huiles essentielles de la Sauge officinale : <i>Salvia officinalis</i> L. sur quelques entérobactéries pathogènes. Salah Benkherara, Ouahiba Bordjiba & Ali Boutlelis Djahra.....	72
Inventaire des Plantes Mellifères du Sud Ouest Algérien. Hadda Laallam , Larbi Boughediri & Samia Bissati.....	81
Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processusApplication aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Rachid Djamaï, Djamel Fadel, Aziz Laïfa, Mohamed Benslama, Youcef Daoud & Vincent Vallès.....	90
Propriétés physicochimiques et rhéologiques d'un mélange aqueux de biopolymères et d'un tensioactif non ionique. M. Rebiha, N. Moulai Mostefa & A. Hadj Sadok.....	99

L'homme et la biodiversité marine : les liaisons dangereuses

Rachid Amara

*Université du Littoral – Laboratoire d’Océanologie et Géosciences CNRS, UMR 8187,
F-62930 Wimereux, France*

Article invité

Résumé

La biodiversité est une dimension essentielle du vivant et fournit les éléments essentiels à la vie et la prospérité de l'ensemble de l'humanité. Elle s'exprime par la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes. L'Organisation des Nations Unies a proclamé 2010, année internationale de la biodiversité pour alerter l'opinion publique sur l'état et les conséquences du déclin de la biodiversité dans le monde. En effet, partout dans le monde, les densités de populations humaines ne cessent d'augmenter sur la frange littorale (plus de 60%). Cela se traduit par une accélération continue et rapide de l'utilisation de l'espace littoral et un accroissement des pressions sur les écosystèmes et les espèces qu'ils renferment. La pollution de la mer, dont 80 % provient des activités humaines d'origine tellurique, la navigation, l'introduction d'espèces invasives, la surexploitation des ressources halieutiques, la dégradation, la fragmentation et les pertes d'habitats sont autant de facteurs responsables de l'érosion de la biodiversité marine. Exacerbée par le changement climatique, cette anthropisation menace de détruire l'équilibre fragile des écosystèmes marins et de la biodiversité qu'ils renferment. Cet article fait le point sur les connaissances actuelles sur la biodiversité marine, son importance et les pressions qu'elle subit.

INTRODUCTION

La biodiversité constitue la richesse naturelle de la terre et fournit les éléments essentiels à la vie et la prospérité de l'ensemble de l'humanité. L'Organisation des Nations Unies a proclamé 2010, année internationale de la biodiversité pour alerter l'opinion publique sur l'état et les conséquences du déclin de la biodiversité dans le monde. Les mers et les océans couvrent 70 % de la surface du globe et présentent des habitats qui sont, au point de vue biologique, riches et extrêmement variés, allant des eaux côtières peu profondes aux fosses abyssales représentant ainsi un important réservoir de biodiversité. Toutefois, la difficulté et la rareté des inventaires qualitatifs et quantitatifs font que les connaissances sur la biodiversité marine sont encore incomplètes et même inexistantes dans certaines zones et en particulier dans les

grandes profondeurs de l'océan. Cela résulte de la spécificité du milieu marin : monde secret (difficile à observer) et mystérieux où les atteintes à la biodiversité peuvent passer inaperçues. Milieu en trois dimensions (vs 2 D en terrestre) et qui se caractérise par l'absence de barrières et la facilité de dispersion des organismes. Ainsi, de nouvelles espèces sont découvertes au fur et à mesure que l'exploration des océans se poursuit. C'est le cas par exemple pour douze espèces nouvelles de requins, raies et chimères récemment découvertes entre la Nouvelle-Zélande et la Nouvelle-Calédonie en seulement un mois de prospection [1]. La biodiversité désigne la quantité et la variabilité au sein des organismes vivants d'une même espèce (diversité génétique), d'espèces différentes ou d'écosystèmes différents. Face à des pressions (naturelles ou anthropiques), la perte de diversité génétique affaiblit la capacité d'une espèce à s'adapter, la perte de la diversité des

Auteur correspondant : Rachid.Amara@univ-littoral.fr

espèces affaiblit la capacité d'une communauté biologique à s'adapter, la perte de la diversité fonctionnelle affaiblit la capacité d'un écosystème à s'adapter, et la perte de la diversité des écosystèmes affaiblit la capacité de la biosphère tout entière à s'adapter.

Aujourd'hui, environ 275 000 espèces ont été recensées dans les mers et les océans soit 15 % de la biodiversité totale de la planète. Cette biodiversité, qui est le produit de plusieurs milliers d'années d'évolution, constitue un patrimoine naturel et une ressource vitale dont l'humanité dépend. Beaucoup de ces espèces sont indispensables au bien-être des humains, soit directement comme ressources renouvelables à valeur marchande, soit indirectement pour maintenir le fonctionnement et la viabilité des écosystèmes marins. Les poissons et les invertébrés marins sont parmi les dernières sources de nourriture sauvage sur la planète, couvrant actuellement près de 15 % de l'apport en protéines animales de la population mondiale et en sont les principales (voire les seules) sources pour un milliard d'hommes [2]. La biodiversité joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes marins et contribue fortement à la valeur économique des services rendus par les écosystèmes marins. La richesse locale des espèces peut améliorer la productivité des écosystèmes et leur stabilité (capacité à supporter des perturbations récurrentes) [3]. À partir d'une métaanalyse d'un grand nombre d'études publiées, Worm *et al.* [3] concluent que les écosystèmes les plus diversifiés sont aussi les moins susceptibles de connaître l'effondrement ou la disparition d'espèces commerciales importantes car les mieux à même à résister aux variations naturelles ou aux agressions anthropiques. De ce fait, la perte de biodiversité pourrait ainsi avoir de graves conséquences sur l'approvisionnement des populations humaines en produits de la mer ainsi que sur l'économie. La biodiversité ne constitue pas en elle-même un service

rendu par un écosystème, mais se trouve à la base de l'approvisionnement de services [4]. La valeur de la biodiversité est l'importance qu'accordent les sociétés humaines à la diversité des formes de vie ainsi qu'aux services rendus par la biodiversité. Ceci inclut des considérations morales ayant conduit à une volonté de protection de la biodiversité, et des tentatives pour quantifier de façon monétaire à la fois les formes de vie et les fonctions et services qu'elles assurent pour les activités et les sociétés humaines. Selon Costanza *et al.* [5], 63 % de la valeur mondiale totale des services d'écosystème est apportée par les écosystèmes marins (20.9 billions \$. an⁻¹) dont plus de la moitié par les écosystèmes côtiers.

L'érosion de la biodiversité

La perte de biodiversité est devenue l'une des plus grandes préoccupations environnementales du siècle dernier. Les tendances observées actuellement sur la terre et dans les océans montrent les graves dangers que représente la perte de biodiversité pour la santé et le bien-être de l'humanité. Le changement climatique ne fait qu'exacerber ce problème. L'accroissement des pressions anthropiques sur le littoral mais aussi l'exploitation des océans a sérieusement dégradé la biodiversité marine. Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui à moins de 60 km le long des 1,6 million de kilomètres de côtes qui bordent les mers et les océans, et ce chiffre pourrait atteindre 75 % en 2020. En Europe, les régions littorales sont le siège d'une activité économique importante (40% du PIB européen). Elles dépendent à la fois directement et indirectement de l'économie maritime, et connaissent une croissance plus rapide que la moyenne de l'économie européenne. La longueur importante de la côte européenne (68 000 km) est un atout économique et écologique, et un facteur d'attractivité pour l'Europe [6]. Dans ce contexte, les atteintes à l'environnement marin croissent : artificialisation des côtes,

littoralisation des activités et des implantations urbaines, résidentielles et touristiques, augmentation des rejets de polluants et de macro déchets non dégradables.

Cette menace sur les habitats et la biodiversité peut avoir des conséquences importantes au niveau social, économique et biologique. Malgré ces atteintes à l'environnement, il est encore difficile aujourd'hui de quantifier précisément l'érosion de la biodiversité. Cela tient à la difficulté d'observation et de détection des extinctions en milieu marin. Selon le document de prospective scientifique sur la biodiversité réalisée par Silvain *et al.* [7], des questions clés restent en suspens : quelle est l'importance de la crise actuelle de la biodiversité ? Selon Roberts et Hawkins [8], les espèces marines présentent un risque d'extinction beaucoup plus élevé que nous l'avions supposé. Comment se traduit la crise actuelle en termes de disparitions d'espèces, de déplacements de populations et d'espèces ou encore de changements dans la composition des communautés fauniques ou floristiques ? Avec quels indicateurs peut-on mesurer l'amplitude de cette crise ? Quels sont les facteurs responsables de cette érosion de la biodiversité et quelle est la part des facteurs naturels et des activités humaines dans l'origine de ces changements ? Quelles seront les conséquences de cette érosion pour le fonctionnement des écosystèmes, pour les services écosystémiques et pour les populations humaines ?

Dulvy *et al.* [9] ont produit le travail le plus abouti qui permet aujourd'hui de dresser un panorama des espèces marines éteintes à un niveau local, régional ou bien global. L'exploitation (pêche) apparaît comme étant la principale cause des extinctions (55 %) à toutes les échelles d'analyse, suivie par la perte ou la dégradation des habitats (37 %), le reste étant attribué aux espèces invasives, au changement climatique, aux pollutions ou aux maladies.

La biodiversité marine fortement marquée par l'empreinte humaine

La biodiversité marine est fragilisée par les activités humaines (Fig. 1). Les atteintes à la biodiversité marine sont la résultante d'une démographie humaine croissante et d'une activité humaine en pleine expansion économique dont les besoins en ressources renouvelables (pêche) et non renouvelables (minérales, énergétiques) ne cessent de s'accroître. Il est toutefois difficile de différencier les modifications qui résultent des contraintes naturelles (facteurs climatiques) de celles qui sont induites par les activités humaines. Plusieurs causes ont une incidence sur la biodiversité marine, aux niveaux génétique, spécifique et écosystémique ; il est admis d'en reconnaître cinq principales :

- la pêche
- la pollution chimique et l'eutrophisation
- la dégradation physique des habitats
- l'invasion d'espèces exotiques
- le changement climatique

Il est difficile d'imputer l'extinction d'espèces, de races ou de variétés, ainsi que la dégradation d'écosystèmes ou de services écosystémiques, à une seule de ces causes, car toutes agissent simultanément, parfois même en interaction avec des effets synergiques. Ces atteintes à la biodiversité peuvent entraîner localement l'extinction d'espèces, mais la perte d'espèces à l'échelle globale est encore rare en milieu marin [9]. C'est le cas par exemple de l'Esturgeon européen, *Acipenser sturio*, le plus grand poisson migrateur de France, qui passe la majeure partie de sa vie en mer et rejoint les eaux douces pour se reproduire. Autrefois présente dans tous les grands fleuves d'Europe occidentale, cette espèce amphihaline a progressivement disparu au cours du XXème siècle de la majeure partie de son aire de répartition. La dégradation de la qualité de l'eau (Rhin, Seine...), la destruction des frayères par extraction de granulats (Garonne, Dordogne), les entraves aux migrations (Rhin, Rhône...) et une pêche intensive

incontrôlée qui a capturé aussi bien les juvéniles que les géniteurs ont conduit à la quasi-extinction de l'espèce. Elle ne compte plus désormais qu'une seule population de quelques milliers d'individus, dont les derniers sites de reproduction sont limités au bassin versant

Gironde-Garonne-Dordogne. C'est l'espèce de poisson européen la plus menacée. L'espèce est classée "En danger critique d'extinction" en France tout comme au niveau mondial.

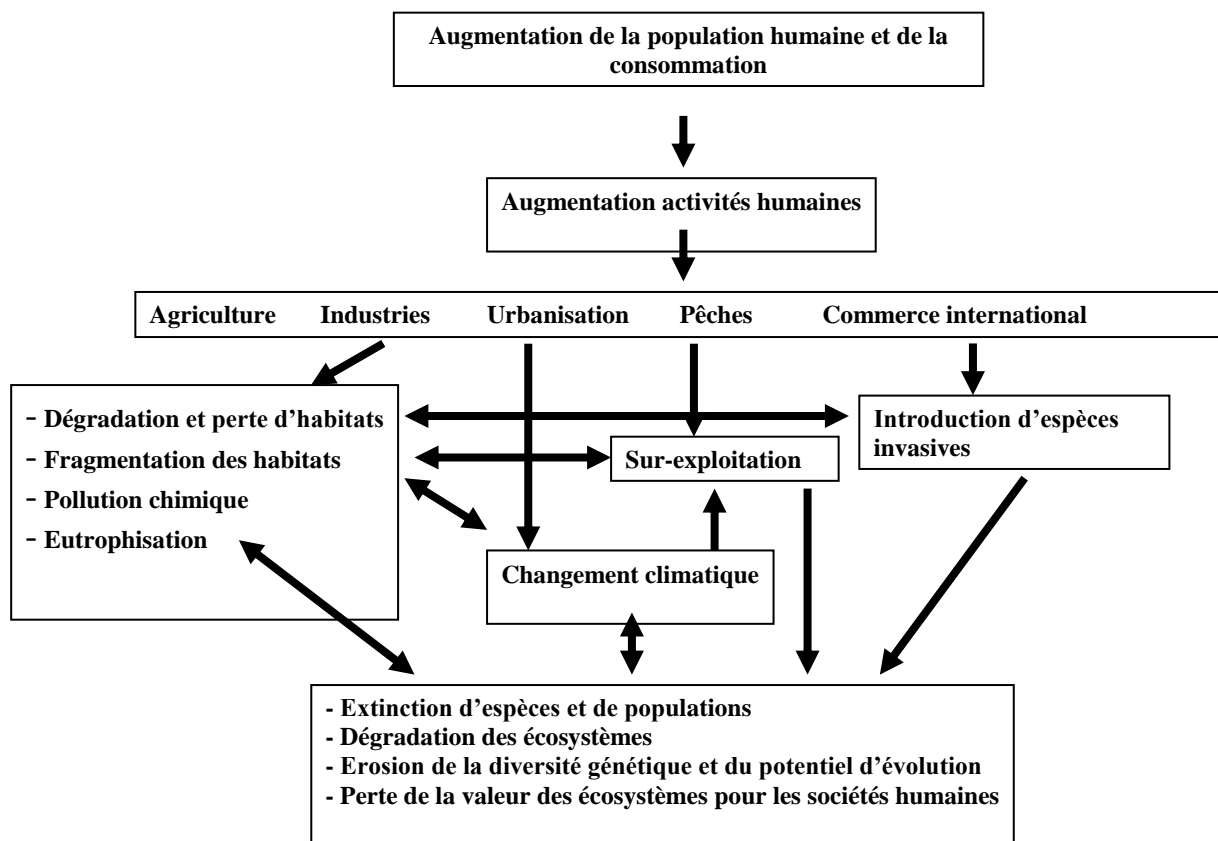


Figure 1. Principales causes ayant une incidence sur la biodiversité marine (modifié d'après Groom *et al.*, [10])

Une multitude de pressions sur le milieu marin et sur la biodiversité

Effets de la pêche.

La pêche est le principal facteur qui menace la biodiversité des poissons marins [11]. Par exemple, dans le monde plus de 40 populations locales de poissons marins ont disparu en raison de la surexploitation [9]. Les effets de la pêche sur la biodiversité ont été largement étudiés et décrits et concernent les effets sur les espèces ciblées par la pêche, les effets sur la structure génétique, les effets sur les captures accessoires, les effets sur les communautés et les réseaux trophiques et les effets sur l'habitat.

Plus des trois quarts des stocks de poissons pêchés sont aujourd'hui considérés comme pleinement exploités ou surexploités. La raréfaction de nombreuses ressources marines met en danger la diversité constitutive des écosystèmes marins et parfois leur fonctionnement. La surexploitation a entraîné des extinctions locales ou régionales de quelques espèces de poissons ou de mollusques comme c'est le cas pour la population de hareng islandais [12]. Aujourd'hui la liste rouge des animaux menacés de l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) comporte plus de 100 espèces de poissons marins qui ont connu un important déclin de leur abondance ou dont les populations locales se sont éteintes.

De récentes études ont montré que la surpêche entraînait une diminution de la taille, de l'âge des poissons, de la diversité des classes d'âges et de l'âge à la maturité sexuelle. En outre, la pêche affecte non seulement les biomasses mais aussi la composition des peuplements. Selon Pauly *et al.* [13], la surpêche est en train de réduire le niveau trophique marin. L'abondance des populations des grandes espèces prédatrices à croissance lente et à maturité sexuelle tardive tend à diminuer au profit des espèces à croissances et renouvellement rapides comme l'anchois

ou la sardine [14]. Ainsi, la raréfaction des gros poissons prédateurs modifie profondément et durablement le fonctionnement des écosystèmes marins. Dominés par des espèces de petites tailles et à courte durée de vie, les écosystèmes deviennent plus instables car tributaires des variations environnementales. En outre, la pêche d'espèces de niveau trophique de plus en plus bas a des conséquences variées sur la biodiversité des océans. On estime que la croissance rapide des essaims de méduses dans le monde au cours des dix dernières années résulte en partie de cette situation. Les méduses ont remplacé les poissons en tant que planctivores dominants dans plusieurs régions, et des inquiétudes ont été exprimées sur le fait que ces changements communautaires ne seront peut-être pas facilement réversibles, dans la mesure où les méduses mangent aussi les oeufs des poissons qui leur font concurrence [15].

La Pêche modifie aussi les flux d'énergie et les interactions entre espèces dans les réseaux trophiques marins tout simplement parce que toutes les espèces pêchées sont des composants de la chaîne alimentaire. Ainsi toute modification de la biomasse d'un stock peut affecter l'équilibre du réseau trophique, l'abondance des autres espèces présentes dans le milieu et modifier le fonctionnement de l'écosystème. Par exemple, la surexploitation et la diminution de la biomasse de morue ont affecté directement et positivement sa principale proie, le sprat (*Sprattus sprattus*), espèce zooplanctivore, et indirectement et négativement les biomasses de zooplancton et de phytoplancton [16]. Cette régulation des niveaux trophiques par les prédateurs (top-down control pour les Anglo-Saxons) bien que longtemps sous-estimée par les spécialistes est aujourd'hui de plus en plus souvent mise en évidence (ex. [17] ; [18]). Dans certains cas la modification de l'écosystème est telle que des mesures de réduction, voire de cessation totale de l'exploitation de certains stocks comme c'est le cas pour la morue du Golfe du

Saint-Laurent ne se traduisent pas par une restauration des populations [19].

La Manche et la mer du Nord offrent des conditions propices à une productivité élevée des stocks halieutiques. La pêche est la principale utilisation des ressources de cette région. La plupart des stocks sont en déclin en raison de la surpêche. 30-40% de la biomasse des espèces exploitées est capturée chaque année ! Les contraintes dues à d'autres facteurs comme le changement climatique, la perte d'habitat, les espèces envahissantes, l'eutrophisation et la pollution peuvent accentuer la baisse de la pêche et inhiber le recouvrement des stocks [11]. Par exemple, le déclin de la morue en mer du Nord est dû aux fortes pressions de pêche combinées avec une modification des conditions océanographiques qui ont affecté les zooplanctons qui constituent les proies de cette espèce [20].

Le gaspillage de la pêche

Malgré les 25 000 espèces de poissons connues, l'homme n'en consomme qu'un nombre très limité. Ce phénomène accentue le problème des prises accessoires. En effet, dans de nombreux lieux de pêche, les poissons capturés ne sont pas ceux qui sont ciblés (espèces sans intérêt commercial, ou non commercialisables pour des raisons de taille (immatures, juvéniles) ou d'interdiction de pêche) et, dans de nombreux cas, ils sont simplement rejetés à la mer, morts ou en train de mourir. Les estimations concernant la gravité du problème des prises accessoires varient. Les dernières études suggèrent qu'environ 8 % de la prise totale au niveau mondial est remis à la mer mais des estimations antérieures indiquaient qu'environ un quart de celle-ci pouvait être repassée par-dessus bord [14]. Dans certaines pêcheries de chalutage de crevette, le rejet peut représenter 90 % de la prise. Selon une étude anglaise, pour 3 poissons pêchés par les chalutiers en mer du Nord, deux sont rejetés sans vie en mer [21].

D'après Cury et Misery [14], en mer du Nord 576 000 tonnes de poissons seraient ainsi annuellement rejetées par les pêcheurs (3 % de la biomasse totale de l'ichtyofaune et 22% des quantités de poissons débarquées). À tous ces poissons rejetés, il faut encore ajouter 150 000 tonnes d'invertébrés benthiques. Un seul passage de chalut récolte jusqu'à 20 % de la faune et de la flore du plancher océanique. Les filets danois captureraient entre 5000 et 7000 marsouins par an en mer du Nord, ce qui représente 5 % de la population totale de ce mammifère marin. De nombreux autres organismes marins comme les requins, tortues et oiseaux marins sont victimes de cette pêche non sélective. Dans le monde, 300 000 cétacés, 100 000 albatros et environ 40 000 tortues marines en danger ou menacées d'extinction meurent chaque année du fait des activités de pêche, ce qui fait que de nombreuses espèces sont désormais en voie de disparition.

La perte et la dégradation physique des habitats

Les zones côtières à travers le monde ont subi d'importantes altérations physiques au cours des dernières décennies. Les surfaces d'habitats perdus en mer sont comparables avec celles des écosystèmes terrestres. Avec les mangroves, les récifs coralliens font aujourd'hui partie des habitats marins les plus menacés. On estime que 40 % des récifs coralliens sont significativement endommagés, que 30% à 60% des mangroves ont été perdus en Asie du Sud, et que plus de la moitié des marais salants de la planète ont disparus [9]. La perte d'habitat peut concerner un habitat essentiel à une espèce nécessaire pour boucler son cycle de vie. Les mangroves, les zones humides, les estuaires et de nombreux autres habitats côtiers peu profonds jouent un rôle important dans le déroulement du cycle de vie de nombreuses espèces marines. Ce sont des zones de nourriceries, des frayères et des voies de migration [22]. Sur les côtes de la Manche, la zone intertidale et les estuaires

sont fréquentés par les juvéniles de 19 et 29 espèces de poissons respectivement, dont un grand nombre est représenté par des espèces commercialement exploitées en mer ([23];[24]). Ces zones sont indispensables pour le maintien de la biodiversité et le renouvellement des populations marines. Par exemple, la dégradation d'habitat dans l'estuaire de la Seine a entraîné une perte de 25 % de la population totale de juvénile de sole, *Solea solea* en Manche Est entre 1850 et aujourd'hui [25]. La pêche, notamment les chaluts de fond et les dragues à mollusques, est l'une des causes principales de destruction de l'habitat benthique. Annuellement les surfaces couvertes par le chalutage sont estimées à la moitié de la surface du plateau continental mondial [26]. Cette surface représente 150 fois la surface de déforestation annuelle en milieu terrestre. L'activité de pêche peut parfois avoir une intensité préoccupante. Certaines zones de pêche productives en mer du Nord sont chalutées en moyenne 8 fois par an et entre 25 à 141 fois dans certains estuaires [27]. Ces destructions d'habitats affectent de nombreuses espèces sédentaires, la composition, la structure et la productivité des peuplements benthiques [28]. Bien qu'à l'échelle locale les impacts des activités de pêche sont clairement négatives pour les habitats et les populations benthiques, il est difficile de savoir les impacts à plus grande échelle et les conséquences sur les extinctions d'espèces.

Pollution marine

Les activités humaines sont responsables de l'introduction dans le milieu marin d'un grand nombre de substances. Selon le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement), 80 % des pollutions marines sont d'origine terrestre et anthropique. Aux sources industrielles s'ajoutent les effluents domestiques et urbains ainsi que les apports diffus dus aux usages agricoles. L'impact de la pollution des eaux marines est mal mesuré, mais il

serait responsable d'importants effets létaux et sublétaux sur les organismes marins. La pollution a des répercussions à tous les niveaux trophiques, des producteurs primaires aux consommateurs supérieurs et, par conséquent, affecte le fonctionnement des écosystèmes. Notre compréhension générale de la façon dont la pollution et les différents contaminants influencent la biodiversité marine est limitée. Du point de vue de gestion, les principales questions sont de savoir quels habitats marins sont plus vulnérables aux contaminants et quelles classes de contaminants sont plus susceptibles de causer des impacts négatifs sur la biodiversité.

La forme de pollution la plus commune et la plus visible est la pollution pétrolière causée par les accidents de navires pétroliers et le nettoyage des soutes en mer. Le pétrole déversé en mer constitue une pollution importante et préoccupante à l'échelle globale. On estime à six millions de tonnes par an la quantité d'hydrocarbures introduite dans les océans par l'activité humaine ce qui constitue par conséquent une cause fondamentale de la pollution des océans. Lors de la pollution de l'Amoco Cadiz sur les côtes nord de Bretagne, plusieurs dizaines d'espèces ont été affectées, cependant alors que les crustacés et les mollusques ont montré une forte mortalité, les polychètes se sont avérées beaucoup plus résistantes même dans des sédiments fortement pollués [29]. Les atteintes chroniques à l'environnement, moins spectaculaires, sont tout aussi nocives pour le milieu marin. Il existe aujourd'hui plus de 100000 molécules chimiques et il est difficile de savoir quelles en sont les conséquences sur les organismes vivants. Certains de ces contaminants entraînent chez les organismes marins des perturbations endocriniennes, des modifications du comportement, des perturbations du métabolisme énergétique et des réponses génétiques. L'augmentation des matières en suspension colmate les organes de filtration ou de récolte de la nourriture. La

Manche et le sud de la mer du Nord comprennent une grande diversité d'habitats côtiers (baies, estuaires, larges zones intertidales) présentant différents niveaux de contamination chimique en relation avec le degré d'anthropisation. Un état des lieux récemment réalisé a montré des différences d'imprégnation par les métaux chez les poissons le long de ce littoral [30], combinées à l'apparition de pathologies [31] et à des performances biologiques moindres (moindre croissance et indices de condition, faible accumulation de réserves énergétiques chez les juvéniles) pour les sites les plus anthropisés, i.e. l'estuaire de la Seine et les secteurs des ports de Calais et Dunkerque ([32];[33]).

Au-delà des substances surveillées classiquement (métaux, organochlorés, pesticides, hydrocarbures), une préoccupation majeure se fait sur les éventuels effets de nombreuses autres substances chimiques que l'on retrouve pour les usages domestiques ou comme produits cosmétiques ou pharmaceutiques (antibiotiques, hormones, stéroïdes). Ces substances sont qualifiées de contaminants émergents. En 2002, la consommation d'antibiotiques était de 8 500 T par l'homme et de 4 700 T par les animaux dans l'UE (800 T par l'homme, 1 300 T par les animaux en France). Ces substances se retrouvent en grande partie dans le milieu marin car les stations d'épuration, bien qu'elles se soient énormément améliorées sur le plan technique, n'ont pas été conçues pour éliminer ces molécules.

La question des perturbations endocriniennes en milieu aquatique a émergé à partir des effets d'un composé, le tributylétain (TBT), un agent biocide antifouling utilisé sur les bateaux [34]. Chez une espèce marine commune sur nos côtes, la pourpe *Nucella lapillus*, on a observé de nombreux cas d'imposex, c'est-à-dire l'apparition d'un pénis chez les femelles. Obstruant les voies génitales, le spermiducte correspondant à ce pénis empêchait la libération des ovocytes,

rendant l'individu impropre à la reproduction. Cette stérilisation des femelles peut conduire à la disparition de la population. En France, depuis septembre 2003 le TBT est strictement interdit à la seule exception de son usage par la marine nationale. Des perturbations endocriniennes ont également été mises en évidence chez des poissons telles que la maturité précoce des femelles, l'intersexualité et l'induction de la vitellogénine. Dans l'estuaire de la Seine, diverses espèces de poissons présentent des signes de féminisation et montrent un déséquilibre net du sex-ratio en défaveur des mâles. Les perturbations résultant de la féminisation semblent pouvoir conduire à la réduction ou la disparition de population de poissons [35]. Aujourd'hui, environ 550 molécules sont suspectées d'agir comme perturbateurs endocriniens [36].

La pollution par les macrodéchets est un problème de pollution généralisé qui affecte tous les océans du monde. Sa menace pour le milieu marin a été ignorée pendant longtemps et, ce n'est que récemment que sa gravité a été reconnue [37]. Les macrodéchets sont la cause de lésions et de décès de nombreuses espèces marines (tortues, albatros, phoques, baleines ou poissons), soit parce que ceux-ci y restent emprisonnés soit parce qu'ils les prennent pour des proies et les avalent. Ils constituent des pièges physiques et des leurres pour la biodiversité marine. Dans le monde, 10 % des 260 millions de tonnes de matières plastiques produites annuellement se retrouvent en mer. Selon les estimations de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), en mer du Nord, il y aurait 150 millions de débris entre la surface et 200 m de profondeur.

L'eutrophisation des océans

L'eutrophisation est un phénomène courant dans les eaux marines côtières. Il s'agit d'une fertilisation excessive des eaux due à un apport massif de composés azotés et phosphorés provenant de l'activité agricole et des rejets domestiques et

industriels. Ces composés favorisent le développement des micro-algues (phytoplanctons) et des macroalgues qui constituent le premier maillon de la quasi-totalité des chaînes alimentaires maritimes. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation du nombre de marées vertes, rouges ou brunes et des poussées planctoniques sur les côtes européennes. L'exemple le plus préoccupant en matière d'atteinte au patrimoine naturel côtier, est fourni par les « marées vertes » à ulves affectant depuis les années 70 de nombreux sites de la cote de Bretagne. L'eutrophisation peut avoir pour conséquence un éventail de perturbations indésirables pour l'écosystème marin, y compris une variation de la composition de la flore et de la faune qui affecte les habitats et la biodiversité, et l'épuisement de la quantité d'oxygène entraînant la mort des poissons et d'autres espèces. En baie de Somme, des mortalités massives de toute la faune benthique et notamment de *Cerastoderma edule* (la coque, espèce exploitée) ont été observées suite à une eutrophisation du milieu [38].

Depuis plusieurs décennies, une évolution sensible des populations phytoplanctoniques a été observée en Manche et en mer du Nord et certaines ont eu des répercussions économiques et écologiques néfastes. C'est le cas de *Phaeocystis pouchetii* qui est à l'origine de blooms planctoniques très importants qui se manifestent en mer par l'apparition d'un épais mucilage dans l'eau et sur la côte par l'apparition d'une épaisse couche d'écume ou mousse (de couleur blanc-gris à brunâtre ou blanc jaunâtre). Les pêcheurs de la manche occidentale française nomment ces blooms « *vert de mai* », « *crasse* » (synonyme d'écume), ou parlent du « *gluant* », ou du « *limon* ». Sur la zone intertidale, les dépôts de mousse et leur dégradation entraînent des mortalités de la macrofaune benthique [39].

Changement climatique

Le réchauffement des eaux

Tous les scientifiques reconnaissent la réalité du changement climatique que nous vivons actuellement. La température des eaux de surface a augmenté d'environ 1,5°C depuis les années 60. En mer du Nord la température a augmenté de 1,1°C au cours des 30 dernières années. Des recherches récentes ont permis de constater un réchauffement marin jusqu'à 3 000 mètres de profondeur. Les conséquences sur le milieu marin se font déjà sentir : le niveau de la mer s'élève, les courants marins se modifient, les océans deviennent plus acides, les aires de répartition des espèces se déplacent...

Les espèces marines sont moins contraintes que sont les espèces terrestres par des barrières physiques de transport et de migration ; leur aire de répartition est principalement fixée par les facteurs environnementaux (température, oxygène, lumière, salinité, etc.). Il existe de nombreux exemples de plancton [40] et d'espèces de poissons [41] étendant rapidement leur aire de répartition lorsque leur environnement change. L'impact du changement climatique sur les océans et la biodiversité est multiple [42]. La manifestation la plus visible dès aujourd'hui du changement climatique est le déplacement d'espèces. Des poissons, des mollusques, des crustacés remontent vers le Nord à la recherche d'eaux plus froides [43]. Un nombre croissant d'espèces venues des zones subtropicales ou des eaux chaudes voit leur abondance augmenter dans nos eaux.

Beaucoup d'organismes marins sont poïkilothermes et la température affecte leur physiologie et métabolisme. Chaque espèce a des tolérances spécifiques en termes de températures. Parce que de nombreux organismes marins vivent déjà près de leur limite de tolérance thermique,

les augmentations de température peuvent influencer négativement sur leur performance et leur survie. C'est le cas des coraux bâtisseurs de récifs vivants très proches de leur limite supérieure de tolérance thermique, et chez qui des épisodes chauds ont entraîné le blanchissement des coraux et une importante mortalité. Le suivi à long terme de l'abondance du phytoplancton, zooplancton et poissons montrent que le changement climatique a bouleversé l'ensemble des communautés vivantes.

Le réchauffement climatique affecte les espèces exploitées. Les pêcheurs le constatent de plus en plus, le contenu de leurs filets évolue sous l'impact du réchauffement. Ces changements ne sont pas en eux-mêmes négatifs, puisqu'ils débouchent parfois sur de nouvelles possibilités d'activités de pêche. Le cas le plus emblématique de ce phénomène est le rouget de roche, *Mullus surmuletus*, désormais très présent en Manche et même en mer du Nord : de 10 tonnes en 1985, ses captures sont passées à 700 tonnes en 2005. À l'inverse, le changement climatique paraît avoir un effet amplificateur des conséquences de la surpêche. Le réchauffement semble jouer un rôle dans la diminution des stocks de morue en mer du Nord. Cette diminution est causée par les déplacements de populations de planctons. Le copépode *Calanus finmarchicus*, l'espèce dominante dont se nourrissent les larves de morue, s'est déplacé de la mer du Nord vers l'océan Arctique, à la recherche d'eaux plus froides. Sa biomasse en mer du Nord a baissé de 70 % depuis les années 1960. Les espèces de planctons venues du Sud, qui la remplacent, sont moins abondantes et ne semblent pas convenir au stade larvaire de la morue. La diminution de la proie favorite de leurs larves expliquerait donc partiellement les problèmes du cabillaud en mer du Nord [44]. D'une manière générale, les effets indirects du changement climatique sur l'équilibre fragile des écosystèmes marins, et sur les espèces actuelles qui y vivent, ne sont pas encore bien connus.

L'acidification des eaux de surface

Du fait de l'accroissement du CO₂ de l'atmosphère et de la faculté qu'ont les océans à d'absorber le CO₂, la quantité absorbée a augmenté également, ce qui entraîne l'acidification de l'eau. Le pH océanique est passé de 8,2 à 8,1 depuis le milieu du XIX^e siècle. Ce sont les organismes marins à squelette calcaire qui en subiront les conséquences. Ainsi, une partie du zooplancton à coquille, comme les ptéropodes, pourrait disparaître dans certaines zones de l'océan, car l'eau sera devenue trop acide. Les coraux sont particulièrement touchés, car ils emploient la calcification pour construire leur structure squelettique, qui constitue les récifs coralliens. Ces récifs coralliens sont les écosystèmes qui offrent la biodiversité la plus riche au monde et forment l'habitat de quelque deux millions d'espèces marines et la source d'un quart des prises mondiales de poissons dans tous les pays en voie de développement. Les conséquences de l'acidification dépassent largement ses effets directs sur la calcification des organismes marins.

Espèces introduites

Les habitats marins sont peuplés de différentes espèces d'animaux, de plantes et de microorganismes qui ont évolué séparément, isolés par des frontières naturelles. Mais les hommes ont franchi ces barrières, que ce soit en bateau, en avion ou avec d'autres moyens de transport. Par conséquent, les espèces se déplacent aujourd'hui vers de nouvelles zones situées bien au-delà de leur aire de répartition naturelle. Les espèces qui, suite à des activités humaines, qu'elles soient intentionnelles ou pas, ont été déplacées vers des régions où elles ne vivent pas naturellement, sont dites « espèces introduites » ou « espèces exotiques ».

Les introductions d'espèces animales et végétales dans le milieu marin sont en constante augmentation. Même si cela peut paraître *à priori* paradoxal, elles sont

considérées comme la deuxième cause d'appauvrissement de la biodiversité marine, juste après la destruction et la fragmentation des habitats. Contrairement à une pollution accidentelle (ex. marée noire) dont les effets diminuent non seulement avec le temps mais aussi avec la distance du point d'impact, les espèces introduites se propagent de proche en proche, jusqu'à occuper la totalité des habitats et la totalité de l'aire géographique qui leur sont accessibles.

En milieu marin, les causes d'introduction d'espèces sont principalement les eaux de ballast, le fouling, l'évasion d'espèces aquacoles et les introductions accidentelles d'espèces accompagnatrices d'espèces aquacoles mais aussi les aquariums (cas de l'algue *Caulerpa taxifolia* est bien connu en Méditerranée). Avec l'accroissement du trafic maritime, les eaux de ballast sont de loin la principale cause d'introduction des espèces dans le milieu marin. On estime que 7 000 espèces sont transportées dans le monde entier chaque jour dans l'eau de ballast et que 10 milliards de tonnes d'eau de ballast sont transportées chaque année de par le monde. Une étude réalisée sur les eaux de ballast de 186 bateaux en mer du Nord a permis d'identifier 257 espèces (allant des foraminifères aux poissons) et dont 57 % des espèces n'étaient pas native de la mer du Nord [45]. Dans bien des cas, ces espèces non indigènes s'adaptent mal à leur nouvel environnement et disparaissent rapidement. Il peut cependant arriver qu'elles survivent, se reproduisent et s'implantent. L'étude de Gollasch [45] indique que parmi les 257 espèces contenues dans les eaux de ballast seules 19 ont la faculté de pouvoir s'implanter en mer du Nord.

Les impacts des espèces introduites sur la biodiversité peuvent être nombreux.

- Prédation sur les espèces natives
- Diminution de la disponibilité de l'habitat pour les espèces natives
- Compétition supplémentaire
- Parasites et maladies
- Etouffement et envahissement

– Hybridations causant une dilution génétique

L'impact d'une espèce introduite peut ne pas seulement réduire la diversité des espèces, mais aussi la diversité des écosystèmes (écodiversité). En Méditerranée nord-occidentale, les remplacent plus d'une dizaine peuplements à *Caulerpa taxifolia* d'écosystèmes, entre le voisinage de la surface de la mer et 20-30 m de profondeur [46]. On aboutit ainsi à une uniformisation du paysage sous-marin.

Une des pires invasions marines a eu lieu au début des années 1980 lorsque le cténophore nord-américain *Mnemiopsis* (*Mnemiopsis leidyi*) fut introduit en mer Noire et en mer d'Azov. L'espèce est arrivée dans les eaux de ballast et s'est rapidement établie dans les eaux riches de la mer Noire où elle n'avait aucun prédateur au point que, en 1989, on estimait qu'il s'y trouvait un million de tonnes d'individus de cette espèce exotique. Les Cténaires ont mangé de grandes quantités d'oeufs de poissons et de larves ainsi que du zooplancton dont les poissons commercialement importants se nourrissent, ce qui a entraîné l'effondrement des stocks de poisson en mer Noire. En 1994, la pêche à l'anchois avait pratiquement disparu. La méduse exotique a complètement modifié le réseau alimentaire de la mer Noire. C'est un exemple qui nous fait comprendre l'ampleur de l'impact qu'une petite espèce apparemment inoffensive peut exercer sur le milieu. En Manche et en mer du Nord, il y aurait un peu plus de 80 espèces introduites [47]. Ce nombre est cependant certainement inférieur à la réalité du fait du manque d'inventaires et d'observations dans le milieu marin. Certaines espèces connaissent un développement important au point qu'elles forment une partie dominante de notre faune et flore marines. C'est notamment le cas du couteau de l'atlantique (*Ensis directus*), qui a été observé pour la première fois dans la région en 1978. Ces coquillages se comptent aujourd'hui par millions sur nos

plages. En Manche et en mer du Nord, on ne connaît cependant pas encore d'exemples d'espèces ayant disparu en conséquence de l'introduction d'une espèce exotique.

Le problème des espèces introduites devrait s'aggraver au cours du prochain siècle à cause du changement climatique et de l'intensification du commerce et du tourisme. La nécessité d'une action coordonnée pour faire face au problème des espèces introduites a été exprimée aux échelons politiques les plus élevés. Le Conseil «Environnement», le Parlement européen, le Comité des régions et le Comité économique et social européen ont tous souligné la nécessité d'adopter une stratégie communautaire relative aux espèces introduites et de mettre en place un véritable système d'alerte rapide et des mécanismes d'intervention efficaces au niveau de l'UE [48]. Les instruments internationaux comprennent la convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux et des sédiments de ballast, développée par l'Organisation maritime internationale (OMI). Celle-ci présente des procédures pour minimiser les introductions d'espèces exotiques lors du déversement des eaux de ballast tout en protégeant la sécurité des bateaux et elle va fournir un régime uniforme et standardisé pour la gestion des eaux de ballast.

CONCLUSION

La population humaine devrait augmenter à environ 7,5 milliards en 2020, avec pour conséquence un accroissement des pressions sur le littoral et sur les écosystèmes marins. Quel sera l'impact sur la biodiversité ? La biodiversité pourra-t-elle s'adapter à cette nouvelle configuration ? Conservation de la biodiversité et développement économique peuvent-ils coexister ? Face à des perturbations anthropiques croissantes exacerbées par le changement climatique force est de constater les nombreuses lacunes de notre compréhension des capacités de réponses et d'adaptation de la

biodiversité. Jackson *et al.* [49] notent qu'aujourd'hui seules quelques espèces de la mégafaune marine sont complètement éteintes. Seulement 12 extinctions globales d'espèces marines ont été documentées : 3 mammifères, 5 oiseaux et 4 invertébrés [50]. Même si nos connaissances sur les extinctions d'espèces marines demeurent lacunaires, il existe un consensus global quant à la nécessité de préserver la biodiversité marine. La perte de biodiversité fait peser un grave danger pour l'équilibre écologique du milieu marin et le bien-être de l'humanité. Il est indispensable aujourd'hui de prendre en compte la biodiversité dans la conduite des activités humaines, qu'elles soient économiques ou autres. La conservation de la biodiversité ne s'oppose pas au développement économique à long terme. Accord-cadre signé le 5 juin 1992 par 186 Etats, la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) constitue la première manifestation en droit international de la volonté des Etats de considérer la biodiversité de manière globale. En Europe, cet intérêt se traduit par exemple par la mise en place du réseau d'excellence MarBEF (Marine Biodiversity and Ecosystem Functioning EU Network of Excellence, www.marbef.org) et l'organisation récemment de la première conférence sur la biodiversité marine (Espagne, 2008). En France, la préservation de la biodiversité est l'un des thèmes phares du Grenelle Environnement. De nombreux engagements ont été pris afin d'informer l'opinion et d'agir pour stopper l'érosion de la biodiversité. Le livre bleu insiste sur la protection des écosystèmes et de la biodiversité comme étant une priorité de la politique nationale. Le Grenelle de la mer est censé aboutir à la mise en place d'une vraie politique de préservation des espèces marines.

REFERENCES

- [1] Séret B., 2008. Interview de Bernard Séret (chercheur de l'Institut de recherche pour le développement) par Paul Molga, *Journal Les Echos*, 2008 02 06, page 13.
- [2] FAO., 2009. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. Rapport FAO.
- [3] Worm B. & 13 coauteurs, 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 3 Vol. 314 (5800), 787-790.
- [4] Commission européenne, 2008a. L'économie des écosystèmes et de la biodiversité. http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/economics/pdf/teeb_report_fr.pdf. Document consulté le 5 avril 2010.
- [5] Costanza R. & 12 coauteurs, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.
- [6] Secrétariat général de la mer, 2006. Rapport du Groupe POSÉIDON "Politique maritime de la France" 159 p. www.sgmer.gouv.fr.
- [7] Silvain J.F. & 18 coauteurs, 2009. Prospective pour la recherche française en biodiversité, Fondation pour la recherche sur la biodiversité, 96 p.
- [8] Roberts C.M., Hawkins J.P., 1999. Extinction risk in the sea. *Tree* vol. 14 (6), 241-246.
- [9] Dulvy K.N., Sadovy Y. & Reynolds J.D., 2003. Extinction vulnerability in marine populations. *Fish and Fisheries* 4, 25-64.
- [10] Groom M.J., Meffe G. K. & Carroll C. R., 2006. Principles of conservation biology Ed. Sinauer Associates. 779p . ISBN0878935185, 9780878935185.
- [11] Garcia, S. & 16 coauteurs, 2006. Workshop 10, Paris Conference: Biodiversity, Science and Governance, January 24-28, 2005 (report of the debates and proposed priority actions), Ministry of Foreign Affairs, Government of France, Paris (2006).
- [12] Beverton R.J.H., 1992. The State of the World's Fisheries Resources, Proceedings of the World Fisheries Congress, Plenary Sessions, Athens, 1992/edited by C.W. Voigtlander.
- [13] Pauly D., Christensen V., Dalsgaard J. & Torres F.R., 1998. Fishing down marine food webs. *Science* 279: 860-863.
- [14] Cury P. & Miserey Y., 2008. Une mer sans poissons. Ed. Calmann-Lévy. 257p.
- [15] Duffy, J.E., 2007. Marine biodiversity and food security, Encyclopaedia of Earth. www.eoearth.org/article/Marine_biodiversity_and_food_security.
- [16] Casini M., Lövgren J., Hjelm J., Cardinale M., Molinero C. & Kornilov G., 2008. Multi-level trophic cascades in a heavily exploited open marine ecosystem. *Proceedings of the royal Society B*, 7, 275 (1644), 1793-1801.
- [17] Scheffer M., Carpenter S. & de Young B., 2005. Cascading effects of overfishing marine systems. *Trends in Ecology and Evolution* 20 (11), 579-581.
- [18] Frank K. T., Petrie B., Choi J. S. & Leggett W. C., 2005. Trophic ascades in a Formerly Cod-Dominated Ecosystem. *Science* 10 Vol. 308

- (5728), 1621-623 DOI: 10.1126/science.1113075.
- [19] Swain D.P. & Chouinard G.A., 2008. Predicted extirpation of the dominant demersal fish in a large marine ecosystem: Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the southern Gulf of St. Lawrence. *Canadian journal of Fish and Aquatic Sciences* 65, 2315-2319.
- [20] Beaugrand G., Brander K. M., Lindley J.A., Souissi S. & Reid P.C., 2004. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea, *Nature* 426, 661-664.
- [21] Enever R., Revill A. & Grant A., 2007. Discarding in the English Channel, western approaches Celtic and Irish seas (ICES subarea VII). *Fisheries Research* 86, 143-152.
- [22] Amara R., 2003. Localisation et diagnostic de l'état de santé des nurseries d'espèces d'intérêt halieutique en Manche Orientale et sur le littoral atlantique. Rapport de contrat final Liteau du MEDD, 90 p.
- [23] Amara R. & Paul C., 2003. Seasonal patterns in the fish and epibenthic crustaceans community of an intertidal zone with particular reference to the population dynamics of plaice and brown shrimp. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences* 56, 809-820.
- [24] Selleslagh J., Amara R., Laffargue P., Lesourd S., Lepage M. & Girardin M., 2009. Composition and functioning of three fish estuarine assemblages of the eastern English Channel: a comparison with French estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81, 149-159.
- [25] Rochette S., Rivot E., Morin J., Mackinson S., Riou P., & Le Pape O., 2009. Effect of nursery habitat degradation on flatfish population: Application to *Solea solea* in the Eastern Channel (Western Europe). *Journal of Sea Research* (in press).
- [26] Safina C., 1998. Scorched-earth fishing. *Issues Sciences and Technology* 14, 33-36.
- [27] Cury P. & Morand S., 2004. Biodiversité marine et changements globaux : une dynamique d'interactions où l'humain est partie prenante. In *Biodiversité et changements globaux. Enjeux de société et défis pour la recherche*. Chevassus-au-Louis B., Barbault R. (eds). Paris : éditions ADPF, ministère des Affaires étrangères, 2004. www.adpf.asso.fr/adpf-publi/folio/textes/biodiversite.pdf.
- [28] Kaiser M.J. & de Groot S.J., 2000. The effects of fishing on non-target species and habitats: biological, conservation and socio-economic issues. Fishing News Books. Blackwell Science: Oxford, UK. ISBN 0-632-05355-0. XVI, 399 p.
- [29] Dauvin J.C., 1997. Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et mer du Nord. Synthèse, menaces et perspectives. *Patrimoines Naturels* 28, 1-359.
- [30] Henry F., Amara R., Courcot L., Lacouture D. & Bertho M.L., 2004. Spatial comparison of heavy metals in fish from the French coast of the Eastern English Channel and Southern bight of the North Sea. *Environment International* 30, 675-683.
- [31] Amara R., 2002. Localisation et diagnostic de l'état de santé des nurseries d'espèces d'intérêt halieutique en Manche Orientale et sur le littoral atlantique. Rapport de contrat final Liteau du MEDD, 90 p.

- [32] Amara, R., Meziane T., Gilliers C., Hermel G. & Laffargue P., 2007. Growth and condition indices in juvenile sole (*Solea solea* L.) measured to assess the quality of essential fish habitat. *Marine Ecology Progress Series* 351, 209-220.
- [33] Amara R., Selleslagh J., Billon G. & Minier C., 2009. Growth and condition of 0-group European flounder, *Platichthys flesus* as indicator of estuarine habitat quality. *Hydrobiologia* 67, 87-98.
- [34] Amiard-Triquet C. & Amiard J.C., 2008. Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques. Tec & Doc (Eds).
- [35] Kidd K.A., Blanchfield P.J., Mills K.H., Palace V.P., Evans R.E., Lazorchak J.M. & Flick R.W., 2007. Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of National Academy of Sciences US* vol. 104, 8897-8901.
- [36] Commission européenne, 2001. Communication de la commission au conseil et au parlement européen sur la mise en œuvre de la stratégie communautaire concernant les perturbateurs endocriniens. COM (2001) 262 final.
- [37] Derraik J.G.B., 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842-852.
- [38] Rybarczyk H., Elkaim B., Wilson J.G. & Loquet N., 1996. L'eutrophisation en Baie de Somme : mortalités des peuplements benthiques par anoxie. *Oceanologica acta*. vol. 19 (2), 131-140.
- [39] Desroy N. & Denis L., 2004. Influence of spring phytodetritus sedimentation on intertidal macrozoobenthos in the Eastern English Channel. *Marine Ecology Progress Series* 270, 41-53.
- [40] Beaugrand G., Reid P.C., Ibanez F., Lindley J.A. & Edwards M., 2002. Reorganization of North Atlantic Marine Copepod Biodiversity and Climate. *Science* 296, 1692-1694.
- [41] Brander K.M., Blom G., Borges M.F., Erzini K, Henderson G., MacKenzie B.R., Mendes H., Ribeiro J., Santos AMP. & Toresen R., 2003. Changes in fish distribution in the eastern North Atlantic: Are we seeing a coherent response to changing temperature? ICES Marine Science Symposia 219, 261-270.
- [42] Harley C.D.G. & 8 coauteurs, 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters* 9, 228-241.
- [43] Beare D.J., Burns F., Greig A., Jones E.G., Peach K., Kienzle M., McKenzie E. & Reid D.G., 2004. Long-term increases in prevalence of North Sea fishes having southern biogeographic affinities. *Marine ecology Progress Series* 284, 269-278.
- [44] Beaugrand G. & Kirby R.R., 2009. Climate, plankton and cod. *Global Change Biology* 16, 1268-1280.
- [45] Gollasch S., 2002. The importance of ship hull fouling as a vector of species introductions into the North Sea. *Biofouling* 18, 105-121.

- [46] Boudouresque C.F., Meinesz A., Ribera M.A. & Ballesteros E., 1995. Spread of the green alga *Caulerpa taxifolia* (*Caulerpales*, *Chlorophyta*) in the Mediterranean: possible consequences of a major ecological event. *Scientia marina* 59 (suppl. 1), 21-29.
- [47] Reise K., Gollasch S. & Wolff W.J., 1988. Introduced marine species of the North Sea coasts. *Helgoland Marine Research* 52 (3-4), 219-234.
- [48] Commission européenne, 2008b. Vers une stratégie de l'Union Européenne relative aux espèces envahissantes. Bruxelles, le 3.12.2008. COM(2008) 789 final.
- [49] Jackson J.B.C. & 17 coauteurs, 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293, 629-638.
- [50] Carlton J.T., Geller J.B., Reaka-Kudla M.L. & Norse E.A., 1999. Historical extinctions in the sea. *Annual review of ecology and systematic* 30, 515-538.

Etude théorique du comportement des tirants d'ancrage dans un sol pulvérulent

Ferial Mekki¹, Mohamed Meksaouine² & Mohamed Guenfoud¹

¹ Département de Génie Civil, Université 8 Mai 45, BP 401, Guelma, 24000, Algérie.

² Département d'hydraulique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Sidi Amar, Annaba, 23000, Algérie.

Accepté le : 28/04/2011

ملخص

إن أعضاء الشد عرفوا منذ عشرات السنين حيث استعملوا بنجاح في استقرار المنحدرات الصخرية. منذ الستينات اعضاء الشد تم استعمالهم في التربة السهلة باستعمال الضخ. المبدأ الأساسي يتمثل في حشد حجم معين للتربة والعقبة الأساسية في فهم هذه الآلية تتمثل في العدد الكبير للمتغيرات : مقاومة التربة ؛ مقاومة الفولاذ ؛ أبعاد الثقوب ؛ خصائص ملاط الضخ ؛ زاوية الاحتكاك والتمددية. هذا العمل يقدم نتائج دراسة نظرية لتصرف أعضاء الشد في تربة درورة المتمثل في تحديد نموذج مبني على النظرية الحركية للتحليل الأقصى في حالة معيار كولون. بعد المقارنة بين النتائج المتحصل عليها عن طريق التقريب النظري والتقريب الاختباري يستنتج أن نموذج الانقصاص المتحصل عليه حول عضو الشد قريب من الحقيقة.

الكلمات المفتاحية : أعضاء الشد نموذج - النظرية الحركية - التحليل الأقصى - جيوتكنيك

Résumé

Les tirants d'ancrages sont connus depuis plusieurs dizaines d'années. En particulier, ils sont souvent appliqués avec succès pour la stabilisation des talus rocheux. Depuis les années 60, les tirants d'ancrage sont utilisés dans les terrains meubles par utilisation de l'injection. Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume du terrain, la difficulté principale dans la compréhension d'un tel mécanisme réside dans le nombre élevé de variable : Résistance du sol, résistance de l'acier, dimensions des perforations, caractéristique du coulis d'injection, angle de frottement et dilatance. Ce travail présente les résultats de l'étude théorique du comportement des tirants d'ancrage dans un sol pulvérulent qui consiste à déterminer un modèle basé sur l'approche cinématique de la théorie de l'analyse limite, dans le cas du critère de Mohr-Coulomb. La comparaison des résultats obtenus avec l'approche théorique et l'approche empirique laisse conclure que le type de rupture du sol obtenu autour du tirant est proche de la réalité.

Mots clés : Tirants D'ancrage Modèle - Approche Cinématique - Analyse Limite - Géotechnique.

Abstract

The anchors are known for several decades. In particular, they are often applied successfully for the rock slope stabilization. Since the sixties, the anchors are used in the loose grounds by the use of the injection. The basic principle consists in mobilizing a certain volume of the ground, the principal difficulty in the comprehension of such mechanism lies in the high number of variable: Resistance of the ground, resistance of steel, dimensions of the perforations, characteristic of the angle of friction and dilatancy. This work presents the results of the theoretical study of the behavior of the anchors in a pulverulent ground which consists in determining a model based on the kinematic approach of the theory of the limit analysis, in the case of the criterion of Mohr-Coulomb. The comparison between the results obtained by the theoretical approach and empirical approach lets conclude that the type of rupture of the ground obtained around the anchors is close to reality.

Key words: Anchors Model - Kinematics Approach - Limit Analysis - Geotechnical Engineering.

Auteur correspondant : faroula2723@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les tirants d'ancrage sont des dispositifs enterrés soumis à un effort de traction, ils sont largement utilisés pour la stabilisation des talus et des structures tels que: (mur de soutènement, radiers, quais portuaires palplanches, pylônes, barrage, plateformes pétrolières, parois moulées...), ce qui explique que l'utilisation de ce dispositif est devenue incontournable. Une large panoplie de tirant d'ancrage a été développée au cours de ces dernières décennies pour répondre aux exigences rigoureuses associées à l'infrastructure civile moderne et les développements s'étaient focalisés sur:

- L'amélioration de l'interaction sol-structure tenant compte des capacités et des longueurs des tirants d'ancrage.
- La simplification des procédures d'installation.
- L'assurance d'une activité plus rapide et plus longue du tirant d'ancrage.

A travers cette étude nous nous proposons d'apporter une contribution pour la détermination de la charge limite du tirant d'ancrage sollicité en traction dans un milieu pulvérulent en fonction de :

- La densité sèche du massif du sol sollicité ainsi que son angle de frottement interne.
- La longueur de tirant.

Tirant profit d'un outil qui jusqu'ici a été peu exploité dans ce domaine; la théorie de l'analyse limite utilisant son théorème cinématique peut traiter des problèmes très complexes de l'interaction sol structure: [1, 2, 3, 4, 5, 6]

D'après l'approche empirique utilisée dans ce travail les recommandations TA 95 [7] proposent une méthode qui consiste à étudier la stabilité du soutènement vertical d'un massif constitué de volumes élémentaires de sols associés à chacun des tirants verticaux sollicités simultanément en traction. Elle considère que le volume réellement associé à un tirant vertical sollicité en traction a une forme grossièrement cylindrique terminée dans la zone de scellement par un volume conique

dont le sommet se situe à l'extrémité basse de scellement comme le montre la figure 1.

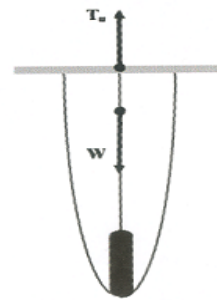


Figure 1. Forme réelle du tirant vertical d'après les recommandations TA95 [7].

Dans des sols dont le frottement gouverne principalement le comportement; le volume cylindrique est substitué par un volume conique de demi-angle au sommet " β " ayant pour axe le tirant de hauteur total « L » comme c'est représenté sur la figure 2.

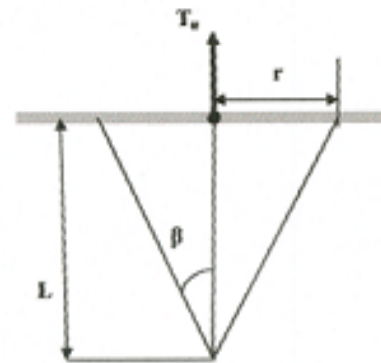


Figure 2. Volume conique du tirant vertical en sol homogène à frottement interne prédominant d'après les recommandations TA95 [7].

Avec:

$$r = L \cdot \tan(\beta) \quad (1)$$

$$T_u = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot \frac{L}{3} \quad (2)$$

Cette observation très importante va être le prélude pour l'élaboration de nos modèles théoriques. Nous suggérons un modèle en trois dimensions avec l'utilisation du théorème cinématique de l'analyse limite. L'analyse des équations et des résultats est traitée par le logiciel MATHCAD 13 [8].

2. CALCUL A LA RUPTURE

Le calcul à la rupture a pour objet de cerner un domaine de charges potentiellement supportables pour une structure dont le chargement dépend d'un nombre fini de paramètres:

- La connaissance de la géométrie d'un système donné,

- La connaissance du mode de chargement qui lui est appliqué,

- La connaissance des capacités de résistance des matériaux constitutifs.

Le calcul à la rupture se fait aisément tout en notant que la condition nécessaire pour que la stabilité d'une structure soit assurée et qu'il y ait compatibilité entre les équations exprimant l'équilibre statique et les conditions imposées par les capacités de résistances. Il considère une loi de comportement idéaliste cette idéalisation nommée règle de normalité (le principe de normalité de Hill. [9])

Dans l'espace des chargements, le domaine de ces charges est convexe et contient le chargement nul. Tout chargement situé en dehors du domaine entraînera la ruine du système. Mais un chargement dans le domaine ne pourra être qualifié que de potentiellement supportable. Pour l'encadrement des bords du domaine, les deux démarches "approche par l'intérieur" et "approche par l'extérieur" sont complémentaires. La première, dite approche statique, se fait dans le sens de la sécurité. Elle consiste à exhiber un champ de contraintes statiquement admissible et à exprimer s'il satisfait au critère de rupture. Un certain nombre d'études ont été faites sur ce sujet tant pour les milieux purement cohérents [10] que pour les milieux frottants [11]. La finesse de l'approche est liée à l'intuition du chercheur et à sa capacité à réaliser le meilleur compromis entre un champ réaliste et des calculs analytiques réalisables. Les travaux précédemment cités ont fait l'objet de validation expérimentale et ces derniers ont montré qu'ils s'approchaient convenablement de la réalité.

La seconde approche est dite cinématique. Parmi d'autres, les auteurs précédents ont appliqué cette approche aux cavités des sols purement cohérents. En effet, le critère de rupture dans ce cas simplifié, critère de Coulomb [12], puisque seul intervient la cohésion et l'angle de frottement et que la majoration de la puissance dissipée est explicite quel que soit le champ de vitesse envisagé. Le calcul de la charge limite à partir du principe de normalité de Hill [9] n'est pas vrai pour les sols frottants cependant les récentes études théoriques [13,14] ont permis de conclure que la charge limite peut être obtenue en employant l'écoulement plastique en remplaçant c et φ par c^* et φ^* comme suit:

$$\tan \varphi^* = \frac{\cos \psi \sin \varphi}{1 - \sin \psi \sin \varphi} \quad (3)$$

$$C^* = \frac{\cos \psi \cos \varphi}{1 - \sin \psi \sin \varphi} \quad (4)$$

L'application du théorème cinématique de la théorie de l'analyse limite exige d'égaliser le taux de travail des forces extérieures au taux de dissipation d'énergie interne. Nous nous proposons donc de développer l'approche cinématique, et de voir dans quelle mesure elle est exploitable.

3. EXPOSE DE LA METHODE ET CHOIX DE LA CONFIGURATION

L'approche cinématique (borne supérieure) du calcul à la rupture est basée sur la conception de mécanisme virtuel de rupture inspiré des formes de ruptures observées sur modèles réduits. Elle permet de construire une approche par l'extérieur (c.à.d par excès) du domaine de stabilité la condition nécessaire de stabilité est obtenue pour chaque mécanisme en écrivant: la puissance P_{ext} des efforts extérieurs dans les mécanismes considérés

ne peut excéder la puissance résistante maximale P_{\max}^{res} correspondante :

$$P_{ext} \leq P_{\max}^{res} \quad (5)$$

La quantité P_{\max}^{res} est une fonctionnelle du mécanisme virtuel envisagé et elle ne dépend que du matériau.

Elle représente physiquement la puissance maximale que le massif est en mesure de développer dans le mécanisme envisagé, du fait de ses capacités de résistance.

4. MECANISME DE RUPTURE SELON LE CRITERE DE MOHR COULOMB ET LES HYPOTHESES DE CALCULS

Nous développerons un mécanisme de rupture en trois dimensions en utilisant la borne supérieure de l'analyse limite pour un tirant rugueux, les hypothèses du calcul sont les suivantes:

- Sol non cohérent limité par une surface libre horizontale.

- Un tirant incliné avec une valeur de frottement sol-tirant supérieur à l'angle de frottement interne ($\delta \geq \varphi$) et il est soumis à chargement statique à vitesse constante [16].

- Modèle avec un champ de vitesse cinématiquement admissible (la vitesse à l'interface sol-structure est supposée tangente au tirant d'ancrage et inclinée d'un angle de frottement φ) permettant le calcul suivant le principe de la borne supérieure de l'analyse limite [16].

- Les valeurs d'angle de frottement interne ainsi que la densité sèche correspondante pour le sable d'Hostun étaient pris suivant la relation mise sous un polynôme du second degré :

$$[\varphi = -97,0424.d^2 + 368,8507.d - 304,919], \quad [17].$$

- Le calcul est effectué pour différentes longueurs du tirant.

La forme tridimensionnelle du mécanisme représenté sur la figure 4 résulte de la rotation de la forme en plan (Fig.3) autour d'un axe qui passe par le milieu du tirant. La condition d'angle φ telle citée par Meksaouine [4] propose un cône d'axe parallèle à la direction du vecteur vitesse V_0 .

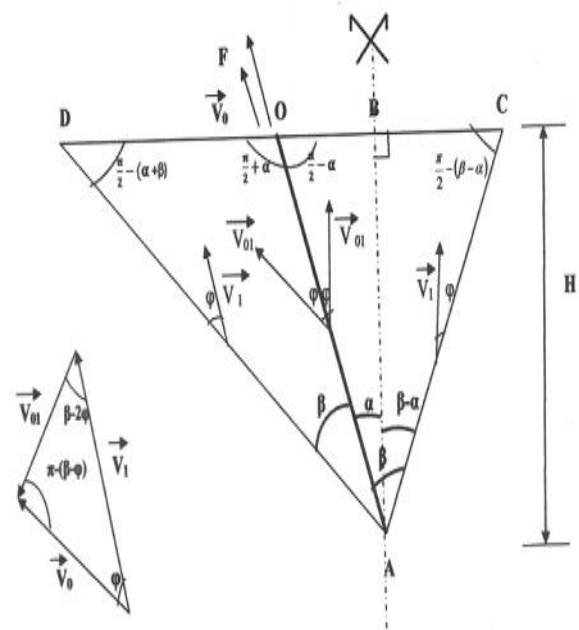


Figure 3. Mécanisme de rupture du sol environnant le tirant incliné ($\delta \geq \varphi$) en plan et diagramme de vitesse associé selon Mohr- Coulomb.

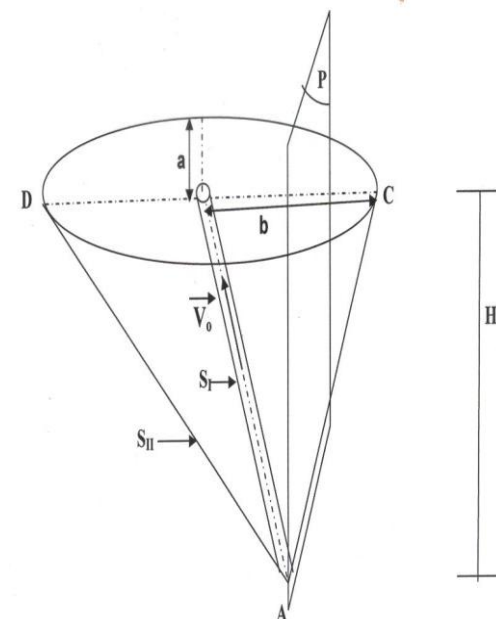


Figure 4. Mécanisme de rupture du sol environnant le tirant incliné ($\delta \geq \varphi$) dans l'espace selon Mohr- Coulomb.

4.1 Vitesses

A partir du diagramme des vitesses représenté sur la figure 3, les expressions des vitesses relative et principale sont déduites géométriquement en fonction de la vitesse initiale (V_0).

Vitesse du bloc:

$$V_I = \frac{V_0 \cdot \sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta - 2\varphi)} \quad (6)$$

Vitesse relative tirant-sol:

$$V_{0I} = \frac{V_0 \cdot \sin(\varphi)}{\sin(\beta - 2\varphi)} \quad (7)$$

4.2 Surfaces de rupture

Surface latérale du cylindre:

$$S_I = \pi \cdot d \cdot L \quad (8)$$

Surface latérale du cône:

$$S_{II} = \frac{\pi \cdot H^2 \cdot \sin(2\beta)}{2 \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

4.3 Poids des massifs

$$W_{DAC} = \frac{\pi \cdot \gamma \cdot a \cdot b \cdot L \cdot \cos(\alpha)}{3} \quad (10)$$

$$a = L \cdot \tan(\beta) \quad (11)$$

Si le cône ne dépasse pas la verticale ($\alpha > \beta$):

$$b = \frac{H}{2} [\tan(\alpha + \beta) - \tan(\alpha - \beta)] \quad (12)$$

Si le cône dépasse la verticale ($\alpha \leq \beta$)

$$b = \frac{H}{2} [\tan(\beta - \alpha) + \tan(\alpha + \beta)] \quad (13)$$

4.4 Energies dissipées

Les dissipations d'énergie interne dues à la cohésion le long des surfaces de rupture et de l'interface sol-tirant pour le cas d'un tirant rugueux ($\delta \geq \varphi$) dans un sol

homogène ayant une cohésion c sont données par les expressions suivantes :
Le taux d'énergie interne dissipée le long de surface de rupture S_I est égal à:

$$E_{OA} = \frac{c \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot V_0 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{\sin(\beta - 2\varphi)} \quad (14)$$

Le taux d'énergie interne dissipée le long de la surface de rupture S_{II} est égal à:

$$E_{OA} = \frac{c \cdot \pi \cdot H^2 \cdot V_0 \cdot \sin(2\beta) \cdot \sin(\beta - \varphi)}{2 \sin(\beta - 2\varphi) \cos(\beta - \alpha) \cos(\alpha + \beta) \sin(\beta - 2\varphi)} \quad (15)$$

Pour un tirant rugueux ($\delta \geq \varphi$) la dissipation d'énergie par friction d'un sol non cohérent est nulle.

4.5 Travail des forces

Travail des forces extérieures:

$$T_{DAC} = W_{DAC} \times V_I \times \cos(\varphi) \quad (16)$$

Travail de la force gravitaire :

$$T = F \times V_0 \quad (17)$$

4.6 Equation d'équilibre

En égalisant le taux de dissipation d'énergie interne au taux du travail des forces extérieures, on obtient la charge limite :

$$T - T_{DAC} = \sum E_i \quad (18)$$

$$F = \frac{c \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{\sin(\beta - 2\varphi)} + \frac{c \cdot \pi \cdot H^2 \cdot \sin(2\beta) \cdot \sin(\beta - \varphi) \cdot \cos(\varphi)}{2 \cdot \sin(\beta - 2\varphi) \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot \sin(\beta - 2\varphi)} + \frac{\pi \cdot \gamma \cdot a \cdot b \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta - \varphi) \cdot \cos(\varphi)}{3 \cdot \sin(\beta - 2\varphi)} \quad (19)$$

Pour un sol pulvérulent $c=0$

$$F = \frac{\pi \cdot \gamma \cdot a \cdot b \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta - \varphi) \cdot \cos(\varphi)}{3 \cdot \sin(\beta - 2\varphi)} \quad (20)$$

En effectuant une minimisation de la charge limite par rapport à la variable (β) qui définit ce mécanisme; on obtient la solution la plus critique.

5. APPLICATION

Dans cette application, en introduisant le modèle dans le logiciel MATHCAD 13[8] permettant ainsi la visualisation de la forme de la charge F en 3D.

Données:

$$L = 1m; C = 0 \frac{Kg}{m^2}; \gamma = 1570 \frac{Kg}{m^3}; d = 0,12m$$

$$\alpha + 2\varphi = 76 \text{deg}; \varphi = 35 \frac{\pi}{180}; \alpha = 6 \frac{\pi}{180}$$

$$V_0 = 1 \frac{m}{s}$$

Conditions aux limites:

$$\beta = 1,2$$

Hypothèse:

Minimisation:

$$1,3 < \beta < 1,38$$

$$\text{Minimum } (F, \beta) = 1,314$$

Résultat de la minimisation:

$$F(1,314) = 1,632 \times 10^5 \text{ Kg}$$

D'après la figure 5 on constate que la forme de la charge limite F en 3D présente une forme concave (forme de cuvette) indiquant l'existence d'un minimum, donc d'une butée.

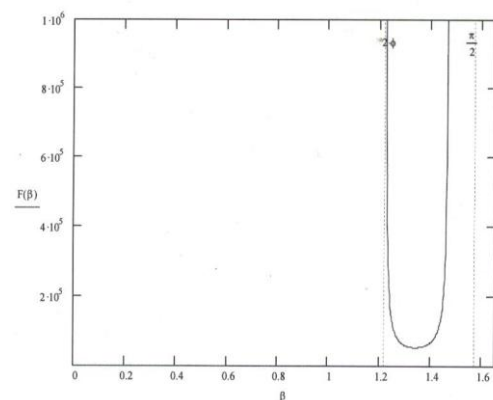


Figure 5. Visualisation de la courbe de la charge F en fonction du paramètre (β) dans l'espace.

6. RESULTATS

L'analyse des résultats obtenus à l'aide du modèle répondant aux critères de la borne supérieure de l'analyse limite, montre l'évolution du rapport F/L^3 qui augmente avec l'évolution de l'angle de frottement interne (ainsi que sa densité sèche) et il reste le même pour un φ donné quelle que soit la longueur du tirant avec la condition que $\alpha + 2\varphi < \frac{\pi}{2}$ comme c'est indiqué respectivement par les figures 6, 7, 8, 9.

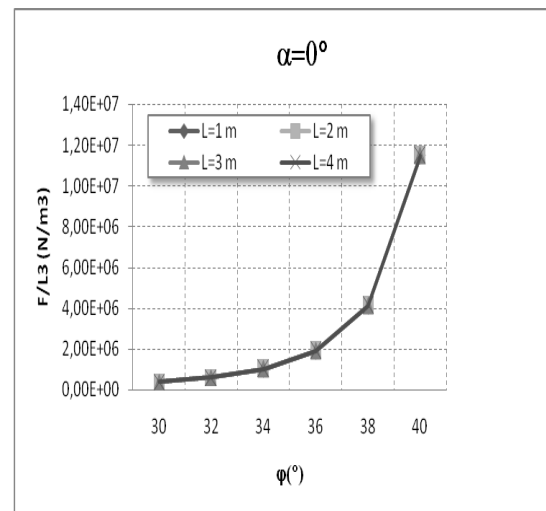


Figure 6. Evaluation du rapport F/L^3 avec l'angle de frottement interne φ pour $\alpha = 0^\circ$.

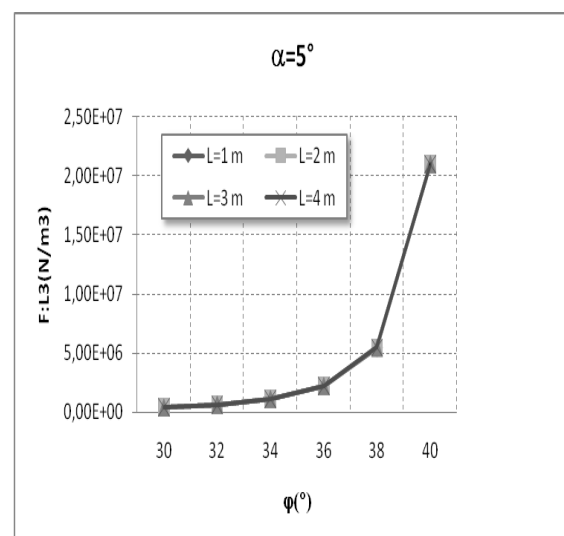


Figure 7. Evaluation du rapport F/L^3 avec l'angle de frottement interne φ pour $\alpha = 5^\circ$.

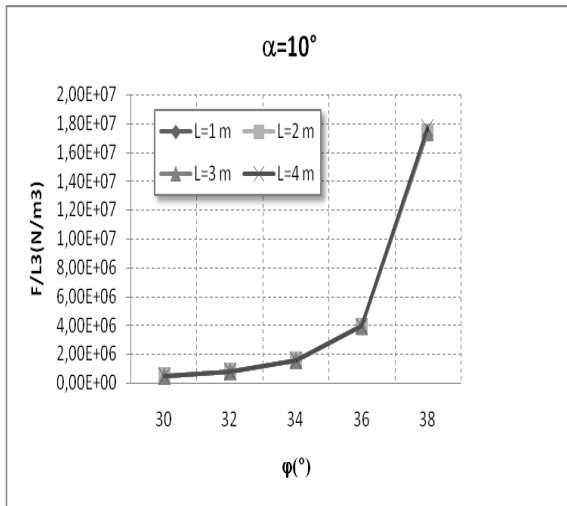


Figure 8. Evaluation du rapport F/L^3 avec l'angle de frottement interne ϕ pour $\alpha=10^\circ$.

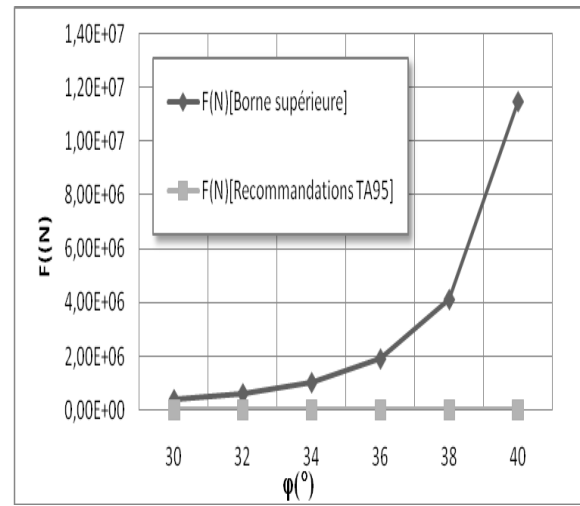


Figure 10. Comparaison entre l'effort obtenu par l'analyse limite et les recommandations T A 95 pour $L=1$ m.

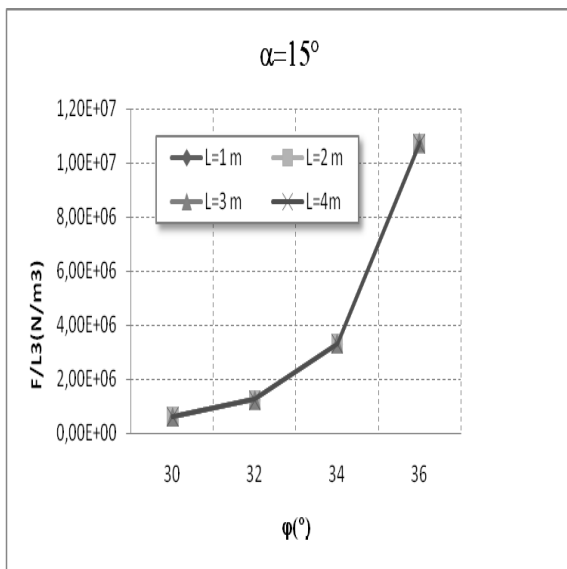


Figure 9 Evaluation du rapport F/L^3 avec l'angle de frottement interne ϕ pour $\alpha=15^\circ$

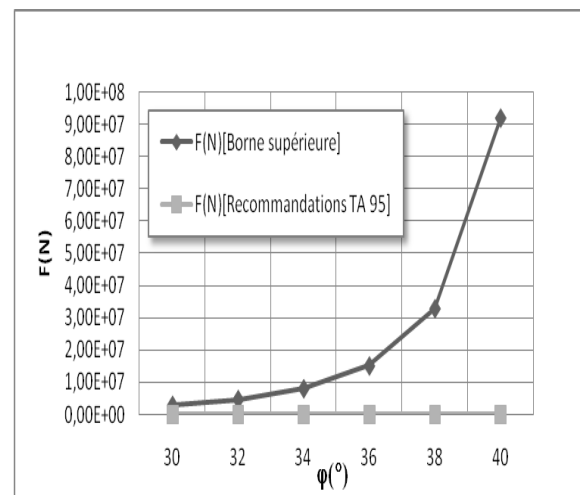


Figure 11. Comparaison entre l'effort obtenu par l'analyse limite et les recommandations T A 95 pour $L=2$ m.

Pour un tirant vertical ($\alpha=0^\circ$), nous observons après comparaison que les valeurs de la charge limite obtenues par l'analyse limite sont largement supérieures (surestimées) aux valeurs tirées des recommandations TA 95, 1995 [7].

Comme cela apparaît sur les figures 10, 11, 12, 13; cela prouve que nous avons obtenu une borne supérieure.

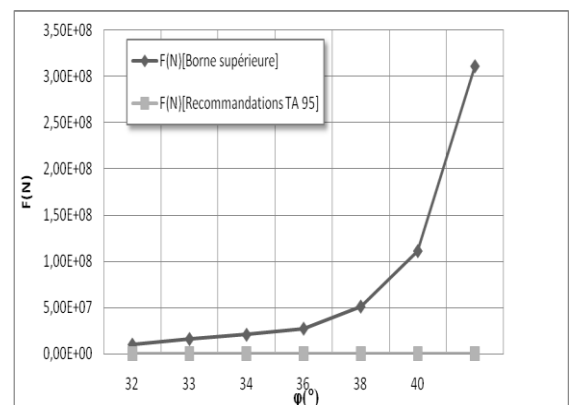


Figure 12. Comparaison entre l'effort obtenu par l'analyse limite et les recommandations T A 95 pour $L=3$ m.

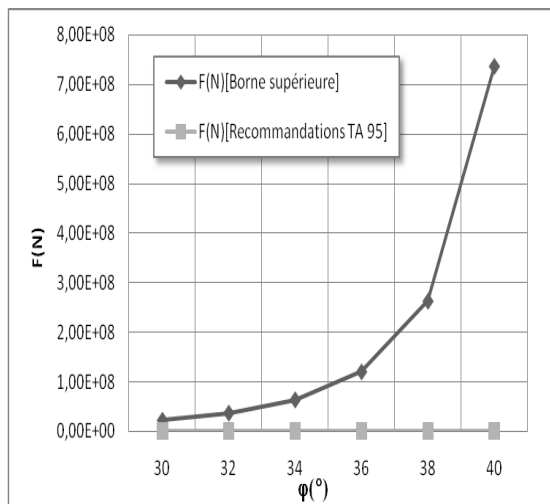


Figure 13. Comparaison entre l'effort obtenu par l'analyse limite et les recommandations T A 95 pour L=4m.

7. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude est l'évaluation de la charge de rupture en utilisant le théorème cinématique de la théorie de l'analyse limite : pour cela un mécanisme de rupture est proposé dans l'espace qui a donné des bornes supérieures, les résultats des calculs ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La forme de la courbe donnant la charge limite F fonction de la variable (β), est concave, sous forme de cuvette, ce qui montre bien l'existence d'un minimum, donc d'une butée.

- Les valeurs de la charge limite qui ont été obtenues avec un seul prisme donnent des valeurs élevées par rapport aux recommandations TA95. Cela tend à prouver que le modèle proposé est à parfaire et la solution est de réduire le volume du mécanisme par l'introduction d'autres prismes afin d'obtenir d'autres bornes supérieures plus petites qui entraîneront automatiquement des résultats plus rapprochées de la valeur réelle.

- Nous nous sommes limités à un modèle avec lignes de ruptures horizontales alors que normalement elles devraient être des courbes.

- Les résultats de cette étude s'avèrent insuffisante pour appréhender avec précision les phénomènes engendrés autour du tirant d'ancrage. Il apparaît donc nécessaire de les compléter et les développer par d'autres approches expérimentales permettant d'obtenir d'autres ordres de grandeurs et de réaliser des études paramétriques et par des approches numériques permettant la détermination du champ de déplacement, de déformation et de contraintes dans le massif de sol environnant le tirant d'ancrage et la prise en compte de la loi de comportement de sol élaboré et de conditions aux limites complètes.

Ce travail propose tout de même une ébauche de solution à ce problème, dans le cas de sol frottant, jamais réalisé avec cette méthode qui pourra être repris par d'autres chercheurs pour les sols cohérents.

NOMENCLATURE

a	Longueur du petit rayon de la base du cône
b	Longueur du grand rayon de la base du cône
c	Cohésion
d	Diamètre du cylindre
E_{ij}	Energie interne dissipée
F	Charge limite
L	Hauteur totale de l'axe du tirant
H	Hauteur totale du cône
L_{ij}	Longueurs des lignes de rupture
P_{ext}	puissance des efforts extérieurs
P_{max}^{res}	Puissance résistante maximale
r	Rayon de base du cône
S_{ij}	Surface de la section de la rupture
T_u	Traction limite conventionnelle
T_{ij}	Travail du massif du sol
V_0	Vitesse d'arrachement du tirant
V_I	Vitesse du bloc
V_{ij}	Vitesse relative des massifs
W_{ij}	Poids du massif du sol
β	Demi-angle au sommet
φ	Angle de frottement interne du sol
ψ	Angle de dilataance
γ	Poids spécifique du sol

REFERENCES

- [1] Lysmer J., 1970. Limit analysis of plane problems in soil mechanics, *J. Soil. Mech and Found. Div. ASCE*, Vol. 96 (4), 1311-1334.
- [2] Lee I.K. & Herington J.R., 1972. A theoretical study of pressures acting on rigid wall by sloping earth on rockfill, *Géotechnique*, Vol. 22 (1), 1-26.
- [3] Chen W.F. & Rosenfarb J.L., 1973. Limit analysis solutions of earth pressure problems, *Soil and Found*, Vol. 13(4), 45-60.
- [4] Meksaouine M., 1993. Etude expérimentale et théorique de la poussée passive sur pieux rigides, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Institut National des sciences appliquées, Lyon, France, 186p.
- [5] Benyaghla H., 1999. Etude théorique de la poussée et de la butée sur pieux isolés. Thèse de Magister en Génie Civil, Université 08 Mai 1945 Guelma, Algérie, 200p
- [6] Soubra A.H., 2000. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures, *Can. Geotech. J.*, Vol. 37(2), 463-478.
- [7] Recommandation T.A. 95, 1995. Concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ancrage, Ed. Eyrolles. Paris, 147p.
- [8] Mathcad software program, Mathsoft Engineering and education, Inc.USA
- [9] Hill R., 1950. The mathematical theory of plasticity. *Clarendon Press*, 356p.
- [10] Davis E.H., Gunn M.J. & Seniviratne H.N., 1980. The stability of shallow tunnels and underground opening in cohesive material, *Geotechnique*, Vol. (4), 397-419.
- [11] Muelhaus H., 1985, Lower bound solutions for circular tunnels in two now tree dimensions, *Rock Mech and Rock Engng*. Vol. (18), 37-52.
- [12] Coulomb C.A., 1773. Sur une application des règles de maximis minimis à quelques problèmes de statiques relatives à l'architecture *Acad. R. Sci. Mém. Math. Phys.* Vol. 14 (6), 343-382.
- [13] Drescher A. & Detournay E., 1993. Limit load in translational failure mechanisms for associative and non-associative materials, *Geotechnique*, Vol. 43(3), 443-456.
- [14] Michalowski R.L. & Shi L., 1995. Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol.121(5), 421-428.
- [15] Michalowski R.L. & Shi L., 1996. Closure on Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *J. Geotech. Engrg. ASCE*, Vol. 122(8), 701-703.
- [16] Chen W.F., 1975. Limit analysis and soil plasticity, Ed. Elsevier Science, 638p.
- [17] Bourdeau Y., 1977. Poussée des sols pulvérulents, influence des caractéristiques des sols et du modèle d'essais. Thèse de Docteur ingénieur, Institut National des sciences appliquées, Lyon, France, 205p

Elaboration, caractérisation et comportement à l'oxydation haute température des nanomatériaux $Fe_{1-x}Al_x$ obtenus par mécanosynthèse

Rabah Chater, Sifi Ghrieb & Daoud Chaanbi

Laboratoire de Chimie des Matériaux Inorganiques. Département de Chimie.
Université Badji Mokhtar Annaba. Faculté des sciences- B.P.12, Annaba Algérie

Accepté le : 01/05/2011

ملخص

حاليا البحوث تتجه نحو إنتاج المواد التي يمكن التحكم في مراقبة خصائصها المستقبلية بواسطة السيطرة على المجهرية. في هذا الصدد سوف نستخدم عملية تطوير مخبري بواسطة تحضير صناعة السبائك الميكانيكية، في هذا العمل، لقد اخترنا تحضير المركبات ذات النظام (35,50 , $Fe_{1-x}Al_x$ ($x=20$) و دراسة سلوكها اتجاه عملية الأكسدة عند درجات حرارة عالية. عملية الطحن عند الطاقة عالية سمح انطلاقا مما معادن نقية بتطوير خليط متجانس و ذو بنية نانو متريية. شروط الطعن المستخدمة أدت إلى تشكيل طور متجانس بعد 7 ساعات من طحن و هذا مهما كانت تركيبة الخليط الأولى، تم إجراء تشخيص تحديد بنية المساحيق بواسطة المجهر الإلكتروني (BME) و حيود الأشعة السينية (DRX)، و قد أجرينا اختبارات الأكسدة عند درجات حرارة عالية على ثلاثة أنواع سبائك ثنائية FeAl عند درجة حرارة 1000 درجة مئوية تحت ظروف هواء المخبر و الضغط الجوي، اختبارات الأكسدة عند 1000 درجة مئوية أجريت على مرحلتين: الأولى مرحلة انتقالية مع حركة نمو سريعة بسبب وجود الألومينا غير مستقرة، و المرحلة الثانية مستقرة مرتبطة نمو الألومينا مستقرة. معدل الأكسدة يتناقص مع نسبة زيادة الألومنيوم.

الكلمات المفتاحية : $AlFe$ سبيكة – وليف ميكانيكية- مواد نانو- أكسدة عند درجات حرارة عالية

Résumé

Actuellement, les recherches s'orientent vers la production de matériaux pour lesquels les futures propriétés pourraient être contrôlées par la maîtrise de la microstructure. A ce sujet, nous utiliserons dans ce travail le procédé d'élaboration par mécano synthèse. Nous avons choisi de synthétiser les composés intermétalliques du système $Fe_{1-x}Al_x$ ($x=20, 35, 50\%$) et d'étudier leur comportement à l'oxydation haute température. Le broyage à haute énergie a permis d'élaborer, à partir de métaux purs, des mélanges homogènes et nanostructurés. Les conditions de broyage utilisées conduisent à la formation d'une phase homogène après 7h de broyage et cela quelle que soit la composition du mélange initial. La caractérisation des poudres a été réalisée par la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX). Nous avons effectué des essais d'oxydation à haute température sur trois alliages binaires FeAl à 1000 °C, dans une atmosphère d'air de laboratoire et à pression atmosphérique. Les essais d'oxydation menés à 1000 °C présentent deux stades : un premier stade transitoire avec une cinétique à croissance rapide liée à la présence des alumines métastables et un deuxième stade stationnaire associé à la croissance de l'alumine. Le taux d'oxydation diminue avec l'augmentation de la teneur en Al.

Mots clés: *Alliage Fe -Al- Mécanosynthèse – Nanomatériaux - oxydation haute température*

Abstract

Currently, research is directed towards the production of materials for which the future properties could be controlled by the control of the microstructure. In this study, we used the process of development by mechanosynthesis, which consists an original work. We chose to synthesize the intermetallic compounds of the $Fe_{1-x}Al_x$ ($x=20, 35, 50\%$) system and to study their behaviours with high oxidation temperature. High energy crushing made it possible to elaborate, starting from pure elements, the homogeneous and nanostructured mixtures. Under the conditions of crushing used, the process led to the formation of a homogeneous phase after 7h of crushing and regardless of the initial composition of the mixture. The characterization of the powders was carried out by electronic scan microscopy (SEM) and diffraction of x-rays (XRD). We conducted tests of high-temperature oxidation on three binary FeAl alloys at 1000 °C in a laboratory air atmosphere and at atmospheric pressure. Oxidation tests conducted at 1000 °C have two stages: A first transitional stage with kinetics with fast growing due to the presence of metastable alumina and a second stationary stage associated with the growth of α alumina. The oxidation rate decreases with increasing Al content.

Keywords: *Alloy Fe -Al- Mechanosynthesis – Nanomaterials - High oxidation temperature*

Auteur correspondant : chattersamy@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le broyage haute énergie est une technique d'élaboration de matériaux tels que les alliages amorphes, nanocristallins, les composites, les céramiques etc. Actuellement cette technique connaît un développement considérable en raison de l'intérêt porté aux matériaux [1, 2, 3]. En effet les matériaux cristallins ainsi élaborés ont des tailles de grains nanométriques, de l'ordre de 10nm à 100nm [4]. La particularité de ces matériaux est qu'ils présentent une amélioration simultanée des propriétés physiques et mécaniques. Les aluminides de fer ($Fe_{1-x}Al_x$) ont attiré grand intérêt pour leur application aux hautes températures et dans plusieurs environnements agressifs [5]. La formation d'un film stable d'alumine sur la surface d'alliage FeAl fournit une excellente résistance à l'oxydation avec et sans les additions ternaires [6]. Ainsi l'étude de la formation du film d'alumine et l'influence de la composition d'alliage sur le comportement à l'oxydation haute température sont les axes principaux de ce travail.

2. PARTIE EXPERIMENTALE

2.1 Elaboration des échantillons

Trois alliages avec les compositions nominales de Fe-20Al, Fe -35Al, et Fe-50Al (les concentrations sont en % poids) ont été employés dans cette étude. L'élaboration des poudres nanocristallines de $Fe_{1-x}Al_x$ ($x=20, 35, 50$ %) a été réalisée par un broyage à haute énergie, grâce un broyeur planétaire conventionnel, dans lequel une jarre en acier inoxydable contenant les poudres et les billes en acier inoxydable, sont en agitation dans une atmosphère d'argon. Les conditions de broyage, conduisent à la formation d'une phase homogène après 7 heures de broyage et cela quelque soit la composition du mélange initiale.

2.2 Oxydation cyclique

L'oxydation à haute température des échantillons de FeAl a été réalisée. Les échantillons (poudres) sont placés dans un creuset en platine puis pesés avec une balance de précision. Une fois la température d'oxydation atteinte dans le four l'ensemble du système, (creuset en platine contenant la poudre), est placé dans le four (Nabertherm) à résistances programmables. L'oxydation a été effectuée sous air laboratoire à pression atmosphérique. Une fois l'oxydation terminée, le retour à la température ambiante s'est fait, four fermé, sous air laboratoire. Après refroidissement des échantillons, l'ensemble (creuset en platine contenant la poudre oxydée) est de nouveau pesé. Les oxydations dans le four durent 1heure, 2 heures, 4 heures, 8 heures, 16 heures, 20 heures et 24 heures. Les valeurs pondérales obtenues seront utilisées afin de tracer les courbes cinétiques d'oxydation ($\Delta M/S$) en fonction du temps pour chaque échantillon aux différentes températures. Aussi tous les échantillons ont été préparés selon le même protocole.

2.3 Techniques de caractérisation utilisées

La caractérisation des poudres a été réalisée par la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX). Les diagrammes ont été obtenus sur un diffractomètre Bruker D8 Advance avec une tension de 40 kV et une intensité de 30 mA fonctionnant en géométrie horizontale dans une configuration de $\Omega= 2\theta$. Une longueur d'onde de $\lambda= 1,54056 \text{ \AA}$ est utilisée pour obtenir les données dans la gamme de $20^\circ < 2\theta < 100^\circ$ avec un pas angulaire de $0,02^\circ$ et un temps de comptage/point de 6 secondes (Nombre de point : 2751), pour minimiser d'une part le bruit de fond, et d'autre part recueillir toutes les informations contenues dans la forme, la largeur et le profil des raies. Le microscope électronique à balayage utilisé est un

appareil JEOL 5410 LV SEM avec une tension d'accélération de 30 kV, équipant le centre commun d'analyse de l'université de la Rochelle. Celui-ci permet d'analyser trois types de rayonnement [7] : Les électrons secondaires donnent des informations sur la topographie de surface du matériau, les électrons rétrodiffusés permettent la construction d'une image sensible aux espèces chimiques. Les photoélectrons assurent l'identification des éléments chimiques.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Analyse structurale et microstructurale

Les diffractogrammes RX des différents mélanges broyés pendant 7 heures sont présentés sur la figure 1, ainsi que le diffractogramme du mélange FeAl initial.

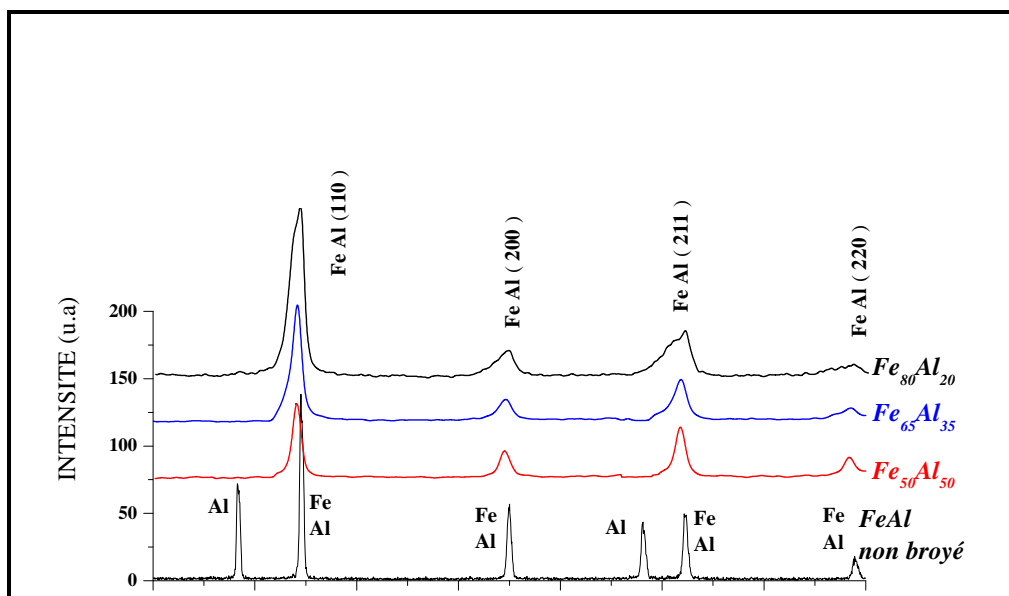


Figure 1: Diffractogrammes des différents mélanges FeAl broyés pendant 7 heures

L'analyse RDX indique seulement la présence de la phase FeAl. Cependant la figure 1, qui compare les diagrammes DRX des poudres FeAl broyées aux diagrammes DRX du mélange non broyées, montre une modification de l'intensité et de la forme des pics ainsi qu'un décalage du profil des pics vers les petits angles. Un examen plus attentif des pics (110) de diffraction et leur superposition montre un élargissement en fonctions de la diminution de la teneur d'aluminium, mais aussi un léger décalage vers les faibles angles avec une diminution progressive de l'intensité des différents pics au fur et à mesure que la teneur en aluminium augmente. Ce résultat est illustré par les courbes d'évolution du diffractogramme du pic (110) du $Fe_{50}Al_{50}$; $Fe_{65}Al_{35}$; $Fe_{80}Al_{20}$ broyés pendant 7h sur la figure 2.

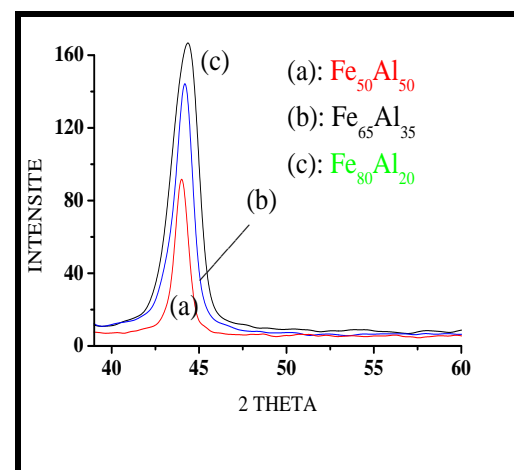


Figure 2: Evolution du pic (110) de diffraction RX des poudres broyées en fonction de la teneur de l'aluminium.

L'élargissement des pics est l'effet de la diminution de la taille des particules, de l'introduction d'une contribution des microdéformations illustrant l'impact du

broyage sur les poudres broyées. Le décalage vers les petits angles se traduit par une augmentation du paramètre de maille cristalline. Cette augmentation de la maille peut être expliquée par la substitution du fer (Le rayon atomique d'Al est plus grand que le rayon atomique du fer). Ce résultat est aussi observé dans les mélanges nanocristallins de FeCr obtenu par broyage à haute énergie [8]. La diminution de l'intensité des pics de la phase riche en Al indique une augmentation des microcontraintes. Nous avons affiné les paramètres cristallins de FeAl (cubique centrée) pour tous les échantillons; l'affinement porte sur les pics de diffraction les mieux définis. Le paramètre cristallin de FeAl augmente passant de 2,8856 Å pour Fe₈₀Al₂₀ à 2,9080 Å pour Fe₅₀Al₅₀. Le paramètre de maille de FeAl augmente au fur et à mesure que la teneur en aluminium augmente jusqu'à la composition stœchiométrique, ce qui est en accord avec les résultats dans la littérature [9, 10, 11]. Cette augmentation est probablement liée à la diffusion des atomes de l'aluminium dans le réseau du fer. Les résultats sont montrés sur la figure 3.

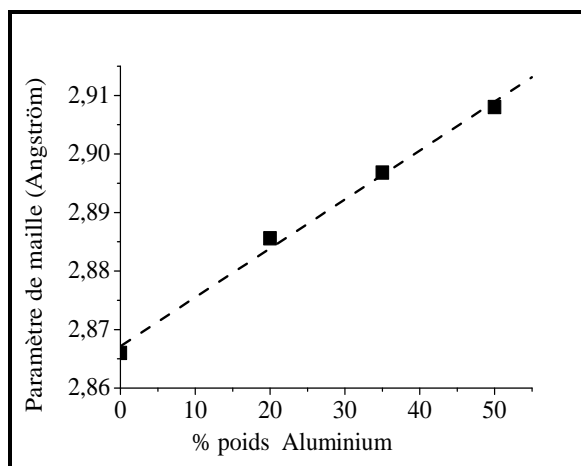


Figure 3 : Evolution du paramètre de maille en fonction du % en aluminium

L'analyse des raies de diffraction permet, à partir de la largeur à mi hauteur des pics de Bragg, la détermination de la taille des grains. La taille de grains moyenne [D] est

calculée avec la formule de Scherrer [12], en négligeant les microdéformations. La taille de cristallites moyenne, est environ 34 nm pour Fe₈₀Al₂₀, 53 pour Fe₆₅Al₃₅ et finalement 58 nm pour Fe₅₀Al₅₀. L'évolution de la taille de grains en fonction de la teneur de l'aluminium est montrée dans la figure 4. Un tel comportement peut être dû à l'introduction de l'aluminium dans la maille du fer, et cela prouve aussi que la nanostructure du composé final est très dépendante de sa composition chimique.

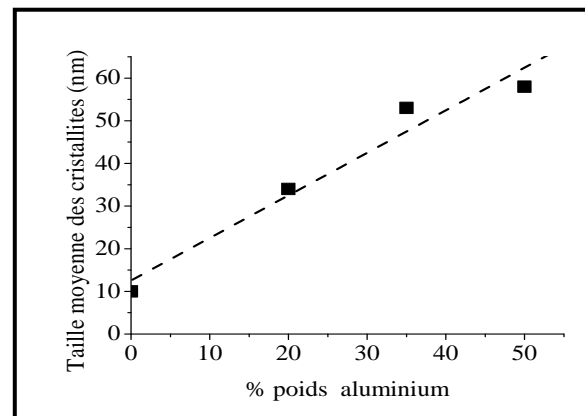


Figure 4: Evolution de la taille des cristallites en fonction du % en Aluminium

3.2 Analyse des observations au microscope électronique à balayage

La morphologie des échantillons Fe_{1-x}Al_x (x=20, 35, 50 %) broyés pendant 7h a été observée par microscopie électronique à balayage. La figure 5 montre la surface des alliages ainsi que le mélange non broyé. Les figures a, b, c et d montrent que l'aspect superficiel a nettement évolué par rapport au produit de départ. Dans la plupart des particules on observe une microstructure lamellaire caractéristique classiquement obtenue lors du broyage des éléments ductiles. La structure lamellaire peut être attribuée à l'interdiffusion des éléments purs ainsi qu'au pourcentage assez important d'aluminium connu par sa structure ductile.

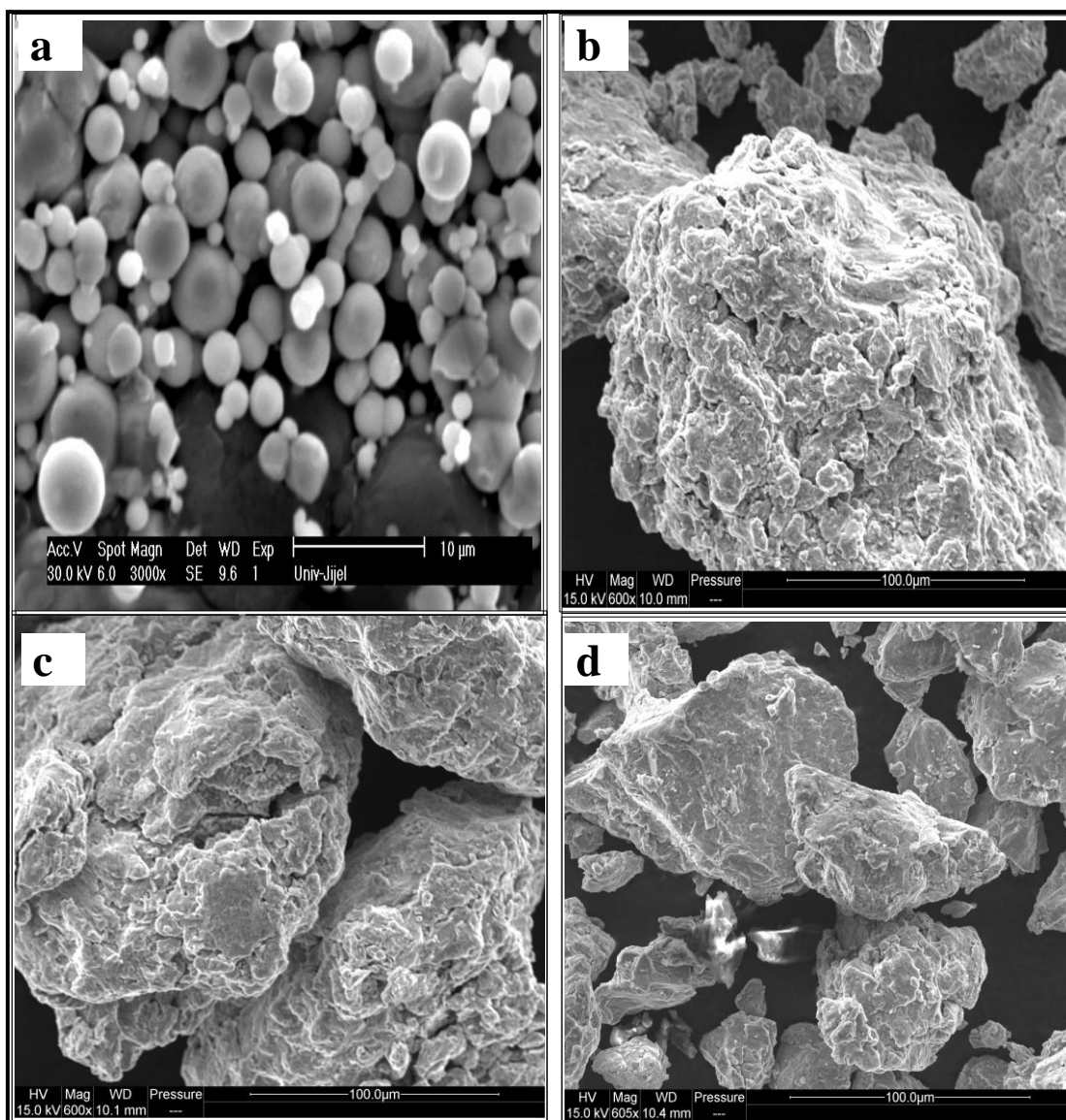


Figure 5 : Micrographie d'un échantillon FeAl : a) FeAl non broyé b) $\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}$, c) $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$ d) $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}$ broyé pendant 7 heures.

3.3 Analyse EDS

Les compositions chimiques théoriques de $\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}$, $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$ et $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}$ broyés pendant 7h ont été vérifiées. Les teneurs réelles en Aluminium et en Fer ont été mesurées par EDS (Energy Dispersive System). Ces résultats sont donnés sur la figure 6 qui illustre le spectre EDS et l'analyse élémentaire correspondante pour les trois échantillons. Le tableau 1

valeurs effectives mesurées par EDS ($\text{Fe}_{49,56}\text{Al}_{50,44}$, $\text{Fe}_{64,64}\text{Al}_{34,36}$, $\text{Fe}_{80,98}\text{Al}_{19,02}$) et les valeurs de composition théoriques visées $\text{Fe}_{50}\text{Al}_{50}$, $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$, $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}$, sont peu différentes. La composition finale est donc représentative des quantités introduites au départ dans le broyeur.

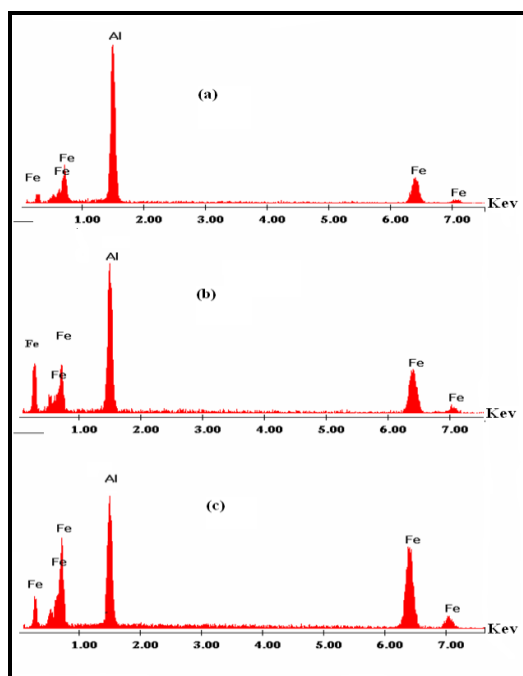


Figure 6: Spectre EDS, a) Fe₅₀Al₅₀, b) Fe₆₅Al₃₅, c) Fe₈₀Al₂₀ Broyées pendant 7h.

Tableau 1 : compositions théoriques et réelles (effective) des poudres FeAl.

Alliages	Fer (% Wt)		Al (% Wt)	
	Théorique	Effective	Théorique	Effective
Fe ₅₀ Al ₅₀	50,00	49,56	50,00	50,44
Fe ₆₅ Al ₃₅	65,00	64,64	35,00	34,36
Fe ₈₀ Al ₂₀	80,00	80,98	20,00	19,02

3. 4 Etude du comportement à l'oxydation

La Figure 7 présente les courbes de prise de masse par unité de surface en fonction du temps pour les trois alliages binaires de Fe₅₀Al₅₀, Fe₆₅Al₃₅, Fe₈₀Al₂₀ à la température 1000 °C. L'analyse de ces courbes a été réalisée en ajustant une loi parabolique complète [13] qui permet de suivre l'évolution de la constante de vitesse parabolique k_p .

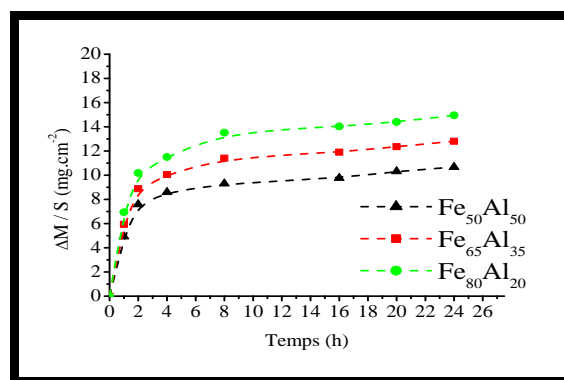


Figure 7 : Variation de la prise de masse en fonction du temps d'oxydation à 1000°C des alliages Fe-Al.

Dans tous les cas, la prise de masse se compose d'une première partie pendant laquelle l'oxydation est plus rapide et d'une deuxième partie pendant laquelle la croissance devient plus lente. La prise de masse observée sur les échantillons après vingt quatre heures d'oxydation diminue avec l'augmentation de la teneur en aluminium. Les valeurs des constantes de vitesse paraboliques k_p ont pu être évaluées à partir des courbes transformées $(\Delta m/S)^2 = f(t)$, par régression linéaire. Pour tous les dépouillements, les coefficients des différentes régressions ont été tous proches de 1. On peut cependant remarquer que l'ensemble des courbes peut se décomposer en deux parties linéaires correspondantes à deux pentes k_{p1} et k_{p2} qui apparaissent caractéristiques. Le tableau 2 donne les valeurs des constantes k_{p1} , k_{p2} pour les trois échantillons que nous avons pu extraire des courbes expérimentales pour chacun des régimes.

Tableau 2: Constantes paraboliques k_p

(mg^2/cm^4s)	k_{p1}	k_{p2}
Fe ₅₀ Al ₅₀	$2.5209 \cdot 10^{-2}$	$2.2475 \cdot 10^{-4}$
Fe ₆₅ Al ₃₅	$2.8774 \cdot 10^{-2}$	$2.8027 \cdot 10^{-4}$
Fe ₈₀ Al ₂₀	$3.2895 \cdot 10^{-2}$	$3.9011 \cdot 10^{-4}$

La vitesse d'oxydation est sensiblement plus rapide pendant les premières heures d'oxydation (Stade I), suivi d'une diminution progressive (Stade II). La croissance initiale la plus rapide (à 1000°C) est probablement due à la formation de γ , θ -Al₂O₃ métastable de transition et la croissance plus lente postérieure due à α -Al₂O₃ [14, 15]. Le ralentissement global du phénomène d'oxydation des poudres Fe₅₀Al₅₀, Fe₆₅Al₃₅, Fe₈₀Al₂₀, ne survient donc que pendant le second stade durant lequel la formation de α -Al₂O₃ plus stable se forme à 1000 °C, après deux heures d'oxydation. La vitesse d'oxydation se stabilise et devient très peu variable. En fait à 1000°C, la couche d'oxyde est composée d'un mélange des oxydes α , γ , θ avec un teneur en alumine α plus important que les oxydes γ , θ à croissance rapide. Les valeurs des constantes de vitesse paraboliques k_p pour les alliages FeAl sont en accord avec des données rapportées précédentes pour la formation des alliages α -l'Al₂O₃ [16]. Après 24 heures d'oxydation, à 1000°C et sous air, la vitesse d'oxydation est plus faible pour les échantillons dont la teneur en aluminium est élevée. La valeur de constante cinétique k_p , est réduite environ d'un cinquième en passant de Fe₈₀Al₂₀ à Fe₅₀Al₅₀. Les données disponibles dans la littérature indiquent que la vitesse d'oxydation diminue avec l'augmentation de la teneur en aluminium pour les compositions variant de 20% à 50% [17]. Les figures 8a, b, c montrent les diagrammes de diffraction RX obtenus pour les échantillons Fe₅₀Al₅₀, Fe₆₅Al₃₅, Fe₈₀Al₂₀ oxydées pendant 24 heures sous air à 1000°C.

L'identification des phases des poudres oxydées révèle la présence d'un mélange d'oxydes d'alumine métastables et stable : α Al₂O₃ (Fiche CPDS N° 00-002-1373), θ Al₂O₃ (Fiche CPDS N° 00-0110517), γ Al₂O₃ (Fiche CPDS N° 00-002-1420), FeAl (Fiche JCPDS N° 00-033-0020). De plus, au regard de l'évolution des raies correspondant aux oxydes d'aluminium, il semble que α -Al₂O₃ soit la phase majoritaire dans la couche d'oxyde et ce quel que soit l'échantillon.

Même si les mêmes oxydes sont présents dans la couche d'oxyde formée sur les poudres de FeAl, il faut remarquer que les intensités diffractées sont plus intenses quand la teneur en aluminium augmente mais les intensités caractéristiques de FeAl diminuent. L'épaisseur de la couche d'oxyde étant plus importante lorsque la teneur en aluminium augmente ralentissant ainsi le processus d'oxydation. En conclusion, bien que la réaction possible pour FeAl binaire à températures élevées implique l'aluminium et le fer pour produire les oxydes correspondants, l'aluminium sera préférentiellement oxydé pour former une couche extérieure d'alumine.

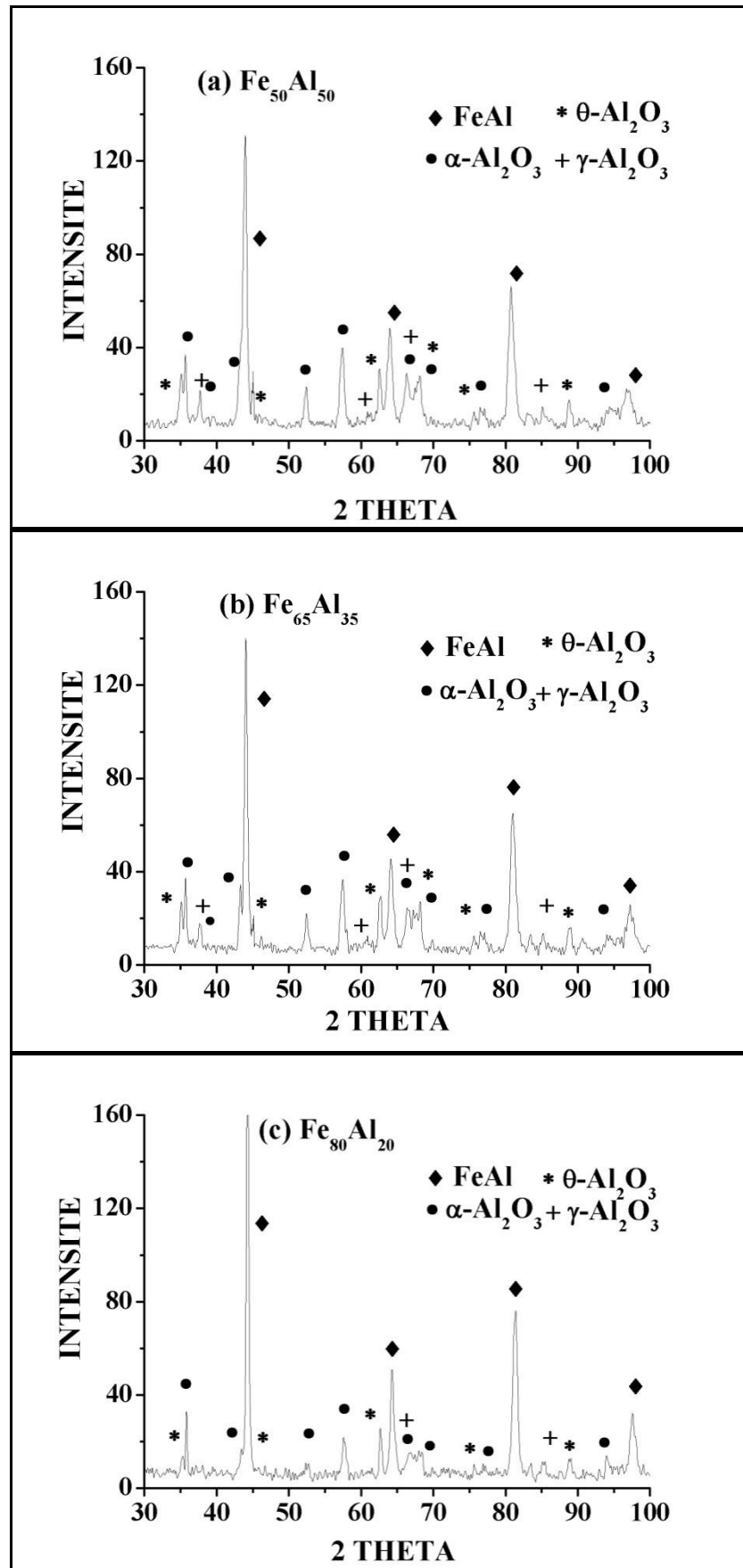


Figure 8: Diagramme de diffraction RX des poudres FeAl oxydées pendant 24 heures sous air à 1000°C. a) Fe₅₀Al₅₀, b) Fe₆₅Al₃₅, c) Fe₈₀Al₂₀.

4. CONCLUSION

Les diffractogrammes RX obtenus sur l'échantillon de FeAl broyé ont permis de montrer la formation d'une phase homogène FeAl cristalline après 7h et cela quelque soit la composition du mélange initial. Le paramètre de maille de FeAl augmente à mesure que la teneur en aluminium augmente jusqu'à la composition stœchiométrique. La taille des cristallites augmente légèrement avec la teneur en aluminium. La morphologie des poudres nanostructurées peut être décrite par une assemblée de grains nanocristallins orientés aléatoirement de structure lamellaire. Les poudres nanostructurées sont ainsi constituées de grains cristallisés pseudo sphérique dont la taille augmente avec la teneur de Al. Les courbes $\Delta m/S$ obtenues lors de l'oxydation des échantillons FeAl, à la température 1000°C sur air de laboratoire sous pression atmosphérique ont montré que la loi parabolique permettait de rendre compte des cinétiques expérimentales. La vitesse d'oxydation était sensiblement plus rapide pendant la première heure (l'étape I), suivi d'une diminution progressive jusqu'à une constante plus lente (étape II) pour tous les échantillons. A 1000°C, la croissance plus rapide initiale est probablement due à la formation de γ , θ -Al₂O₃ métastable de transition et la croissance plus lente postérieure due à α -Al₂O₃ plus stable, ce résultat est rapporté par [9, 10]. Il est clairement établi que le taux d'oxydation diminue avec l'augmentation de la teneur en aluminium, pour l'oxydation initiale et régulière d'étape. L'étude des spectres de diffraction RX confirme la présence des alumines métastables mais aussi d'alumine α dans tous les alliages oxydés dont la teneur est plus importante que les autres oxydes à croissance rapide.

REFERENCES

[1] Morris D.G. & Günter S., 1996. Strength and ductility of Fe-40Al alloy prepared by mechanical alloying. *Mat. Sci. and Eng.*, Vol. A 208, 7-19

[2] Morris D.G., Chao J., Oca C.G. & Muñoz-Morris M.A., 2003. Obtaining good ductility in a FeAl intermetallic, *Mat. Sci. Eng.*, Vol. A 339, 232-240.

[3] Koch C.C., Carin O.B., Mc Kamey C.G. & Scarbrogh J.O., 1983. Preparation of amorphous Ni₆₀Nb₄₀ by mechanical alloying, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 43, 1017-1019

[4] Shingu P.H., 1992. Mechanical alloying, *Mater. Sci. Forum*, Vol. 4, 88-89

[5] Mc Kamey C.G., Divan J.H., Tortorelli P.F. & Sikka V.K., 1991. A Review of Recent, Developments in Iron-Aluminium Alloys, *J. Mater. Res.*, Vol. 6, 1779-1805

[6] Bastow B.D., Wood G.C. & Whittle D.P., 1981. Morphologies of uniform adherent scales on binary alloys, *Oxid. Met.*, Vol 16, 1-28

[7] La microscopie électronique à balayage, 2004. Documentation du Centre d'analyse, Université de la Rochelle (France), Vol 2, 102-135

[8] Eckert J., Holzer J.C., Krill C.E., & Johnson W.L., 1993. Mechanically driven alloying and grain size changes in nanocrystalline Fe-Cu powders, *J. Appl. Phys.*, Vol 73, 2794-802.

[9] Khan A. S., Suh Y. S., Xu C., Laszlo T. & Haoyue Z. 2006. Nanocrystalline aluminum and iron: mechanical behavior at quasi-static and high strain rates, and constitutive modeling, *Int. J. Plasticity*, Vol 22, 195-209.

[10] Mendiratta M. G. & Law C. C., 1987. Dislocation energies and nobilities in B [2]-ordered Fe-Al alloys (Energies et mobilités de dislocations dans les alliages Fe-Al ordonnés B2, *J. Mater Sci.*, Vol 22, 607-611.

Etude et réalisation de capteurs de gaz à base de silicium poreux

Nassera Ghellai¹, Anisse Chiali¹, Nasr Eddine Chabane-Sari¹,
& Noureddine Gabouze²

¹Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (U.R.M.E.R).
Université Abou –Baker Belkaid B.p : 119 Tlemcen 13000 Algérie.

²Unité de Développement de la Technologie Du Silicium. UDTs, BP 399, Alger, Algérie.

Accepté le : 08/06/2011

ملخص

لقد أصبح الاهتمام المتزايد في الوقاية من التلوث البيئي في السنوات الأخيرة عاملاً رئيسياً في تطوير أي صناعة، وخاصة التي من المواد المستخدمة على نطاق واسع في مجال الإلكترونيات الدقيقة. وفي هذا السياق، قد جذبت اهتماماً كبيراً مسامية السيليكون كمادة تطبيقها على الكشف بسبب حساسية عالية من سطحها الداخلي إلى وجود الغاز والرطوبة. في عملنا، ونحن نقترح على رصد التغيرات في الخصائص الكهربائية من أجهزة الاستشعار على أساس السيليكون التي يسهل اختراقها، والناجمة عن المواد الكيميائية الغازية. وقد تم دراسة الخصائص الكهربائية العديد من بنيتنا للتحقق من القاعدة المعروفة "اس" ستة: الحساسية (الحساسية)، والانتقائية (الانتقائية)، والاستجابة السريعة (سرعة الاستجابة)، والاستقرار (الاستقرار)، والحجم / الشكل (حجم / الشكل) والتكلفة (\$) / التكلفة. وتظهر النتائج أن التيار الجهد والسعة الجهد معدلة من الاستجابة من الغاز على السطح من أجهزة الاستشعار لدينا وهذا لغازات مختلفة وتركيزات مختلفة. وبالإضافة إلى ذلك، فقد بينت النتائج أن التغيرات التوصيل مرتبطة بطبيعة الغاز.

الكلمات المفتاحية: السيليكون المسامية، لكاشف، الغاز، الخصائص الكهربائية

Résumé :

L'intérêt croissant pour la prévention de la pollution de l'environnement est devenu ces dernières années un facteur clé dans le développement de toute industrie, en particulier celle des matériaux largement utilisés en microélectronique. Dans ce cadre, le silicium poreux a suscité une grande attention comme matériau appliqué à la détection en raison de la haute sensibilité de sa surface interne à la présence de gaz et d'humidité. Dans notre travail, on se propose de contrôler les variations des propriétés électriques des capteurs à base de silicium poreux, causées par des substances chimiques gazeuses. Plusieurs caractéristiques électriques de notre structure ont été étudiées afin de vérifier la règle connue des six « S » : Sensibilité (sensitivity); sélectivité (selectivity), réponse rapide (speed of réponse), stabilité (stability), la taille/la forme (size/shape) et le coût (\$/cost.). Les résultats montrent que les caractéristiques courant-tension et capacité-tension sont modifiées par la réactivité du gaz sur la surface de notre capteur et ceci pour différents gaz et différentes concentrations. En outre, les résultats montrent que la conduction change selon la nature du gaz.

Mot clés : Silicium Poreux - Détecteur - Gaz - Caractéristiques Electriques

Abstract:

The growing interest in the environmental pollution prevention in recent years has become a key factor in the development of any industry, in particular that dealing with the materials widely used in microelectronics. In this context, porous silicon has attracted considerable attention as a material applied to the detection because of the high sensitivity of its inner surface to the presence of gas and moisture. In our work, we propose to control the variations of the electrical properties of sensors based on porous silicon, caused by gas. Several electrical characteristics of our structure have been studied to verify the known rule of six "S": Sensitivity, selectivity, stability, the size / shape and cost. The results show that the characteristics current-voltage and capacitance-voltage are modified by the reactivity of gas on the surface of our sensor and this for various gases and various concentrations. Moreover, the results show that conduction changes according to the nature of gas.

Key words: Porous silicon - Detector - Gas - Electrical characteristics.

Auteur correspondant : na_ghellai@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'intérêt grandissant pour le silicium poreux (SiP) est porté par l'essor de l'électronique moderne sur silicium. Depuis sa découverte par Uhler [1], son champ d'application s'est fortement élargi. Ce matériau, à la morphologie spongieuse et nanostructurée, issu de la gravure du silicium monocristallin, suscite beaucoup d'intérêts. Il est constitué d'un mélange de silicium et de vide. Le diamètre des pores et l'épaisseur du silicium entre les pores peuvent varier de quelques dizaines d'angströms à quelques microns. De sa nature, le (SiP) présente une grande surface spécifique, ce qui le rend plus réactif que le silicium massif. La difficulté et en même temps la clé de l'application est la modification et le contrôle chimique de la surface de ce matériau. Bien que ce dernier soit utilisé dans la détection de gaz depuis peu de temps. Ses propriétés utiles en détection sont sa grande surface spécifique et son coût concurrentiel.

Plusieurs articles dans la littérature sont apparus concernant les propriétés de détection de gaz, par des dispositifs à base de (SiP) [2, 3, 4, 5, 6]. Plusieurs d'entre eux proposent de s'intéresser aux variations des propriétés électriques du (SiP) causées par la présence de substances gazeuses [7]. D'autres par contre impliquent les propriétés optiques de ce matériau pour la détection de gaz, en incluant les variations de la réflectivité [8], la photoluminescence [9,10] et les guides d'ondes optiques [11].

Notre travail porte sur l'étude et la réalisation de capteurs de gaz à base de silicium poreux. Nous étudions les caractéristiques électriques, à savoir courant - tension et capacité- tension, ainsi que le temps de réponse de ces capteurs, mesurés dans différents environnements gazeux.

2. PROCEDURES EXPERIMENTALES.

2.1 Préparation des capteurs de structure « Al/SiP/p-Si »

Les couches de SiP ont été réalisées à partir de plaquettes de Si monocristallin de type p, d'orientation (100). Ces plaquettes ont une épaisseur voisine de 400 μm . La résistivité est de 1 Ωcm . La couche de SiP est formée par anodisation dans une cellule électrochimique, dans une solution HF/éthanol 50/50, sous différentes densités de courant et à des durées variables. L'électrolyte est constitué en proportions égales d'acide fluorhydrique et d'éthanol. La densité de courant et le temps d'anodisation ont été variés de façon à obtenir une porosité de 40 à 80% et une épaisseur de 1 à 15 μm . Les capteurs réalisés sont de 4 x 4 mm^2 (Fig. 1). Un contact métallique a été réalisé par un dépôt d'aluminium pur (99.99%) par pulvérisation métallique sur les bordures de l'échantillon de dimension 250 μm .

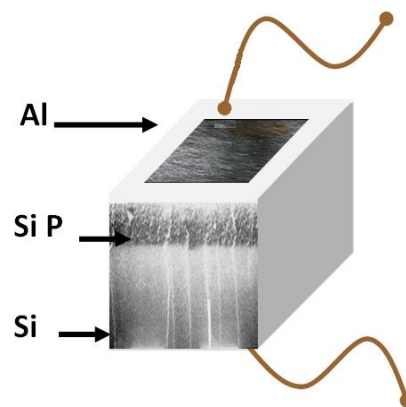


Figure 1. Schéma de la structure du capteur « Al/SiP/p-Si ».

Nous avons utilisé le dispositif de manipulation et de détection de gaz représenté sur la figure 2. Dans ce dispositif, le contrôle de la pression et de la température des détecteurs permet d'étudier l'influence de l'environnement sur le comportement des capteurs.

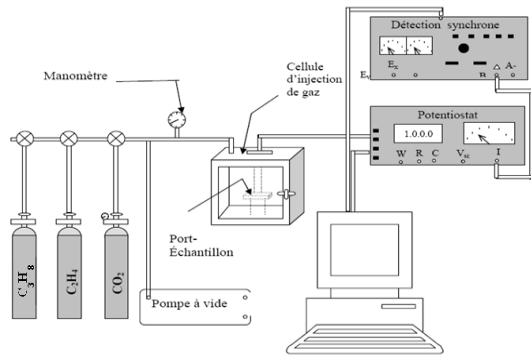


Figure 2. Dispositif de la manipulation de capteur de gaz.

Les caractérisations électriques courant-tension $I(V)$ et capacité-tension $C(V)$, ont été mesurées dans l’environnement propane, à l’aide d’un potentiostat et d’une détection synchrone et également d’un EG&G model 410 C-V (Plotter impedance meter) pour la mesure des petites capacités. Dans notre travail, nous nous intéressons au changement des propriétés électriques du SiP lors de l’introduction d’un gaz.

2.2. Réponses des capteurs de structure « Al/SiP/p-Si »

Plusieurs caractérisations courant tension $I(V)$ ont été mesurées, dans l’environnement gazeux pour évaluer la réponse et la sensibilité de notre structure « Al/SiP/p-Si ». La mesure du courant a été prise de $-2V$ à $+5V$. Le changement de l’allure de la courbe $I(V)$ de nos diodes sous vide par rapport à celles obtenues dans une atmosphère d’un gaz connu nous permet de déduire qu’il y a réellement détection de ce gaz. Le mécanisme de la réponse $I(V)$ (Fig. 3) peut être expliqué par la propriété de transport électrique dans la structure de diode Al/SiP/p-Si et par la réaction de transfert de charge qui se produit durant l’adsorption.

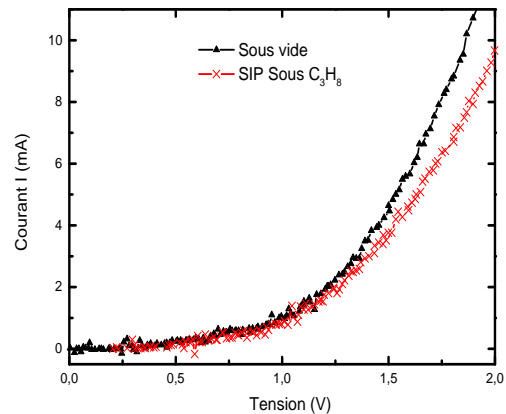


Figure 3 : Caractéristique courant- tension d’une structure Al/SiP/p-Si pour le gaz propane à 500 ppm (SiP : Polarisé sous : $J = 20 \text{ mA/cm}^2$ pendant $t = 5 \text{ min}$)

Nous avons calculé $\Delta I (I \text{ vide} - I \text{ gaz})$ en fonction de la polarisation pour le propane. Pour une tension de 1,75 V, nous avons une variation de courant: $\Delta I = 1,82 \text{ mA}$. La variation obtenue est importante de l’ordre du mA si on la compare aux variations obtenues dans la littérature [12, 13] qui étaient de l’ordre du micro et du nano ampère. L’exposition de la structure aux gaz n’a pas d’incidence sur l’allure de la caractéristique $I(V)$ mais seulement sur la magnitude du courant à une tension fixe. Ce qui est important, c’est qu’une fois que le gaz est dégagé de la cellule, le courant récupère rapidement sa valeur initiale. La figure suivante, montre la sensibilité du capteur en fonction de la tension V , pour le gaz propane à une pression de 500 ppm. On observe que pour de faibles tensions de polarisation, on a une grande sensibilité.

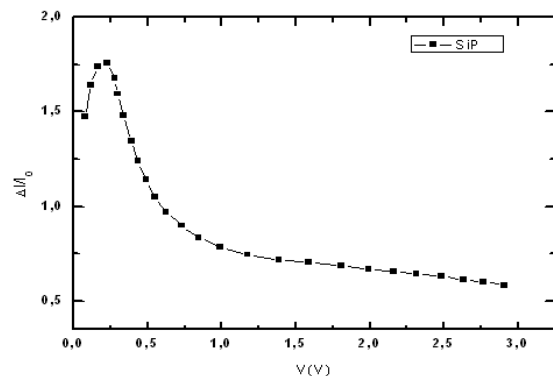


Figure 4 : Sensibilité du capteur de structure Al/SiP/p-Si pour le gaz propane à 500ppm.

La sensibilité maximale est notée à la tension de 0,23 V (Fig. 4). Ces résultats indiquent que le capteur peut fonctionner à de faibles tensions de polarisation.

La surface du SiP est très réactive du fait de la présence d'une liaison non saturée sur chaque atome silicium. Ce sont les liaisons pendantes (dangling bonds, Si-H). Elles réagissent avec les molécules du gaz introduit [14, 15]. Ces molécules s'adsorbent. La stabilité du silicium poreux étant le paramètre le plus difficile à contrôler, on a opté pour une nouvelle approche de détecteur de gaz qui consiste à déposer un hydrocarbure CH_x à la surface de ce dernier. Le SiP est recouvert d'une couche CH_x déposée par plasma de méthane créé dans un réacteur triode à RF 13.5 MHz, synchronisé sous atmosphère d'argon sur la surface du SiP [16]. Nous avons réalisé un capteur de gaz de structure «AL/ CH_x /SiP/p-Si» qui a répondu à plusieurs gaz. La figure 5 représente la vue de plan révélée par le microscope électronique de notre structure CH_x/SiP .

Les taches en blanc représentent la couche hydrocarbonée (CH_3 et CH_2) à l'échelle microscopique. La partie sombre représente la surface de notre couche nanoporeuse. Cette vue confirme l'aspect granulaire de notre couche CH_x .

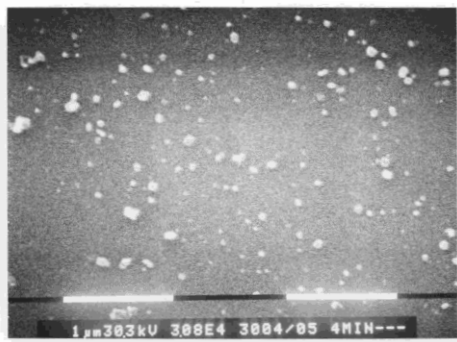


Figure 5. Vue de plan de la structure CH_x/SiP par MEB.

2.3 Réponses des capteurs de structure «AL/ CH_x /SiP/p-Si.

Le dispositif de détection basé sur la structure « $\text{CH}_x/\text{SiP}/\text{Si}$ » montre un bon comportement redresseur. Cette propriété, corrélée avec la sensibilité du silicium poreux aux différents environnements gazeux, a été employée pour fabriquer des diodes hétérojonction dont les caractérisations courant-tension et capacité-tension ont été modifiées par la réactivité du gaz sur la surface poreuse. Les travaux menés par Gabouze et son équipe [17, 18] ont révélé la sélectivité de ce capteur face à trois gaz de la même famille : l'éthane, le propane et l'éthylène (Fig. 6).

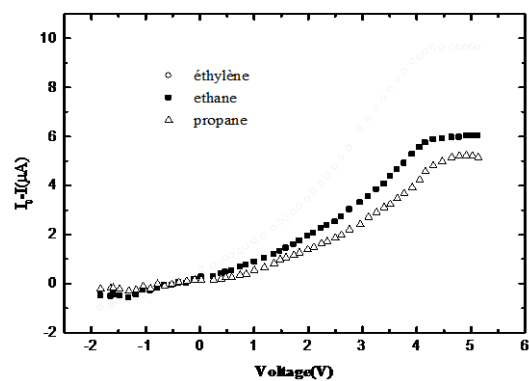


Figure 6. Variation du courant en fonction de la tension de polarisation pour trois gaz différents [19].

Nous constatons que pour chaque gaz, nous obtenons une variation propre à ce dernier. Par exemple, pour l'éthane nous avons une variation du courant de l'ordre de $1.03213 \mu\text{A}$ à la tension de 1.25 V. Pour les trois gaz, la variation du courant augmente avec la polarisation. Pour des potentiels supérieurs à 4V, nous notons la saturation.

Dans les travaux réalisés par Gabouze [19], le capteur a été exposé à différentes pressions d'oxygène. Aucune variation de courant n'a été signalée pour une tension fixe. Ce qui signifie que ce capteur n'est pas sensible à l'oxygène.

L'interaction de l'oxygène avec le silicium poreux relève d'une grande importance dans l'étude des capteurs de gaz, étant donné que les capteurs sont exposés à l'air libre. La figure 7 représente la caractérisation $I(V)$ du capteur sous une pression de 1495 ppm.

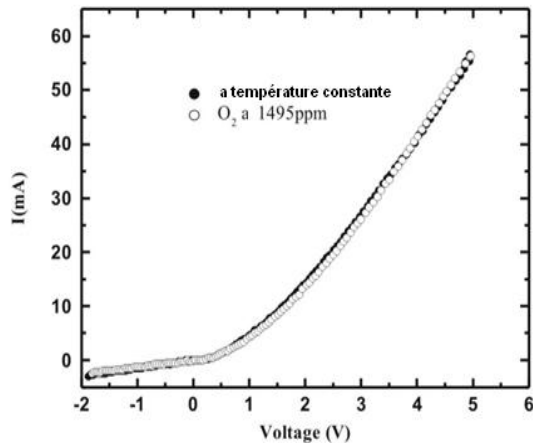


Figure 7. Caractérisation $I(V)$ de la structure $CH_x/PS/p-Si$, sous gaz O_2 [19].

L'oxygène de l'environnement ne modifie pas les paramètres de mesure et explique la haute stabilité de la surface CH_x/PS . L'amélioration des performances des capteurs par l'ajout de métaux nobles s'est surtout développée dans les années 80. En tête des métaux utilisés, viennent le palladium et le platine. Dans notre travail, nous avons opté pour le dépôt d'une couche mince de palladium de 10 à 15 nm sur la surface de la structure $CH_x/SiP/p-Si$ par la méthode de pulvérisation à vide à la pression de 1.10^{-6} Torr. La figure 8 montre la vue de plan de notre capteur de structure « $Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si$ » révélée par le microscope électronique.

La photo du MEB de la surface de notre structure confirme l'aspect granulaire de notre fine couche de palladium au niveau microscopique (Fig. 8). Les taches claires représentent les particules de palladium, la partie sombre représente la surface poreuse. Au niveau microscopique notre couche de palladium peut être représentée par une couche poreuse.

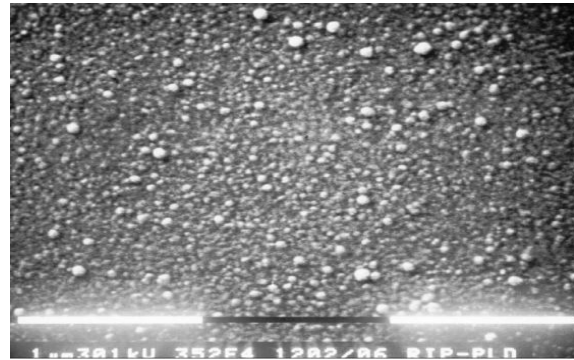


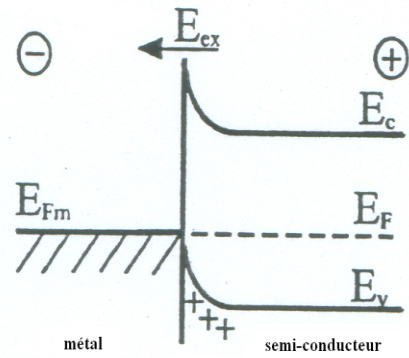
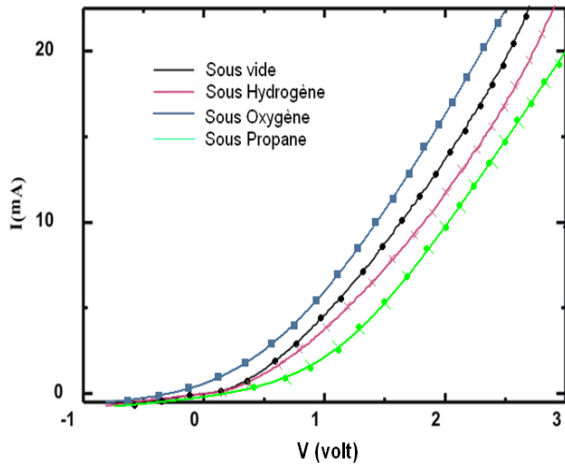
Figure 8. Photo de la surface de la structure « $Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si$ » MEB.

2.4. Réponses des capteurs de structures « $Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si$ »

Nous constatons que la sensibilité dépend de la nature du gaz détecté, ainsi que du potentiel appliqué (Fig. 9). En effet, elle croît puis décroît. Le maximum de la sensibilité pour le propane est obtenu à 0,13 V, pour l'oxygène à 0,08 V et 0,066V pour l'hydrogène (Fig. 10). Il est important de signaler que le capteur atteint le maximum de sensibilité à de faibles tensions dans un domaine qui varie de 1 à 30mV, ce qui démontre sa faible consommation électrique.

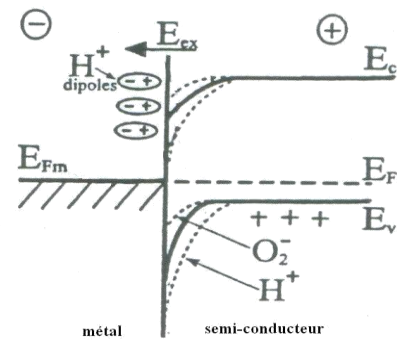
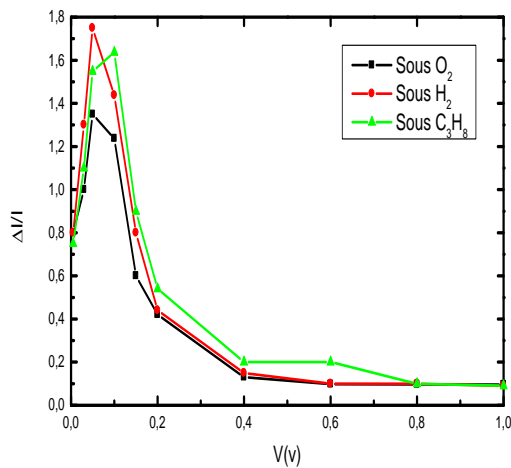
Une des explications pour la détection d' O_2 et H_2 est que la molécule est rapidement cassée donnant des atomes de H et O grâce aux propriétés catalysantes de la couche Pd. Les atomes d'hydrogène pénètrent dans la couche avec un grand coefficient de diffusion et forment un dipôle causant un accroissement de la hauteur de la barrière de la bande d'énergie à l'interface métal- $CH_x PS$ (Fig. 11).

Par contre, l'adsorption du gaz O_2 réduit la hauteur de la barrière d'énergie, ceci est dû à la formation des ions O^{2-} et O^- .



(a)

Figure 9. Caractéristique courant tension de la diode sous oxygène, Hydrogène, propane. Diode D : Polarisée sous : $J = 20 \text{ mA/cm}^2$ pendant $t = 2 \text{ min}$ et la couche CHx déposée dans les conditions : Temps de dépôt : 6 min ; pression : 2.10^{-3} Torr ; $P_i=200 \text{ W}$. Epaisseur de la couche de Pd est de 10 nm .



(b)

Figure 11. Diagramme d'énergie : (a) Avant introduction du gaz (b) Après introduction du gaz

Figure 10. Sensibilité de la diode D sous hydrogène, oxygène et propane en fonction de la polarisation.

3. CONCLUSION

Les premiers capteurs réalisés de structure « Al /SiP/p-Si » nous ont révélé que réellement le silicium poreux est un candidat potentiel pour la détection de gaz. La difficulté et en même temps la clé de l'application du silicium poreux dans le domaine des capteurs, est la modification et le contrôle chimique de la surface de ce matériau. Nos caractéristiques électriques se dégradent lors de l'exposition à l'air de nos structures « Al/SiP/p-Si ». Pour protéger la couche poreuse d'un vieillissement rapide, nous avons déposé une couche CH_x à la surface des couches SiP. Nous avons exposé nos capteurs de gaz réalisés de structure « Al/CH_x/SiP/p-Si » à divers gaz (exemple le propane). Leurs caractéristiques électriques courant – tension et capacité – tension, ont montré une grande sensibilité aux gaz, une stabilité et une sélectivité.

Ces résultats indiquent que dans nos mesures expérimentales l'oxygène de l'environnement ne modifie pas les paramètres de mesure et explique la haute stabilité de la surface CH_x/SiP. Il a été démontré que cette structure peut être utilisée pour la détection de grande concentration de gaz pour une large variété de gaz comme le propane, l'éthylène et d'éthane. En exposant notre capteur à l'oxygène, on n'observe aucune réponse électrique pour ce gaz. Dans notre travail un intérêt particulier est porté à la détection de l'oxygène. Pour cela nous avons opté pour une nouvelle structure, en déposant une fine couche de palladium de l'ordre de 10 à 15 nm sur la couche CH_x. Ainsi, nous avons réalisé un capteur d'oxygène de structure « Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si ». Les résultats de notre étude sur le comportement du capteur de structure « Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si » exposé à un environnement d'oxygène révèlent un accroissement réversible de la conductance de notre dispositif. Un maximum de la sensibilité est obtenu à basse tension.

En conclusion, nous avons remarqué que la couche de palladium améliore nettement la réponse de ce capteur face à l'hydrogène et au propane. Cependant, plusieurs travaux sont nécessaires à différentes concentrations afin de déterminer le mécanisme de la réponse du capteur de structure « Al/Pd/CH_x/SiP/p-Si » face aux gaz.

REFERENCES

- [1] Uhlir A., 1956. Electronics shopping of germanium and silicon, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 35, 333.
- [2] Quercia L. *et al*, 2000. Fabrication and characterization of a sensing device based on porous silicon. *Phys. stat. sol. (a)* Vol. 182, 473.
- [3] Ting Gao, Jun Gao, 2002. Tuning the response and stability of thin meso-porous silicon vapour sensor by modification, University California San Diego, *Langmuir*, Vol. 18 (25), 9953–9957
- [4] Mulloni V., Gaburro Z., Pavesi L., 2000. Porous silicon microcavities as optical and chemical sensors, *Phys. stat. sol. (a)* Vol. 182, 497- 484.
- [5] Parbukov A.N., Beklemyshev V.I., Gontar V.M., Makhonin I.I., S.A., Gavrilov S.C. Bayliss, 2001. The production of novel stain-etched porous silicon, metallization of the porous surface and application in hydrocarbon sensors, *Materials Science and Engineering C15*, 121–123.
- [6] Seals L., Gole J.L., 2001. Rapid, reversible, sensitive porous silicon gas sensor, *Journal of Applied physic* Vol. 91, 2519-2523.

- [7] Rothschild A., Edelman F., Komem Y, 2000. Cosandey F., Sensing behaviour of TiO₂ thin films exposed to air at low temperatures, *Sensors and Actuators B* Vol. 67, p. 282-289.
- [8] Lee D.D, Choi D.H., 1990. Thick-film Hydrocarbon Gas Sensors, *Sensors and Actuators B*, 231-235.
- [9] Moseley P., Williams D.E., 1990, A Selective Amonia Sensor, *Sensors and Actuators B*, p.113-115.
- [10] Jayaraman V., Gnanasekar K.I., Prabhu E., Gnanasekaran T., Perias wami G., 1999. Preparation and characterisation of Cr_{2-x}TixO₃ and its sensor properties, *Sensors and Actuators B*, Vol.55, 175-179.
- [11] Manno D., Serra A., Di Giulio M., Micocci G., Tepore A., 1998. Physical and structural characterization of tungsten oxide thin films for NO gas detection, *Thin Solid Film*, Vol. 324, 44-51.
- [12] Mares J. J., Kristofik J., Hulicius E., 1995. Influence of humidity on transport in porous silicon, *Thin Solid Films* Vol. 255, 272-275.
- [13] O'Halloran G.M., Kuhl M., Trimp P.J., French P.J., 1997. The effect of additives on the absorption properties of porous silicon, *Sensors and Actuators A* Vol. 61, 415-420.
- [14] Stievenard D., Deresmes D., 1995. Are electrical properties of an aluminiumporous silicon junction governed by dangling bonds, *Appl. Phys. Lett.* ,Vol. 67(11). 1570-1572.
- [15] Foucaran A., Pascal-Delannoy F., Giani A., Sackada A., Combette P., Boyer A.,1997. Porous silicon layers used for gas sensor applications, *Thin Solid Films* Vol. 297, 317 -320.
- [16] Cerda J., Cirera A., Vila A., Cornet A., Morante J.R. , 2001. Deposition on micromachined silicon substrates of gas sensitive layers obtained by a wetchemical route: a CO/CH₄ high performance sensor, *Thin Solid Films* Vol. 391, 265-269.
- [17] Gabouze N., Belhousse S., Cheraga H., 2003. CH_x-Porous silicon-p-Si structure for gas sensor application, *Phys. Stat. Sol. (c)* 2, Vol. 9, 3449-3452.
- [18] Belhousse S., Gabouze N., Cheraga H., Henda K., 2005. CH_x/ PS/Si as a structure for propane sensing, *Thin Solid Films*.Vol. 482. 253-257.
- [19] Gabouze N., Belhousse S., Cheraga H., Ghellai N., Ouadah Y., Belkacen Y., Keffous A., 2006. CO₂ and H₂ detection with CH_x/ porous silicon-based sensor, *Vacuum* Vol. 80, 986 989.

Effet *in vitro* du glucose sur le fibroblaste adventitial aortique de *Psammomys obesus*

Billel Chaouad ¹, Fouzia Zerrouk ¹, Adel Ghoul ¹, Khira Othmani-Mecif ¹, Hamid Sahraoui ²,
Samia Neggazi ², Souhila Aouichat-Bouguerra ², & Yasmina Benazzoug ¹

1. Biochimie et remodelage de la matrice extracellulaire. Laboratoire Biologie Cellulaire et Moléculaire. Faculté des Sciences Biologiques. USTHB BP 32 El Alia. Bab Ezzouar. 16111. Alger Algérie.

2. Physiopathologie Cellulaire et Moléculaire. Laboratoire Biologie et Physiologie des Organismes. Faculté des Sciences Biologiques. USTHB. BP 32 Bab Ezzouar. El Alia. 16111. Alger. Algérie.

Accepté le : 11/07/2011

ملخص

يعتبر مرض تصلب الشرايين المسبب الرئيسي للوفيات في الدول المتقدمة و هو في حالة تطور مستمر في الدول النامية. عدة أبحاث عيادية و وبائية أجريت تبين أن ارتفاع في نسبة الجلوكوز مرتبط بهذا المرض. تقنيات الزراعة الخلوية سمحت لنا بدراسة مفعول الجلوكوز (15mM/l) على تكاثر عدد الخلايا وعلى بعض المعالم الخلوية لدى خلية النسيج الضام (fibroblaste) المتواجدة على مستوى الغشاء الخارجي للشرايين الأبهري لدى جرد الرمال الذي يعد من أحسن الحيوانات دراستا لأمراض القلب و الشرايين. الزراعة الخلوية تبين ارتفاع كبير في تكاثر خلايا النسيج الضام المعالجة بالجلوكوز، ارتفاع في طول المحور الأصغر الخلوي و طول المحور الأصغر و الأكبر النووي إضافة إلى ارتفاع في عدد النويات.

الكلمات المفتاحية : تصلب الشرايين - جلوكوز - خلية النسيج الضام - جدار شرايين - جرد الرمال.

Résumé

L'athérosclérose est la principale cause de décès dans les pays occidentaux et apparaît en nette progression dans les pays en voie de développement. Plusieurs études cliniques et épidémiologiques ont montré que le diabète est associé à cette maladie et pourrait donc représenter un facteur de risque. Nous avons analysé l'effet du glucose à forte concentration (15 mM) sur des fibroblastes adventitiels aortiques en culture à un passage précoce (P6) chez *Psammomys obesus*, excellent modèle pour l'étude des maladies cardio-vasculaires. Cette étude *in vitro* a concerné la prolifération cellulaire ainsi que quelques paramètres cellulaires et nucléaires. Cette étude met en évidence une augmentation significative de la prolifération des fibroblastes adventitiels incubés en présence d'un milieu enrichi en glucose ainsi qu'une augmentation de leur diamètre, de leurs grands et petits axes nucléaires et du nombre de nucléoles.

Mots clés : Athérosclérose - Fibroblaste adventitial - Glucose - Paroi artérielle - *Psammomys obesus*.

Abstract

The atherosclerosis is the principal cause of death in the Western countries and appears in clear progression in the developing countries in the process of development. Different clinical and epidemiologic studies showed that the diabetes is associated to disease and could thus represent a factor of risk. We analyzed the effect of glucose with strong concentration (15 mM) on aortic adventitial fibroblasts in culture with an early passage (P 6) at *Psammomys obesus*, excellent model for the study of the cardiovascular diseases. This *in vitro* study was related to the cellular proliferation along with some cellular and nuclear parameters of these cells. This study highlights a significant increase in the proliferation of the adventitial fibroblasts incubated in the presence of a medium enriched in glucose as well as an increase by their diameter, their large and small nuclear axes and number of nucleolus.

Key words: Atherosclerosis - adventitial Fibroblast - Glucose - arterial Wall - *Psammomys obesus*.

Auteur correspondant : ybenaz01@hotmail.com ; ybenazzoug@usthb.dz

1. INTRODUCTION

L'athérosclérose est la principale cause de décès dans les pays occidentaux et apparaît en nette progression dans les pays en voie de développement [1]. Cette maladie est associée à plusieurs facteurs dont l'hypercholestérolémie, l'hypothyroïdie, l'hyperhomocystéinémie, l'hypertension artérielle, le tabagisme, l'obésité... Outre ces facteurs, de nombreuses études ont montré l'implication du diabète comme un facteur de risque. D'autre part, des travaux récents ont signalé l'implication des fibroblastes de l'adventice vasculaire dans le développement du processus de l'athérosclérose, les fibroblastes adventitiels sont activés rapidement en réponse à une variété de stimuli physiopathologiques par une augmentation de la production des ROS [2]. En effet, Un changement des concentrations extra- et intracellulaires de ROS peut avoir des effets aigus et chroniques sur la fonction vasculaire [3]. L'activation de fibroblastes adventitiels induit d'une part l'expression des protéines contractiles spécifiques des CMLs responsables de la modulation des fibroblastes en myofibroblastes [4] et d'autre part la prolifération et la migration de ces cellules vers la néo-intima où elles participent à son épaississement [5]. Ainsi, l'adventice est le siège d'une fibrose et d'une expression accrue des métalloproteinases matricielles et de leurs inhibiteurs après des dommages vasculaires [6]. Dans un précédent travail, nous avons mis en évidence des altérations de la structure de l'adventice aortique et en particulier des fibroblastes en réponse à une hyperhomocystéinémie. Cette dernière est considérée comme facteur de risque des maladies cardiovasculaires.

Toutes ces importances fonctionnelles des fibroblastes adventitiels dans les maladies cardiovasculaires expliquent l'intérêt que nous portons à étudier l'effet du glucose à la concentration de 15mM sur ces fibroblastes provenant de la paroi aortique du rat des sables, *Psammomys obesus*,

excellent modèle d'étude du diabète et des complications micro-angiopathiques [7]. Nous avons effectué une étude de la prolifération des fibroblastes adventitiels en culture secondaire à un passage précoce (6^{ème} passage ou P6) et une étude morphométrique pour certains paramètres fibroblastiques.

2. MATERIEL & METHODES

2.1 Matériel biologique

Cette expérimentation a porté sur les rats des sables, *Psammomys obesus*. Ces rats sont des animaux déserticoles rencontrés en Afrique du Nord, en Mauritanie, en Egypte et au Soudan, ainsi qu'à travers la péninsule Arabe [8]. En Algérie, ces animaux se rencontrent dans plusieurs régions du Sahara notamment dans la région de Béni-Abbés. Pour notre expérimentation, nous avons utilisé des rats des sables provenant de la région d'Abbadla (Wilaya de Béchar) dont la capture se fait au mois de décembre.

Cet animal très sensible aux changements climatiques, peut être considéré comme le rongeur saharien le plus exigeant. Nous avons essayé de réaliser des conditions appropriées de captivité afin de réussir à le maintenir en vie au laboratoire. Les *Psammomys* (n = 13, d'un poids moyen de 118g et de sexe male et femelle) sont répartis dans des cages individuelles, munies d'une litière en sciure, renouvelée tous les deux jours et d'une boîte en bois, servant de terrier où ils recréent les conditions d'humidité proches de celles de leur biotope, en y accumulant également des plantes salées riches en eau. La température de l'animalerie est maintenue constante, aux environs de 25°C. Dans la journée, l'éclairage est réalisé par la lumière artificielle. A leur arrivée au laboratoire et afin de déterminer les valeurs moyennes de certaines paramètres morphologiques et biochimiques plasmatiques de ces rats, nous avons effectué des pesées ainsi que des ponctions

réalisées au niveau du sinus rétro-orbital de l'œil à l'aide d'une pipette pasteur préalablement héparinée. Ces ponctions sont effectuées sur des tubes héparinés pour le dosage de la glycémie, de la triglycéridémie, de la cholestérolémie et de la protéinémie, sur tubes secs pour le dosage des lipoprotéines et sur tubes citratés pour le dosage de l'homocystéine. Le sang prélevé est centrifugé (3000 tours/min) pendant 10 minutes. Le plasma recueilli est conservé à -80°C.

2.2 Dosage des paramètres biochimiques plasmatiques

Les dosages biochimiques plasmatiques sont effectués à l'aide de kits Biosystem. La détermination de la glycémie est évaluée par la méthode enzymatique à la glucose oxydase [9], celle de la protéinémie par la réaction de Biuret, et ceux de la cholestérolémie et de la triglycéridémie par la méthode de Fossati et Prencipe [10].

La détection et la quantification des lipoprotéines plasmatique ont été réalisées par le kit *REP-LIPIDE Lp(a)* par électrophorèse horizontale sur gel d'agarose selon la méthode de Kalwakami [11].

Le dosage de l'homocystéine totale plasmatique est effectué grâce à la méthode *IMx homocystéine* qui est un dosage immunologique par polarisation de fluorescence (FPIA) sur analyseur IMx (fabricant : Abbott).

2.3 Technique de la culture cellulaire

Après anesthésie à l'uréthane (0,4ml/100g) et dissection de l'animal, l'aorte est prélevée puis rincée au DMEM à 10% SVF, 1% antibiotiques (streptomycine 50µg/ml, pénicilline 50 UI/ml, Gibco), 5% d'hépès et 1,2% Glutamine. La media et l'intima sont ensuite éliminées et les explants adventitiels sont mis en culture primaire à 37°C, 5% de CO₂ et 95% d'air pendant 15 jours. Le milieu de culture

(DMEM à 15% de SVF, 1% L-glutamine et 1% antibiotiques) est changé tous les deux jours. Lorsque le tapis cellulaire est constitué, la confluence est atteinte. Les cellules sont alors soumises à une trypsination (0,1%), pendant 1 minute puis rincées au PBS à 10%. La suspension cellulaire obtenue est mise en culture afin d'obtenir les différents passages de la culture secondaire. Chaque passage nécessite au moins une période de 15 jours. Toutes les manipulations sont réalisées sous une hotte à flux laminaire verticale.

2.4 Incubation des fibroblastes en présence de glucose (15mM)

Au 6^{ème} passage, après leur trypsination et leur mise en suspension dans du DMEM à 10% de SVF, les fibroblastes adventitiels de *Psammomys* sont répartis dans des plaques multi-puits. Pour l'étude des fibroblastes témoins, une partie de la suspension cellulaire estensemencée à raison de 0,4.10⁶ cellules/ml/puit dans 6 puits, en utilisant le DMEM à 10% de SVF, 1% antibiotiques et 1,2% Glutamine. La deuxième partie de la suspension de fibroblastes adventitiels estensemencée à raison de 0,4.10⁶ cellules/ml/puit dans 6 autres puits, dans du DMEM à 10% de SVF, 1% antibiotiques, 1,2% Glutamine et glucose (15mM), ce sont les fibroblastes incubés en milieu hyperglucosé.

2.5 Etude de la prolifération des Fibroblastes adventitiels

La prolifération des fibroblastes adventitiels de *Psammomys obesus* est estimée par comptage cellulaire, grâce à la cellule de Malassez, après 72 heures d'incubation dans le DMEM supplémenté de 10% de SVF, d'antibiotiques et de glutamine (fibroblastes témoins) et en présence de glucose à raison de 15mM.

2.6 Etude morphométrique

Les fibroblastes adventitiels témoins et incubés en présence de glucose pendant 72 heures, sont fixés au Bouin aqueux pendant

30 minutes puis rincés à l'eau courante. Ils sont ensuite colorés au *May-Grunwald* (10 min) puis au *Giemsa* (10 min). Le tapis de fibroblastes est rincé au PBS à 10% et fait l'objet d'une étude morphométrique cellulaire et nucléaire. Pour chaque paramètre morphométrique étudié, nous avons effectué 50 mesures afin de déterminer le petit axe ou diamètre des fibroblastes, les grands et petits axes nucléaires ainsi que le nombre de nucléoles présent dans chaque noyau.

2.7 Etude statistique

Le test utilisé dans le cadre de notre travail est le test de Student *t*. Pour chaque série d'analyse, la moyenne et l'écart type sont calculés. La valeur de *t* nous donne le degré de signification P lu sur la table de Student. Le degré de significativité utilisé dans les résultats est P < 0,05 (*), P < 0,01 (**), P < 0,001 (***) et P < 0,0001 (****).

3. RESULTATS

3.1 Caractéristiques pondérale et biochimique plasmatique des *Psammomys obesus*

Les caractéristiques pondérales et biochimiques plasmatiques des *Psammomys obesus* témoins sont rapportées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des rats des sables, *Psammomys obesus*.

Paramètres	Rats témoins
Poids (g)	118,20 ± 13,54
Glycémie (mg/dl)	40,63 ± 05,98
Protéïnémie (mg/dl)	40,21 ± 10,33
Triglycéridémie (mg/dl)	32,24 ± 09,61
Cholestérolémie (mg/dl)	44,68 ± 16,17
HDL (%)	55,51 ± 08,32
LDL-VLDL (%)	40,70 ± 07,07
Homocystéïnémie (µM)	1,05 ± 0,49

3.2 Etude de la prolifération

Les résultats de la prolifération des fibroblastes adventitiels de *Psammomys obesus* témoins et soumis au glucose (15mM) pendant 72 heures sont reportés dans le tableau 2.

Tableau 2. Influence du glucose (15mM) sur la prolifération, *in vitro*, des fibroblastes adventitiels aortiques du rat des sables, *Psammomys obesus*.

Nombre des cellules / ml	Témoins	Traités au glucose (15mM)
6 ^{ème} passage	0,4.10 ⁶	0,4.10 ⁶
Après 72 heures d'incubation	(0,517 ± 0,038).10 ⁶	(1,11 ± 0,25).10 ⁶ ***

Les valeurs reportées dans le tableau représentent la moyenne affectée de son écart-type.

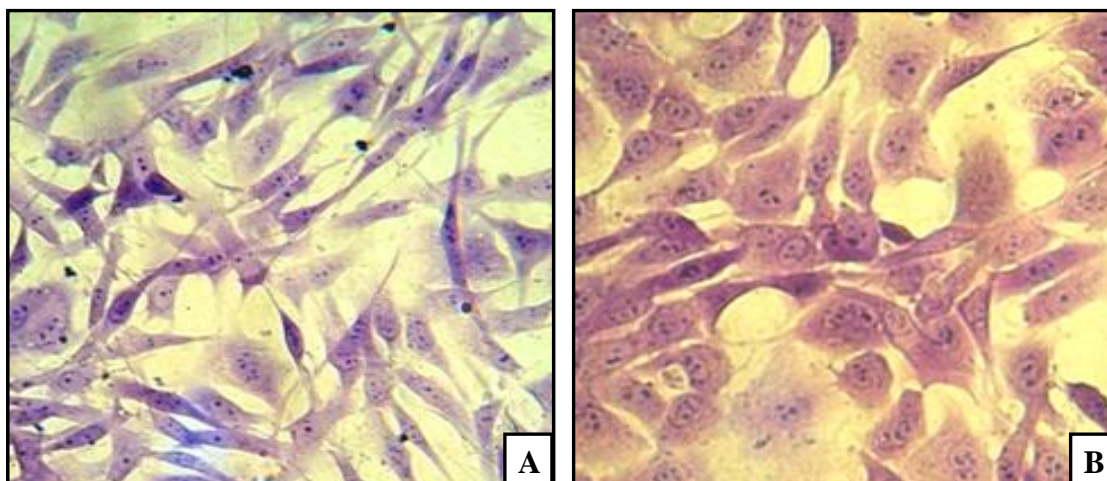
Traité vs Témoin : *** P < 0.001

Une prolifération des fibroblastes adventitiels est enregistrée après 72 heures d'incubation dans les 2 conditions expérimentales. Nos résultats montrent que le taux de prolifération est de 29,25% pour les fibroblastes témoins. En présence de glucose, ce taux est significativement (P < 0.001) augmenté et atteint une valeur de 177,5%.

La prolifération des fibroblastes adventitiels incubés dans un milieu enrichi en glucose (0,3%) est donc 6 fois plus importante que celle des fibroblastes incubés dans un milieu standard.

3.3 Etude morphométrique

L'augmentation de la prolifération enregistrée et l'aspect des cellules en culture (figure 1) en présence de glucose nous a incité à étudier les caractéristiques morphométriques des fibroblastes adventitiels. Les résultats sont rapportés dans le tableau 3.



A : incubés dans un milieu standard.

B : incubés dans un milieu glucosé (3g/l).

Figure 1. Fibroblastes adventitiels aortiques de *Psammomys obesus* en culture secondaire.

Fixation au Bouin aqueux. Coloration *May-Grunwald-Giemsa*. (G.400).

Tableau 3. Action du glucose (15mM) sur la morphométrie des fibroblastes adventitiels aortiques du rat des sables, *Psammomys obesus*.

Paramètres	Fibroblastes témoins	Fibroblastes soumis au glucose (15mM)
Petits axes cellulaires (μm)	20,40 \pm 8,98	26,45 \pm 6,63 ***
Grand axe nucléaire (μm)	19,80 \pm 4,54	22,85 \pm 3,43 ***
Petit axe nucléaire (μm)	13,35 \pm 3,77	17,20 \pm 3,22 ****
Nombre de nucléoles	3,50 \pm 1,56	7,76 \pm 2,73 ****

Les valeurs reportées dans le tableau représentent la moyenne affectée de son écart-type.

Traité vs Témoin : *** P < 0.001 ; **** P < 0.0001

Après 72 heures d'incubation dans un milieu glucosé (15 mM ou 3g/l), nous avons noté une augmentation significative ($P < 0.001$) de 29,65% des diamètres ou petits axes des fibroblastes adventitiels. En effet la taille de petits axes cellulaires des fibroblastes témoins est $20,40 \pm 8,98 \mu\text{m}$, en présence de glucose elle atteint $26,45 \pm 6,63 \mu\text{m}$.

Nous avons également déterminé les dimensions (petit et grand axes) des noyaux ainsi que le nombre de nucléoles. Nos résultats montrent des modifications nucléaires des fibroblastes incubés dans un milieu enrichi en glucose. En effet, nous avons enregistré une augmentation de 15,4% du grand axe nucléaire statistiquement significative ($P < 0.001$). Une augmentation significative ($P < 0.0001$) de 28,84% est également notée pour le petit axe nucléaire, celui-ci atteint la valeur moyenne de $17,20 \pm 3,22 \mu\text{m}$ (vs $13,35 \pm 3,77 \mu\text{m}$ dans les fibroblastes témoins).

Le dénombrement des nucléoles que nous avons effectué met en évidence une augmentation de 121,71% de ce nombre dans les fibroblastes adventitiels incubés en présence de glucose ($7,76 \pm 2,73$ nucléoles en moyenne) par rapport aux fibroblastes témoins ($3,50 \pm 1,56$ nucléoles). L'analyse statistique révèle que cette différence est significative ($P < 0.0001$). Il apparaît donc qu'en présence de glucose (15mM), les fibroblastes adventitiels subissent une modulation phénotypique marquée par une augmentation de la taille de la cellule et du noyau et marquée également par une activité synthétique importante caractérisée par l'augmentation du nombre de nucléoles.

4. DISCUSSION

Nos résultats *in vitro* montrent une augmentation significative du taux de prolifération des fibroblastes adventitiels incubés dans un milieu enrichi en glucose (15mM). Un effet similaire du glucose sur des fibroblastes cutanés humains [12], sur

des myofibroblastes cardiaques de rats [13], sur des CMLs aortiques de *Psammomys obesus* [14] et sur des fibroblastes humains du cortex rénal [15] a été précédemment rapporté. Certains chercheurs ont rapporté un effet inhibiteur ou toxique de D-glucose (5,5mM et 22mM) sur la prolifération des fibroblastes cutanés humains [16]. Selon Neumann *et al.* [13], cet effet prolifératif du glucose ne serait pas lié aux changements d'osmolarité ou à la production des produits finaux de glycation, car des concentrations équimolaires de L-glucose non métabolisable n'ont pas influencé la prolifération des myofibroblastes cardiaques.

Les fibroblastes adventitiels de *Psammomys* incubés dans un milieu enrichi en glucose apparaissent moins allongés et plus volumineux que les fibroblastes témoins (fig. 1). Ces mêmes observations ont été signalées précédemment par Benazzoug [12], dans des fibroblastes cutanés humains. Cet effet dû glucose n'est pas dû à un phénomène d'osmose puisque des fibroblastes incubés en présence de mannitol ne montrent pas les modifications observées en présence de glucose.

Par ailleurs, nos résultats morphométriques montrent une augmentation significative du nombre de nucléoles dans les fibroblastes incubés dans un milieu enrichi en glucose. Cette augmentation est un indice de synthèse cellulaire accrue des protéines. En effet, Tokudome *et al.* [17] ont montré que l'exposition de fibroblastes cardiaques à une forte concentration de glucose induit clairement la synthèse d'ADN et de collagènes et stimule l'expression des gènes de la fibronectine et du TGF- β 1. De même, Lee *et al.* [18] suggèrent qu'un taux élevé de glucose (25mM) augmente la production des MMP-2 dans les fibroblastes adventitiels aortiques chez le rat par l'intermédiaire de la voie de signalisation PI3 kinase/Akt en activant le facteur de transcription NF- κ B. Aouichat Bouguerra *et al.* [14] ont noté,

dans des CMLs de *Psammomys* incubés dans un milieu contenant 15mM de glucose, une augmentation du cholestérol cellulaire libre et estérifié, des protéines totales ainsi qu'une augmentation de la biosynthèse des chaînes $\alpha 1(I+III)$ et $\alpha 2(I)$ caractérisant les collagènes fibrillaires contenus dans les CMLs et dans la MEC.

Benazzoug *et al.* [19] ont étudié l'effet de différentes concentrations (2 et 3g/L) de glucose sur la synthèse des collagènes et de fibronectine par des fibroblastes cutanés humains en culture. Ces chercheurs ont signalé une augmentation de la biosynthèse du collagène de type III corrélée à l'augmentation de son ARNm, sans changement de production du collagène de type I. Cette augmentation de la biosynthèse collagénique est associée à une augmentation de la biosynthèse de la fibronectine (glycoprotéine de la MEC). Selon Lemons *et al.* [20], l'augmentation de l'activité métabolique des fibroblastes prolifératifs est orientée vers la synthèse protéique et en partie vers l'excrétion des protéines matricielles. Par ailleurs, Tang *et al.* [21] suggèrent que la thombospondine-1 est impliquée dans la régulation de l'expression du TGF- $\beta 1$ et du collagène de type III, induite par la concentration élevée de glucose, ouvrant ainsi la voie à une éventuelle stratégie thérapeutique.

5. CONCLUSION

Ces résultats montrent l'influence du milieu environnant sur les cellules. Ils suggèrent en particulier que le milieu hyperglucosé induit une modulation phénotypique des fibroblastes adventitiels associée à une synthèse protéique importante. Les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des fibroblastes adventitiels leur confèrent un rôle très important au cours des maladies cardiovasculaires, tels le diabète et l'athérosclérose.

REFERENCES

- [1] Bonnet J., 2005. Atherosclerosis. *EMC-Cardiol Angéiol.*, 2, 436-458.
- [2] Pagano P.J., Chanock S.J., Siwik D.A., Colucci W.S. & Clark J.K., 1998. Angiotensin II induces p67phox mRNA expression and NADPH oxidase superoxide generation in rabbit aortic adventitial fibroblasts. *Hypertension.*, 32, 331-337.
- [3] Liu J., Ormsby AOja-Tebbe., N. & Pagano P.J., 2004. Gene transfer of NAD(P)H oxidase inhibitor to the vascular adventitia attenuates medial smooth muscle hypertrophy. *Circ. Res.*, 95, 587-594.
- [4] Wilcox J.N., Okamoto E.I., Nakahara K.I., & Vinten-Johansen J., 2001. Perivascular responses after angioplasty which may contribute to postangioplasty restenosis: a role for circulating myofibroblast precursors? *Ann NY. Acad. Sci.*, 947, 68-90.
- [5] Shi Y., O'Brien J., Fard A. & Zalewski A., 1996. Transforming growth factor beta1 expression and myofibroblast formation during arterial repair. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.*, 16, 1298-1305.
- [6] Bradley Strauss H. & Rabinovitch M., 2000. Adventitial Fibroblasts : Defining a Role in Vessel Wall Remodeling. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.*, Vol. 22, 1-3.
- [7] Benazzoug Y., 1981. Approche biologique d'un modèle expérimental pour l'étude du diabète : le rat des sables. Morphologie, histologie et ultrastructure du rein, du myocarde et de la peau. Mise en évidence de microangiopathies. *Thèse 3^{ème} cycle*, USTHB, Alger. 192 p.
- [8] Harrison D., 1972. The Mammals of Arabia. *Londo n: Ernest Benn Limited* Vol. 3, 98
- [9] Trinder P., 1969. Determination of glucose in blood using glucose oxidase with an alternative oxygen acceptor. *Ann. Clin. Biochem.*, 6, 24.

- [10] Fossati P. & Prencipe L., 1982. Serum triglycerides determined colorimetrically with an enzyme that produces hydrogen peroxide. *Clin. Chem.*, 28, 2077-2080.
- [11] Kalwakami K., 1989. A rapid electrophoretic method for the detection of serum Lp (a) lipoprotein. *Clin. Chem. Acta.*, 185, 147-156.
- [12] Benazzoug Y., 1994. Vieillesse et biosynthèse de la matrice extracellulaire. Effet du glucose et des polysaccharides anioniques. *Thèse de doctorat*, USTHB, Alger. 176 p.
- [13] Neumann S., Huse K., Semrau R., Diegeler A., Gebhardt R., Buniatian G.H. & Scholz G.H., 2002. Aldosterone and D-Glucose Stimulate the Proliferation of Human Cardiac Myofibroblasts in Vitro. *Hypertension.*, 39, 756-760.
- [14] Aouichat Bouguerra S., Benazzoug Y., Bekkhoucha F. & Bourdillon M.C., 2004. Effect of High Glucose Concentration on Collagen Synthesis and Cholesterol Level in the Phenotypic Modulation of Aortic Cultured Smooth Muscle Cells of Sand Rat (*Psammomys obesus*). *Exper. Diab. Res.*, 5, 227-235.
- [15] Jones S.C., Saunders H.J., & Pollock C.A., 1999. High glucose increase growth and collagen synthesis in cultured human tubulo-interstitial cells. *Diabet. Med.*, 16, 932-938.
- [16] Sibbitt W.L., Mills R.G., Bigler C.F., Eaton R.P., Griffey R.H., Vander Jagt D.L., 1989. Glucose inhibition of human fibroblast proliferation and response to growth factors is prevented by inhibitors of aldose reductase. *Mech. Agei. Dev.*, 47, 265-279.
- [17] Tokudome T., Horio T., Yoshihara F., Suga S., Kawano Y., Kohno M. & Kangawa K., 2004. Direct Effects of High Glucose and Insulin on Protein Synthesis in Cultured Cardiac Myocytes and DNA and Collagen Synthesis in Cardiac Fibroblasts. *Metabolism.*, Vol. 53 (6), 710-715.
- [18] Lee S.J., Bae S.S., Kim K.H., Lee W.S., Rhim B.Y., Hong K.W. & Kim C.D., 2007. High glucose enhances MMP-2 production in adventitial fibroblasts via Akt1-dependent NF- κ B pathway. *FEBS Letters.*, 581, 4189-4194.
- [19] Benazzoug Y., Borchiellini C., Labat-Robert J., Robert L. & Kern P., 1998. Effet of high glucose concentrations on the expression of collagens and fibronectin by fibroblasts in culture. *Exper. Gerontol.*, Vol. 33 (5), 445-455.
- [20]. Lemons J.M, Feng X.J., Bennett B.D., Lagesse-Miller A., Johnson E.L., Raitman I, Pollina E.A., Rabitz H.A., Rabinowitz J.D. & Coller H.A. 2010. Quiescent fibroblasts exhibit high metabolic activity. *PLoS Biology.*, Vol. 8 (10), Online First™
- [21] Tang M., Zhou F., Zhang W., Guo Z., Shang Y., Lu H., Lu R., Zhang Y., Chen Y & Zhong M., 2010. The role of thrombospondin-1-mediated TGF- β 1 on collagen type III synthesis induced by high glucose. *Molec. Cell. Biochem.*, Online First™.

Transfert de chaleur dans un canal partiellement rempli d'une matière poreuse

Benmerkhi Meriem, & Afrid Mohamed

*Laboratoire de Physique Energétique
Département de Physique Université Mentouri-Constantine- Algérie*

Accepté le : 18/07/2011

ملخص

هذه الدراسة تتعلق بمحاكاة رقمية للإنتقال الحراري داخل قناة مملوءة جزئياً بمادة نافذة مشبعة بالهواء. القناة الأفقية مجزأة إلى ثلاثة أجزاء متساوية، فقط الجزء الثاني مملوء بالمادة النافذة. جداري الثلث الأول و الأخير كظومين وناقذين، لكن جداري الجزء الثاني موضوعين في درجة حرارة ثابتة أقل من درجة حرارة الجريان عند المدخل. نستعمل طريقة الحجوم المنتهية دقتها من الدرجة الثانية بالنسبة للفضاء و الزمن. لحل معادلات الإستمرارية، انحفاظ كمية الحركة، انحفاظ الطاقة. وجود الوسط النافذ يزيد بصفة معتبرة الإنتقال الحراري. من أجل عدد قراشوف يساوي 10^4 ، نتائج الحمل الحراري المزوج شبيهة بنتائج الحمل الحراري القسري. بينما رفع هذا العدد إلى 10^5 يؤدي إلى فوارق صغيرة بين نتائج الحمل الحراري المزوج و القسري.

الكلمات المفتاحية : وسط نافذ - قناة أفقية - الإنتقال الحراري - الحمل المزوج - الحجوم المنتهية.

Résumé

Cette étude concerne une simulation numérique du transfert de chaleur dans un canal partiellement rempli d'une matière poreuse saturée de l'air et d'une certaine concentration de la vapeur d'eau. Le canal horizontal est divisé en trois parties égales, seulement la deuxième partie contient de l'air en écoulement à travers la matière poreuse. Les parois du premier et troisième tiers sont considérées adiabatiques et imperméables, mais celles du deuxième sont maintenues à une température constante inférieure à celle de l'écoulement à l'entrée. La méthode numérique des volumes finis avec une discrétisation spatiotemporelle du second ordre, est utilisée pour la résolution des équations de conservation de la masse, des quantités de mouvement, de l'énergie. La présence du milieu poreux augmente considérablement le transfert thermique. Pour le nombre de Grashof égal à 10^4 , les résultats de la convection mixte sont similaires à ceux de la convection forcée. Cependant, l'augmentation du nombre de Grashof à 10^5 , conduit à des petites différences entre les résultats de la convection forcée et mixte.

Mots clés : Milieu poreu - Canal horizontal - Transfert thermique - Convection mixte - Volumes finis.

Abstract

This study concerns a numerical simulation of the heat transfer in a horizontal plane channel partially filled with a porous material, which is saturated with air. The channel space is divided into three equal parts; only the second part is filled with the porous material. The walls of the first and third parts are considered adiabatic and impermeable, but those of the second part are maintained at a constant temperature that is lower than that of the flow at the channel entrance. A finite volume numerical method with a second order accurate discretization is used for the solution of the conservation equations of mass, momenta and energy. The presence of the porous medium increases considerably the heat transfer. For the Grashof number equal to 10^4 , the mixed convection results are similar to those of the forced convection. However, the increase of the Grashof number to 10^5 , led to small differences between the forced and mixed convection results.

Key words: Porous medium - Horizontal channel - Heat transfer - Mixed convection - Finite volumes.

Auteurcorrespondant : Benmerkhi_meriem@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le phénomène de transfert de chaleur dans les milieux poreux est un domaine de recherche très actif et d'actualité. Un milieu poreux est une matrice solide rigide qui comporte des vides (pores) qui peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides (gaz ou liquide) pouvant s'écouler et, éventuellement, échanger entre elles et/ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie [1]. Pour les deux dernières décennies, il y a eu un intérêt croissant du transfert thermique convectif dans les milieux poreux [2,7]. Plusieurs études ont démontré que l'utilisation d'une matrice poreuse améliore le transfert thermique par convection forcée mais augmente la chute de pression dans les conduits [7]. Les phénomènes de transfert dans les milieux poreux sont rencontrés dans la nature et dans plusieurs applications industrielles. Des exemples sont : les écoulements des eaux souterraines, l'exploitation des gisements d'hydrocarbures, le séchage et la déshumidification du bois, le refroidissement des instruments électroniques et le transport des polluants dans les sols. Un choix judicieux de la matrice poreuse permet d'augmenter les échanges thermiques par convection dans un échangeur de chaleur annulaire partiellement ou totalement rempli par un milieu poreux. Pour cette application, il est possible d'améliorer les transferts thermiques sans augmenter les surfaces d'échanges. Plusieurs études ont été consacrées aux transferts thermiques dans les milieux poreux. Kaviany [3] a étudié un écoulement laminaire à travers un canal poreux limité par deux plaques parallèles maintenues à une température uniforme par le modèle de Darcy modifié. Il a négligé le terme du carré de la vitesse dans l'équation de quantité de mouvement et le terme de conduction axiale dans l'équation d'énergie pour montrer que le nombre de Nusselt, pour les champs complètement développés, augmente avec le paramètre de forme du milieu poreux $q = (W^2\phi/K)^{1/2}$, où W est la

largeur du canal, ϕ la porosité et K la perméabilité du milieu poreux. Les résultats montrent aussi que l'excès de la chute de pression, associé à la région d'entrée, décroît lorsque le paramètre q augmente. Chou *et al.* [4] ont étudié expérimentalement la convection mixte non Darcy complètement développée. Des lits de sphères emballées sont placés sur des canaux horizontaux. Ils ont pris la dispersion thermique en considération. Les résultats théoriques confirment ceux qui sont expérimentaux pour un rapport des diamètres du canal et de sphère ($D/d=10$). Ils ont trouvé qu'avec un nombre de Péclet faible, l'effet de flottabilité affecte significativement la structure d'écoulement secondaire et le taux du transfert thermique. Avec un nombre de Rayleigh fixe, l'effet de flottabilité peut être supprimé lorsque le nombre de Péclet augmente. Les valeurs du nombre de Nusselt dans la région complètement développée dépendent des nombres du Rayleigh et Péclet et du rapport des diamètres du canal et de sphère. Sung *et al.* [5] ont étudié numériquement les caractéristiques du transfert thermique par convection forcée dans un canal partiellement poreux ($\phi=0.9$) avec des parois adiabatiques et une source de chaleur isolée dans le canal. Deux types des endroits du bloc poreux sont considérés, (a) à la paroi supérieure et (b) à la paroi inférieure. Ils ont travaillé avec les paramètres suivantes : $Re=10-500, 10^{-6} \leq Da \leq \infty$, une épaisseur du substrat poreux ($0 \leq S \leq 1$) et un rapport des conductivités thermiques ($0.1 \leq R_k \leq 10$). Ils ont utilisé la méthode des volumes finis, et ils ont trouvé une augmentation du transfert thermique accompagnée d'une grande chute de pression. La diminution du Da diminue la température maximale de la paroi dans le type (a) et l'augmente dans le type (b). L'augmentation du R_k pour un Da fixe, augmente le taux du transfert

thermique. Jiang *et. al.* [6] ont étudié expérimentalement le transfert thermique par convection forcée dans un canal plan rempli de verre, de particules sphériques d'acier inoxydable ou de bronze, ils ont utilisé l'eau comme un fluide du fonctionnement. La distribution de la température locale de la paroi a été mesurée par les températures et les pressions de fluide à l'entrée et à la sortie. Les effets du diamètre de la particule, de la conductivité thermique de la particule et de la vitesse du fluide ont été examinés pour trois tailles de la particule. Le coefficient de transfert thermique et le nombre de Nusselt sont accrus avec la diminution du diamètre de la particule en bronze, mais diminués avec la diminution de diamètre de la particule de verre. Ils sont également augmentés avec l'augmentation de la conductivité thermique du matériel emballé. Rahimian *et. al.* [7] ont étudié le transfert thermique d'un écoulement laminaire d'un fluide incompressible dans un canal plan divisé en trois sections, dont les parois des sections 1 et 3 sont adiabatiques. La section 2 est remplie d'une matière poreuse ($\phi = 0.9$). La température des particules solides est considérée en deux types, (a) elle varie avec le temps où les parois sont à une température constante, (b) elle est considérée constante où les parois sont adiabatiques. Ils ont utilisé la méthode de MAC (Marker et Cell). Par la considération d'un équilibre thermique non local, ils ont trouvé que le nombre de Nusselt moyen varie linéairement avec le nombre de Re, une nature oscillatoire du nombre de Nusselt local près des parois à cause des vitesses oscillatoires. L'épaisseur de la couche limite thermique diminue avec l'augmentation du nombre de Re de la particule près des parois du canal. La variation du nombre total des particules solides le long du canal, cause un champ de vitesse oscillatoire impose des oscillations dans le coefficient de convection. Jiang *et. al.* [8, 9, 10] ont étudié numériquement et expérimentalement le transfert thermique de la convection forcée d'eau et de l'air,

dans des canaux poreux en bronze agglomérés. Les résultats des trois références ont montré que le transfert thermique convectif dans un canal poreux aggloméré était plus intense que dans un canal poreux non aggloméré, dû à la résistance thermique réduite de contact et à la porosité réduite près des parois du matériel aggloméré. Chang *et. al.* [11] ont étudié expérimentalement la convection mixte non Darcy dans un canal horizontal de section carrée rempli des sphères emballées sous un chauffage axial uniforme et une température uniforme de la paroi périphérique. Ils ont travaillé avec une gamme du nombre de Rayleigh ($0 \leq Ra \leq 3 \cdot 10^5$) et une gamme du nombre de Péclet ($Pe=10-200$). Ils ont considéré l'effet de la dispersion thermique. Avec un grand nombre de Rayleigh et un faible nombre de Péclet, l'effet de flottabilité se produit à la région d'entrée par un écoulement secondaire. Avec $Pe = 300$, $Ra = 10^5$ et $Pr = 10$, l'effet de flottabilité est supprimé par la domination de l'effet de la dispersion thermique. Hadim *et. al.* [12] ont étudié numériquement par la méthode des volumes finis, la convection forcée d'un écoulement laminaire avec un équilibre thermique local, entré verticalement par une fente sur un canal poreux homogène, isotropique et saturé composé par des particules métalliques agglomérées avec une paroi adiabatique. Par la considération de la dispersion thermique, ils ont trouvé que le milieu poreux avec un petit diamètre des particules produit une augmentation du transfert thermique et de la chute de pression, alors qu'avec un plus grand diamètre des particules, les augmentations citées sont réduites aux ses valeurs asymptotiques du cas non poreux. Une expérience réalisée par Tzeng *et. al.* [13] concerne les caractéristiques du transfert thermique d'un écoulement d'air dans des canaux poreux en bronze agglomérés axisymétriquement chauffés avec des cloisons métalliques en cuivre insérées périodiquement en quatre modes : (a) sans aucune cloison, (b) avec des cloisons

insérées à la paroi supérieure chaude, (c) avec des cloisons insérées à la paroi inférieure adiabatique, (d) avec des cloisons insérées aux deux parois. Le transfert thermique de tous les modes augmente avec la diminution du diamètre de la particule, surtout avec des nombres de Re élevés. Pour $Re > 2000$, le transfert thermique est plus grand en mode (b) et plus petit en mode (d), en lequel il était encore plus petit que celui en mode (a). Cependant, pour un Re de l'ordre de 1000, l'amélioration du transfert thermique est de 20-30% en mode (d), de 10-20 % en mode (b) et de 0-12 % en mode (c). Jaballah *et al* [14] ont étudié la convection mixte dans un canal plan horizontal bidimensionnel contenant des couches fluides et poreuses chauffées par un flux constant sur les surfaces supérieures. Ils ont utilisé la méthode des volumes finis. Le champ thermique, les lignes de courant et les nombres locaux de Nusselt sont analysés, pour une large gamme du nombre de Darcy ($1 < Da < 10^5$), et pour différentes valeurs du rapport de conductivité thermique, R_k . Les résultats identifient la limite de la convection mixte et l'effet des caractéristiques de médias poreuses (perméabilité, conductivité) sur la structure d'écoulement et le transfert thermique. Hetsroni *et al.* [15] ont étudié expérimentalement l'effet de la porosité sur le transfert thermique et la chute de pression dans un canal rectangulaire avec des insertions poreuses agglomérées de différentes porosités. Ils ont trouvé qu'il y a une grande augmentation de la chute de pression du canal poreux par rapport à celle d'un canal vide, et elle augmente plus de deux fois avec une diminution de trois fois du diamètre des pores. Avec un nombre de Re, dans le régime laminaire, le nombre de Nusselt augmente plus de deux fois avec une diminution de trois fois du diamètre des pores. Dans la présente étude, le but est d'étudier numériquement le transfert de chaleur dans un canal plan horizontal bidimensionnel, partiellement rempli d'une matière poreuse saturé par l'air. La conductivité thermique de la matière poreuse est égale à 5.77 fois celle

du fluide et la porosité égale à 0.8. Le nombre de Darcy est $Da = 10^{-2}$. Le canal est divisé en trois parties, la première et la troisième contiennent un écoulement d'air, alors que la deuxième contient de l'air en écoulement à travers la matière poreuse. Les parois du premier et troisième tiers sont considérées adiabatiques, mais celles du deuxième sont maintenues à une température constante inférieure à celle de l'écoulement à l'entrée. Le milieu poreux est supposé isotrope et homogène. Le fluide est supposé Newtonien avec des propriétés thermophysiques constantes. L'écoulement est supposé incompressible et laminaire. Le but de ce travail est la détermination de l'effet du milieu poreux sur le transfert thermique et la différence entre les résultats de la convection forcée et la convection mixte.

2. GEOMETRIE DU PROBLEME

La configuration du canal et de l'écoulement est illustrée dans la figure 1.

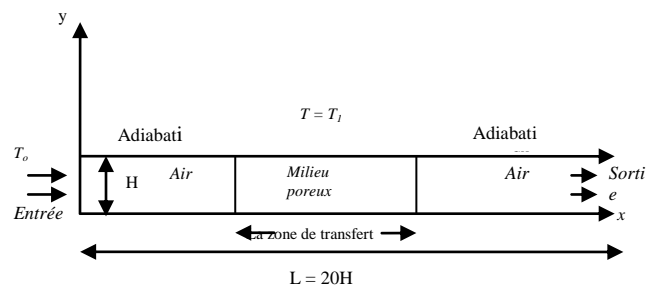


Figure. 1 : Le schéma du problème considéré

3. FORMULATION MATHÉMATIQUE

Dans le milieu poreux, l'écoulement est modélisé par le modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkman [2], avec les équations différentielles (non dimensionnelles) aux dérivées partielles, suivantes :

L'équation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

L'équation de la quantité de mouvement suivant (x)

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(UU)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(VU)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{U}{\text{Re Da}} - \text{Cf} \frac{\sqrt{U^2 + V^2} U}{\sqrt{\text{Da}}} + \frac{1}{\text{Re} \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

L'équation de la quantité de mouvement suivant (y)

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(UV)}{\partial x} + \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial(VV)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{V}{\text{Re Da}} - \text{Cf} \frac{\sqrt{U^2 + V^2} V}{\sqrt{\text{Da}}} + \frac{1}{\text{Re} \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + \frac{\text{Gr}_t}{\text{Re}^2} T \quad (3)$$

L'équation d'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(U T)}{\partial x} + \frac{\partial(V T)}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (4)$$

Les conditions initiales et aux limites.

Pour $t = 0$, $U = 0$, $V = 0$, $T = 1$.

Pour $t > 0$, à $x = 0$, $U = 1$, $V = 0$, $T = 1$.

$$\text{A } x=20, \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0.$$

$$\text{A } y = 0, \begin{cases} 0 \leq x \leq 6.66 \\ 13.33 \leq x \leq 20 \end{cases} U = 0, V = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

$$\text{A } y = 0, 6.66 < x < 13.33 \quad U = 0, V = 0, T = 0.$$

$$\text{A } y = 1, \begin{cases} 0 \leq x \leq 6.66 \\ 13.33 \leq x \leq 20 \end{cases} U=0, V=0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

$$\text{A } y = 1, 6.66 < x < 13.33 \quad U = 0, V = 0, T = 0.$$

4. DETAILS NUMERIQUES

On a choisi la méthode des volumes finis pour la résolution numérique des équations modélisantes. On a utilisé une discrétisation temporelle du second ordre pour tous les termes de la variation temporelle dans toutes les équations :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|^{t+\Delta t} = \frac{3\phi^{t+\Delta t} - 4\phi^t + \phi^{t-\Delta t}}{2\Delta t}$$

La discrétisation temporelle des termes convectifs et non linéaires suit le schéma d'Adam-Bashforth (d'ordre 2):

$$\phi^{t+\Delta t} = 2\phi^t - \phi^{t-\Delta t}$$

La discrétisation temporelle des termes diffusifs et de pression est implicite, ils seront évalués, sans approximation, au temps $(t + \Delta t)$. Le schéma des différences centrées d'ordre deux est utilisé pour la discrétisation des dérivées spatiales, par

exemple:
$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_n = \frac{\phi_N - \phi_P}{dy_n}$$

avec une erreur de troncature d'ordre $(dy_n)^2$. Les essais numériques ont été effectués pour un maillage uniforme de (202×82) avec un pas du temps de 10^{-4} . On utilise un maillage typique pour la discrétisation des équations des variables dépendantes scalaires, et un maillage décalé pour les variables dépendantes vectorielles (les composantes du vecteur de vitesse). L'idée du maillage décalé, est de stocker les composantes de la vitesse sur les faces des volumes finis pour éviter la satisfaction des équations de discrétisation par des solutions numériques spatialement oscillatoires et physiquement inacceptables. Tous les termes des équations de la conservation de la masse, des quantités de mouvement et de l'équation d'énergie sont double intégrés entre les limites d'un volume fini. Les résultats des intégrales sont réarrangés sous la forme standard des équations algébriques (de discrétisation). Pour résoudre les systèmes d'équations de discrétisation de vitesse, il est nécessaire de connaître les valeurs de la pression aux

points du maillage typique, apparaissantes dans les sources des équations de discrétisation [16]. Et donc, il nous faut une équation de discrétisation de la pression à chaque point intérieur du maillage typique. L'obtention d'une telle équation est possible par l'utilisation des équations de discrétisation des vitesses et de continuité [16]. Pour la résolution des systèmes d'équations algébriques nous avons utilisé une méthode de solution par balayage (Sweeping) dite ligne by ligne (L B L) exposée par Patankar [17], avec l'algorithme de Thomas. La solution séquentielle des équations de discrétisation des variables dépendantes suit l'algorithme SIMPLER [17]. Les détails numériques sont exposés par Benmerkhi [16]. La convergence vers le régime permanent est vérifiée lorsque les bilans globaux de la masse et de la chaleur sont satisfaits. Un code de calcul basé sur l'algorithme précédent en langage Fortran a été utilisé et élaboré. Il a été exécuté sur un micro-ordinateur personnel disposant d'un processeur Pentium (R) 4, 3.00 GHz et de 256 Mo de RAM.

5. RESULTATS

5.1 Validation

Pour la validation du code de calcul élaboré, nous avons tenté de reproduire certains résultats de Sung *et al.* [5]. Ils ont étudié le transfert thermique de la convection forcée dans un canal partiellement rempli d'un milieu poreux avec une porosité égale à 0.9. Une petite partie de la paroi inférieure est chauffée par un flux de chaleur constant. Les autres parties et toute la paroi supérieure sont adiabatiques. L'épaisseur du substrat poreux (bloc poreux) est 0.5 fois la hauteur du canal. Les paramètres utilisés sont : un Rapport d'aspect $(L/H) = 20$, $Re = 100$, $C_f = 0.55$, $Pr = 0.72$, $Da = 10^{-5}$. Le résultat de la référence cité et notre résultat sont obtenus avec un maillage de (140×50) avec un pas du temps $\Delta t = 10^{-4}$. Notre écoulement et celui de la référence sont présentés dans les figures 2 et 3. La

similarité des deux écoulements est apparente, et en particulier, la zone de recirculation derrière le bloc poreux. L'écoulement dans les deux figures ressemble à un écoulement derrière un bloc complètement solide, où le débit passant par ce bloc est très faible.

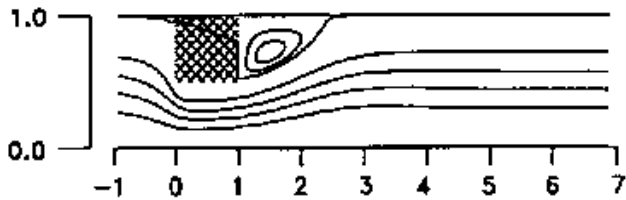


Figure 2. Modèle d'écoulement, $Re = 100$ et $Da = 10^{-5}$ (Notre résultat)

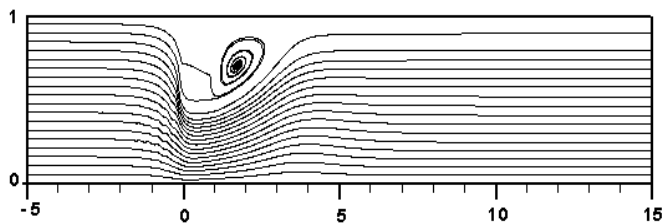


Figure 3. Modèle d'écoulement, $Re = 100$ et $Da = 10^{-5}$ (Résultat de la référence citée)

Dans la figure 4, on compare les profils verticaux (passant par le bloc poreux) de la vitesse horizontale. On constate que notre résultat est qualitativement en accord avec celui de la référence citée, mais quantitativement il est un peu différent. Cette différence quantitative provient du maillage non uniforme utilisé dans la référence [5], où les points du maillage ont été plus denses près de la source de chaleur, et près des parois supérieure et inférieure du canal, aussi bien qu'à l'interface (milieu poreux/fluide).

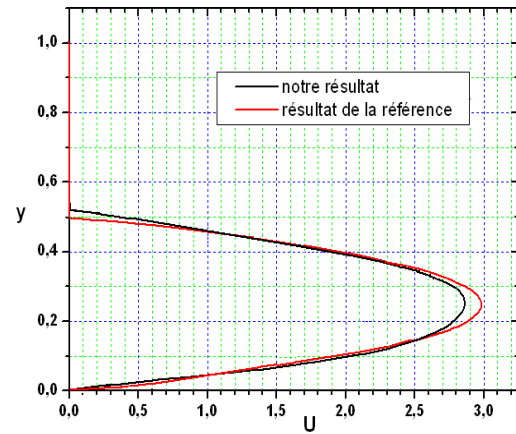


Figure 4 : Comparaison des profils verticaux de la vitesse horizontale à la moitié du bloc poreux.

5.2 Résultats obtenus par cette étude

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats de notre étude. Ces résultats sont partagés en deux parties:

- La première concerne le cas d'un canal sans la matière poreuse, considéré le cas de référence.
- La deuxième concerne la détermination de l'effet du milieu poreux sur les transferts de chaleur et la comparaison entre les résultats des convections forcée et mixte.

5.2.1 Cas d'écoulement dans le canal sans milieu poreux (Convection forcée)

Le modèle mathématique de ce cas est obtenu avec une porosité égale à 1 et un nombre de Darcy infini. Le cas de référence est résolu avec les paramètres de contrôle suivantes: Rapport d'aspect $(L/H)=20$, $Re = 100$, $Da = 10^{30}$, $C_f = 0$, $\phi = 1$, $Pr = 0.7$ et $\Delta t = 10^{-4}$.

De la figure 5, on voit le développement classique d'un écoulement dans un canal plan. L'écoulement est uniforme à l'entrée, il se développe axialement pour devenir un écoulement de Poiseuille avec un profil parabolique de la vitesse (avec un maximum égal à 1.5) axialement invariant et une chute axiale de la pression.

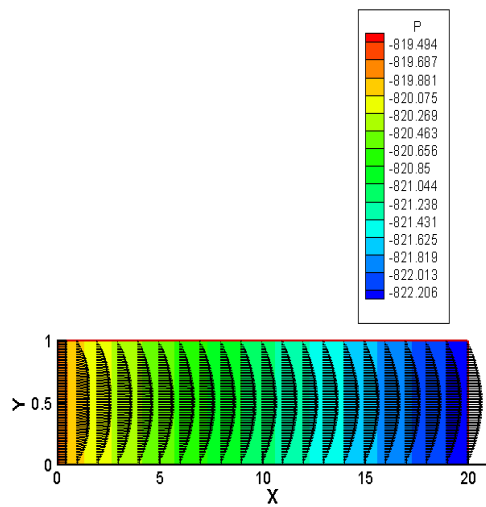


Figure 5. Champ de vitesse et de pression d'un écoulement dans un canal sans milieu poreux.

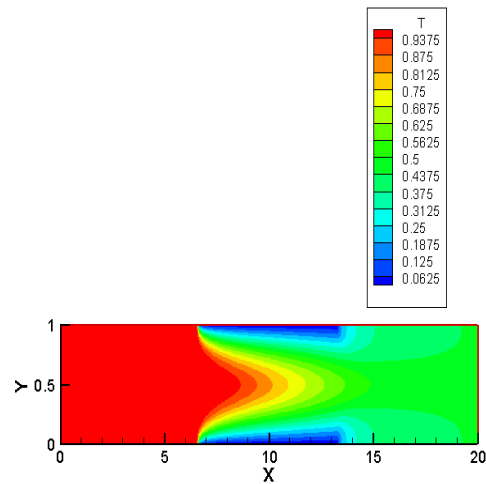


Figure 6. Distribution spatiale de la température d'un écoulement dans un canal sans milieu poreux.

La distribution de la température est représentée dans la figure 6. Entre l'entrée et le début de la zone de transfert, les parois du canal sont adiabatiques et il n'y a aucun transfert thermique entre ces parois et le fluide; et donc le fluide maintient sa température d'entrée. Dans la zone de transfert, les parois du canal sont maintenues à une température inférieure à celle du fluide à l'entrée. Dans cette zone, il y'a transfert thermique par convection et diffusion. Le refroidissement axial du fluide est remarquable. Suivant la direction transversale, on voit qu'entre la demi hauteur du canal et les parois, il y a une diminution importante de la température. Entre la sortie de la zone de transfert et la sortie du canal, les parois de ce dernier sont adiabatiques et la distribution de la température s'oriente vers une homogénéisation spatiale.

L'échange thermique est quantifié par le nombre de Nusselt qui est défini par:

$$Nu(x) = 2 \frac{\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{T_m - T \Big|_{y=0}} = \frac{2}{T_m} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

pour la paroi inférieure du canal et par :

$$Nu(x) = 2 \frac{-\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1}}{T_m - T \Big|_{y=1}} = -\frac{2}{T_m} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1}$$

pour la paroi supérieure. La variation du nombre de Nusselt local des deux parois du canal, présentée dans la figure 7 est la même (par symétrie). Comme imposé par les conditions aux limites, le nombre de Nusselt est nul le long des parties adiabatiques. Dans la zone de transfert, il subit une chute axiale importante de la valeur maximale 25.83 jusqu'à 7.54, cette valeur est la limite asymptotique du nombre de Nusselt d'un écoulement thermiquement développé dans un canal à parois isothermes [18].

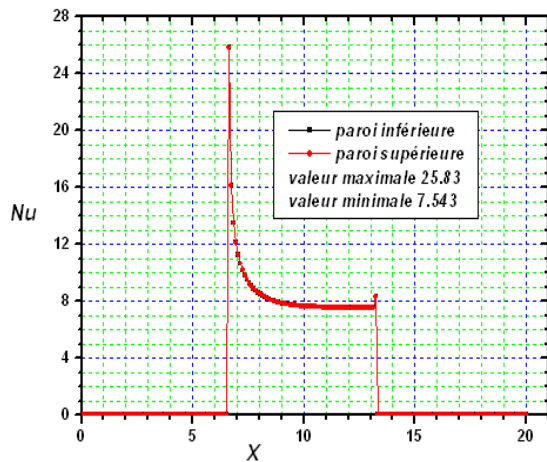


Figure 7. Variation du nombre de Nusselt local.

5.2.2 Cas du canal partiellement poreux (Convection forcée)

Dans ce cas, le deuxième tiers du canal est rempli par la matière poreuse. Les paramètres de contrôle sont : Rapport d'aspect (L/H)=20, $Re=100$, $Da = 10^{-2}$, $C_f=0.55$, $\phi=0.8$, $Pr=0.7$ et $\Delta t = 10^{-4}$. Notons que le milieu d'écoulement est non homogène: le premier et le troisième tiers contiennent du fluide alors que le deuxième tiers contient le fluide et le milieu poreux. Les sections du début et de la fin de la zone de transfert représentent des faces verticales de discontinuité du milieu d'écoulement. A l'entrée, l'écoulement est uniforme. A partir de l'entrée, l'écoulement commence à se développer axialement. Mais, le long de son développement dans le premier tiers, il rencontre la face amont de la zone de transfert. Cette rencontre modifie le développement de l'écoulement. Une fois dans la zone de transfert, l'écoulement commence à se développer dans un milieu poreux. Le développement de l'écoulement dans le milieu poreux subit une discontinuité à la face aval de la zone de transfert: l'écoulement passe du milieu poreux à un tronçon du canal simple. Ce passage modifie de nouveau l'écoulement. Finalement, une fois dans le troisième tiers, l'écoulement commence un troisième développement qui s'étend jusqu'à la sortie du canal. Le champ de vitesse (à

quelques positions axiales arbitrairement choisies) et la distribution spatiale de la pression sont illustrés dans la figure 8. De cette figure, il est clair que la variation axiale de la pression est surtout présente dans la zone de transfert (à travers le milieu poreux). La variation axiale de la pression est très supérieure à celle du cas du canal sans milieu poreux. Cependant, sa variation transversale est négligeable. Avec l'atteinte du régime permanent et la négligence des termes convectifs (relativement faibles), les termes de Darcy, de Forchheimer, de Brinkman et de gradient de pression, dans l'équation de quantité de mouvement suivant x , sont équilibrés.

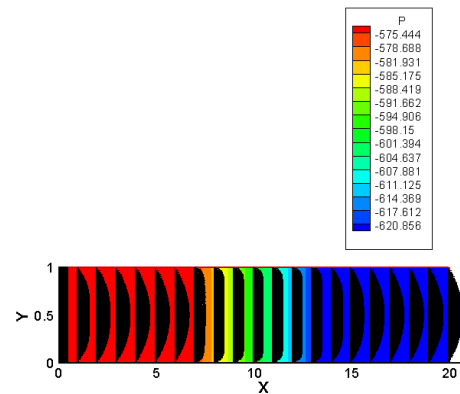


Figure 8. Champ de pression et de vitesse d'un écoulement dans un canal partiellement poreux

Dans les figures 9 (a) et 9 (b) , on a tracé le profil vertical de la vitesse horizontale à quelques positions axiales arbitrairement choisies. De cette figure, la variation spatiale de vitesse le long du canal est bien illustrée. Elle commence à se développer dans le premier tiers du canal sous la forme d'un profile parabolique avec un maximum égal à 1.5. A l'approche de l'interface (fluide/milieu poreux), le maximum de la vitesse diminue de 1.5 à 1.37. A l'interface, le maximum diminue à 1.3. Il continue à diminuer dans le milieu poreux jusqu'à la valeur 1.07, à cause de la résistance du milieu poreux à l'écoulement du fluide. La diminution du maximum de la vitesse, situé à la demi hauteur du canal est simultanément accompagnée par une

augmentation du niveau de la vitesse près des parois pour conserver le débit axial de l'écoulement (conservation de masse).

Dans le milieu poreux, le profil de vitesse est aplati. Dans le troisième tiers du canal (voir la figure 9 (b), dès la sortie du milieu poreux, la vitesse commence un redéveloppement parabolique et atteint le profil de Poiseuille à la sortie du canal. Dans le milieu poreux, la variation verticale de la vitesse horizontale près des parois est due au terme de Brinkman ; mais l'aplatissement du profil de la vitesse, loin des parois, est dû au terme de Forchheimer.

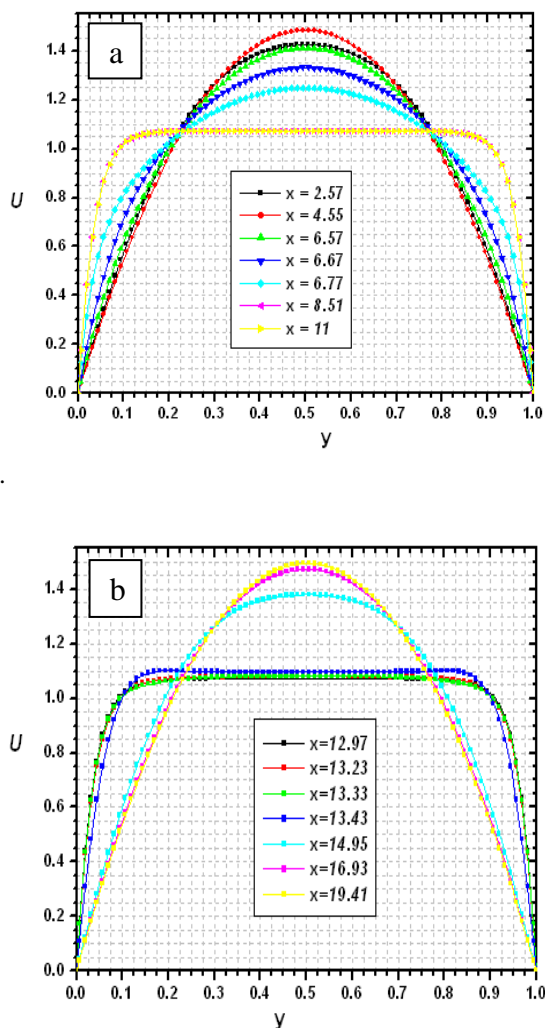


Figure 9. Profils verticaux de la vitesse horizontale entre (a) l'entrée et le milieu du canal, (b) entre le milieu du canal et la sortie.

La distribution de la température est illustrée dans la figure 10. L'écoulement est isotherme (à la température d'entrée) jusqu'au début de la zone de transfert. On constate une chute rapide de la température

dans la zone de transfert. Le refroidissement axial rapide dans la zone de transfert est mieux représenté par l'évolution axiale de la température moyenne, présentée dans la figure 11. La variation axiale de cette température moyenne est définie par :

$$T_m(x) = \frac{\int_0^1 U(x, y) T(x, y) dy}{\int_0^1 U(x, y) dy}$$

Elle reste constante (égale à la valeur d'entrée 1) jusqu'au début de la zone de transfert où elle subit une chute axiale jusqu'à la fin de cette zone. A partir de cette position, elle est constante jusqu'à la sortie. Dans ce cas d'écoulement dans un canal partiellement poreux, la température moyenne à la sortie de la zone de transfert vaut 0. Cela veut dire que la zone de transfert refroidi totalement l'écoulement. Entre la sortie de la zone de transfert et la sortie du canal, l'écoulement est isotherme à la température nulle. Donc, on constate une amélioration nette du transfert thermique par rapport à celui du canal sans milieu poreux. L'amélioration du transfert thermique dans le milieu poreux est due à l'augmentation de la convection près des parois (vitesse relativement plus grande) et aussi l'augmentation de la conduction de chaleur par une conductivité thermique du milieu poreux égale à 5.77 fois celle du fluide.

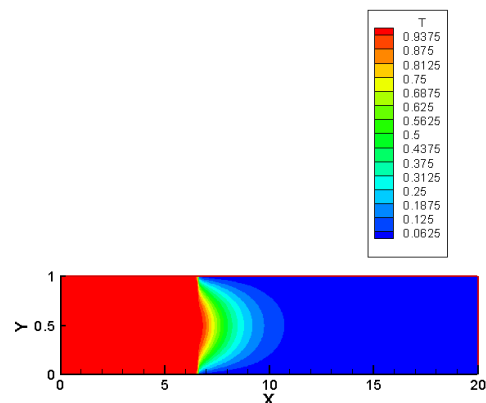


Figure 10. Distribution spatiale de la température d'un écoulement.

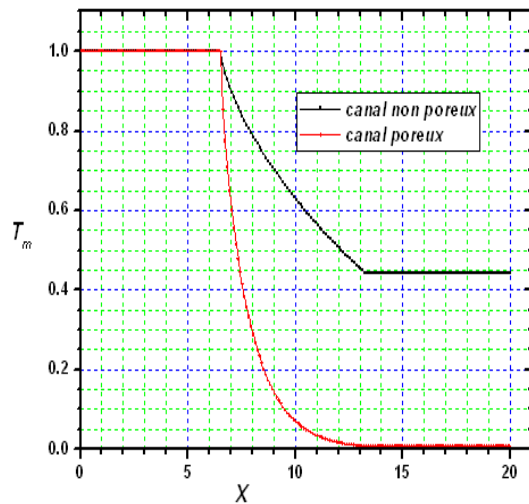


Figure 11. Comparaison des températures moyennes avec et sans milieu poreux.

La figure 12 illustre la variation axiale du nombre de Nusselt local des deux parois du canal poreux et non poreux. Premièrement, la variation horizontale du nombre de Nusselt local est définie par :

$$Nu(x) = 2 \frac{k_m \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{T_m - T \Big|_{y=0}} = \frac{2}{T_m} 5.77 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{11.54}{T_m} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

pour la paroi inférieure

$$Nu(x) = 2 \frac{-k_m \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1}}{T_m - T \Big|_{y=1}} = -\frac{2}{T_m} 5.77 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1} = -\frac{11.54}{T_m} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1}$$

pour la paroi supérieure.

Les conditions aux limites des parois du canal restent les mêmes dans tous les cas. Donc, le nombre de Nusselt local des parois dans le premier et le troisième tiers du canal est nul, puisque les parois sont toujours adiabatiques. Dans la zone de transfert, on constate une chute axiale rapide du nombre de Nusselt local de 96.38 à la valeur asymptotique 53.27, très supérieure à celle du canal sans milieu poreux qui est égale à 7.54. L'amélioration du transfert thermique du cas avec milieu poreux est très nette.

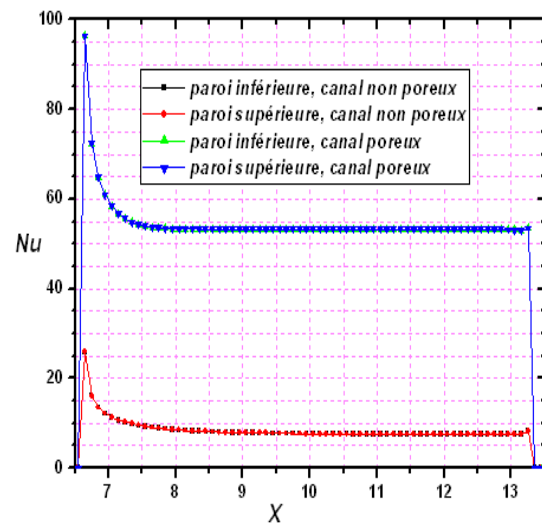


Figure 12. Comparaison des nombres de Nusselt locaux avec et sans milieu poreux

5.2.3. Cas de l'écoulement dans le canal poreux avec $Gr_t = 10^4$ (Convection mixte)

Dans les deux cas étudiés de la convection mixte, le deuxième tiers du canal est rempli par la matière poreuse. Les paramètres utilisés sont toujours les mêmes : Rapport d'aspect (L/H)=20, $Re=100$, $Da=10^{-2}$, $C_f=0.55$, $\phi=0.8$, $Pr=0.7$ et $\Delta t=10^{-4}$. On ajoute le paramètre $Gr_t = 10^4$. Donc, seule la poussée thermique peut modifier l'écoulement. La figure 13 montre qu'il n'y a pas un grand changement entre la convection forcée et mixte concernant le régime d'écoulement ou sa forme, sauf une petite augmentation de la chute axiale de la pression ne dépasse pas 0.96% pour ce cas par rapport au premier (cas du canal poreux), avec une petite perturbation de la vitesse au début de la zone de transfert. Cette petite perturbation ne peut pas être représentée graphiquement. Le faible effet de la poussée thermique est limité dans la petite zone de variation de température près de l'entrée de la zone de transfert.

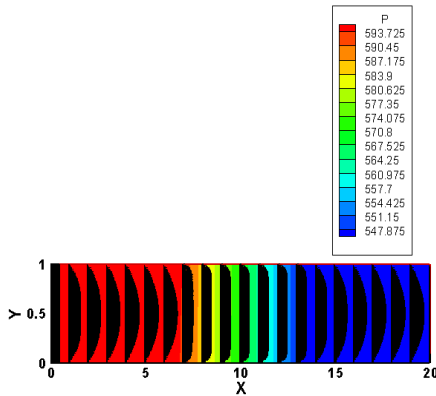


Figure 13. Profil de vitesse et de pression (avec $Gr_t = 10^4$)

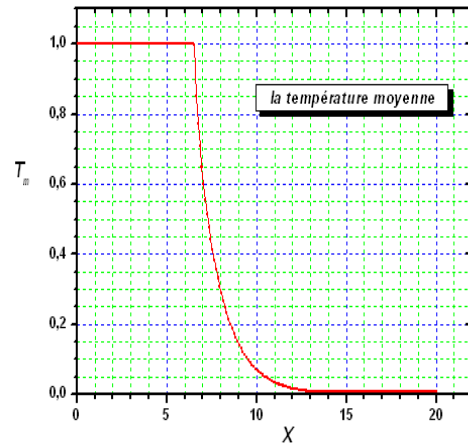


Figure 15. Variation axiale de la température moyenne (avec $Gr_t = 10^4$)

Des figures 14 et 15, il est clair que le champ de température et la variation de la température moyenne sont très proches de celles du cas de la convection forcée. Cette similarité des résultats est due à la faible différence entre les écoulements de la convection forcée et la convection mixte. La similarité des transferts thermiques est aussi illustrée par la distribution des nombres de Nusselt locaux dans la figure 16.

dans le cas de la convection mixte, le nombre de Nusselt est égal à 97.99 pour la paroi supérieure et 94.7 pour la paroi inférieure, alors qu'il est égal à 96.38 pour les deux parois du cas de la convection forcée. Cependant, la valeur asymptotique du nombre de Nusselt est 53.27 dans tous les cas. La petite augmentation du nombre de Nusselt à la paroi supérieure et sa petite diminution à la paroi inférieure est due à la perturbation légère de vitesse près de ces parois (le faible effet de la poussée thermique augmente légèrement la vitesse près de la paroi supérieure et la diminue légèrement aussi près de la paroi inférieure).

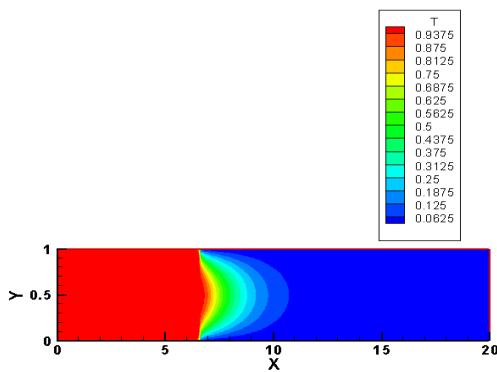


Figure 14. Distribution spatiale de la température (avec $Gr_t = 10^4$)

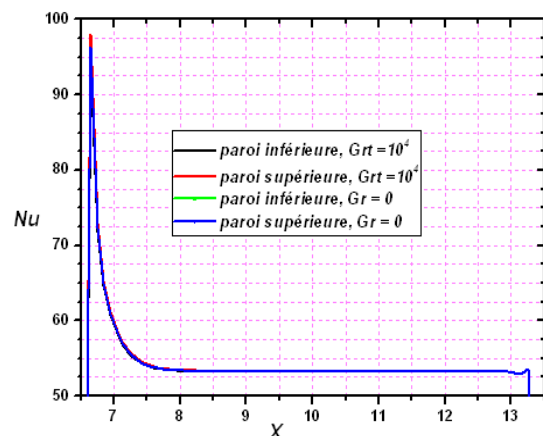


Figure 16. Comparaison de la variation axiale des nombres de Nusselt locaux de la convection forcée et mixte

De cette figure, on peut remarquer que le nombre de Nusselt de la convection mixte varie de la même façon que celui de la convection forcée. La différence qui existe est entre les valeurs maximales de ce nombre au début de la zone de transfert :

5.2.4. Cas de l'écoulement dans le canal poreux avec $Gr_t = 10^5$ (Convection mixte)

En augmentant le nombre de Grashof thermique à 10^5 , la convection mixte s'intensifie relativement au cas de $Gr_t = 10^4$, mais reste localement limitée à l'entrée de la zone de transfert où existe une variation de température. La différence entre les écoulements de la convection forcée et mixte dans ce cas est mieux représentée par les vecteurs de vitesse de la figure 17. Dans cette figure, on remarque aussi une distribution de la pression très différente de celle de la convection forcée : la pression est verticalement stratifiée dans le premier tiers du canal : elle augmente verticalement. Sa chute axiale augmente de 9.63% par rapport à celle du cas de la convection forcée (canal poreux). On constate aussi que dans la zone de transfert, le niveau de la vitesse près de la paroi inférieure est moins que celui près de la paroi supérieure. Ce qui est bien illustré dans les figures 18 (a , b).

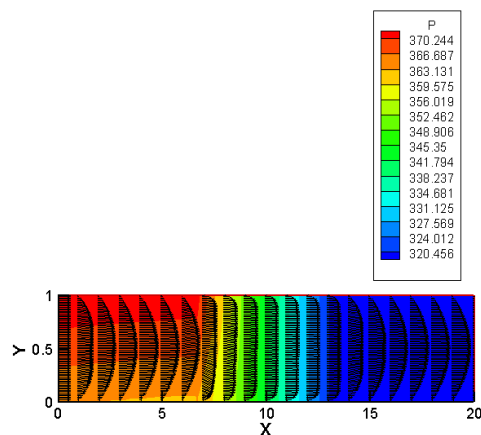


Figure 17. Profil de vitesse de l'écoulement dans le canal partiellement poreux (avec $Gr_t = 10^5$).

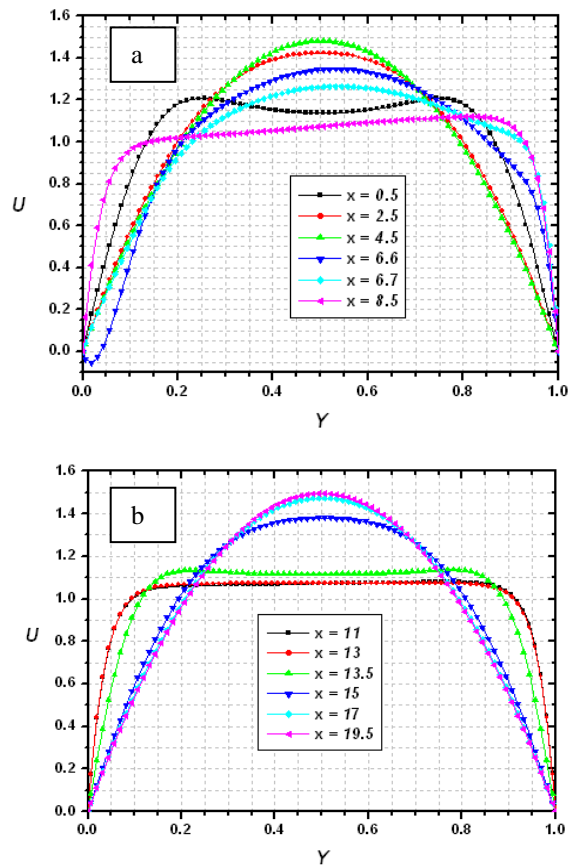


Figure 18 (a, b) Profils verticaux de la vitesse horizontale à quelques positions axiales arbitrairement choisies (avec $Gr_t = 10^5$).

Dans les figures 19 et 20, Le champ thermique et la variation de la température moyenne sont légèrement différents des résultats du cas de la convection forcée ou du cas de la convection mixte avec $Gr_t = 10^4$. Sur la figure 21, on rapporte la variation axiale du nombre de Nusselt, la valeur maximale de ce nombre à la paroi inférieure est égale à 77.32, cette valeur est inférieure à celle de la paroi supérieure qui est égale à 109.31, et à la valeur 96.38 de la convection forcée. La vitesse augmente près de la paroi supérieure ce qui augmente le nombre de Nusselt. La vitesse diminue près de la paroi inférieure ce qui diminue le nombre de Nusselt. La différence qui existe entre les valeurs du nombre de Nusselt pour le cas de la convection forcée et le cas de la convection mixte (avec $Gr_t = 10^5$) est due à l'effet de la poussée thermique.

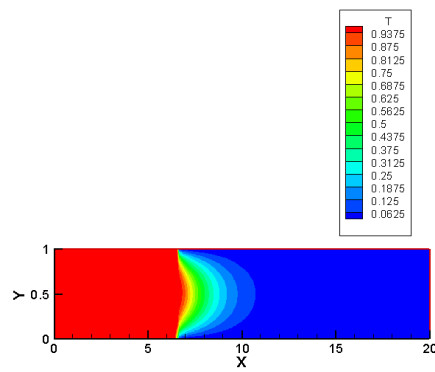


Figure 19. Distribution spatiale de la température (avec Grt = 10⁵).

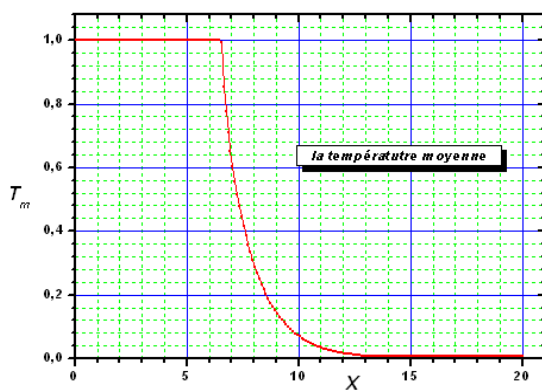


Figure 20. Variation axiale de la température moyenne (avec Grt = 10⁵)

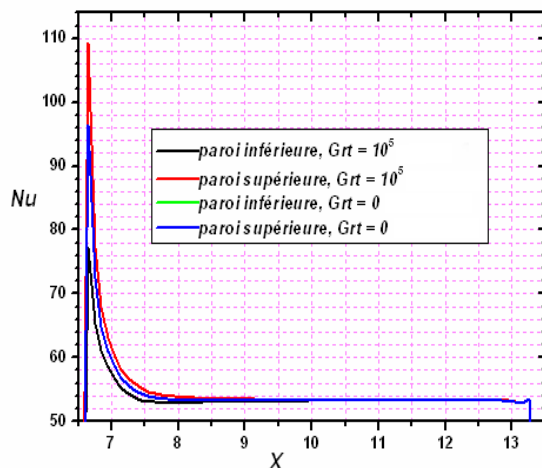


Figure 21. Comparaison de la variation du nombre de Nusselt dans le canal partiellement poreux entre Grt=0 et Grt=10⁵.

5.2.5. Comparaison de nombres de Nusselt moyens de la convection forcée et mixte avec milieu poreux

Dans le tableau 1, on présente les nombres de Nusselt moyens des cas étudiés. Le nombre de Nusselt moyen est défini par :

$$Nu_{moy} = \frac{1}{6.63} \int_{6.67}^{13.33} Nu(x) dx$$

On constate, en général, qu'il n'existe pas une considérable différence entre le transfert thermique moyen de la convection forcée et celui de la convection mixte.

Tableau 1. Nombres de Nusselt moyens de la convection forcée et mixte.

Grt = 0	Paroi inférieure	Nu _{moy} = 54.724770
	Paroi supérieure	Nu _{moy} = 54.724770
Grt= 10 ⁴	Paroi inférieure	Nu _{moy} = 54.660680
	Paroi supérieure	Nu _{moy} = 54.787510
Grt=10 ⁵	Paroi inférieure	Nu _{moy} = 54.018020
	Paroi supérieure	Nu _{moy} = 55.269150

6. CONCLUSION.

La simulation numérique du transfert de chaleur dans un canal partiellement rempli d'une matière poreuse est l'objectif principal de cette étude. On commence par le cas d'écoulement dans le canal sans milieu poreux, l'écoulement développé est de Poiseuille, la pression chute axialement, la température subit un refroidissement axial et transversal progressif et le nombre de Nusselt diminue axialement. Dans le canal partiellement rempli par une matière poreuse de conductivité thermique égale à 5.77 celle du fluide et une porosité 0.8 avec Da = 10⁻², on trouve que l'écoulement est différent de celui de Poiseuille. On trouve une diminution de température plus rapide que celle du cas du canal sans

milieu poreux. Une chute axiale continue de pression, concentrée dans le deuxième tiers du canal, très supérieure à celle du canal sans milieu poreux. L'utilisation du milieu poreux entraîne une forte augmentation du nombre de Nusselt. Par conséquent, une forte chute de pression est le prix qui doit être payé en échange pour le gain d'augmentation considérable du transfert thermique. Dans le premier cas de la convection mixte ($Gr = 10^4$), la différence entre les résultats de ce cas et ceux du cas de la convection forcée est presque négligeable. Avec $Gr = 10^5$, il y a une petite différence entre les résultats de la convection forcée et mixte, qui est illustrée par la différence des nombres de Nusselt des deux parois. Les résultats montrent que la convection mixte devient significative pour des nombres de Grashof égaux ou supérieurs à 10^5 . L'utilité pratique de ces résultats est l'amélioration du refroidissement des instruments électroniques en les couvrant par des couches poreuses et aussi bien dans les échangeurs de chaleur. Comme perspectives, nous envisageons de faire des études spécifiques avec des couches poreuses non homogènes et anisotropes, avec des propriétés thermophysiques variables, à un équilibre thermique non local et avec l'inclusion de l'effet de la dispersion thermique.

REFERENCES

[1] Bories S., & Prat M., 2005. Transferts de chaleur dans les milieux poreux, Techniques de l'Ingénieur. *Traité Génie Energétique*, B8 (250),1-32.

[2] Nield D.A. & Bejan A., 1999. Convection in porous media, 2nd Edition. Springer-Verlag, New York, 546p.

[3] Kaviany M., 1985. Laminar flow through a porous channel bounded by isothermal parallel plates, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 28 (4), 851-858.

[4] Chou F.C., Cheng C.J. & Lien W.Y., 1992. Analysis and experiment of non-Darcian convection in horizontal square packed-sphere channels- II. Mixed convection, *International Journal of Heat Mass Transfer* vol. 35(5),1197-1207.

[5] Sung H.J., Kim S.Y. & Hyun J.M., 1995. Forced convection from an isolated heat source in a channel with porous medium, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol.16 (6), 527-535.

[6] Jiang P.X., Wang Z., Ren Z.P. & Wang B.X., 1999. Experimental research of fluid flow and convection heat transfer in plate channels filled with glass or metallic particles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.20, Issue.1, 45-54.

[7] Rahimian M.H., Pourshaghagh A., 2002. Direct simulation of forced convection flow in a parallel plate channel filled with porous media, *International Communication of Heat Mass Transfer*, Vol. 29 (6), 867-878.

[8] Jiang P. X., Li M., Ma Y. C. & Ren Z. P., 2004. Boundary conditions and wall effect for forced convection heat transfer in sintered porous plate channels, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol .47, 2073–2083.

[9] Jiang P. X., Li M., Lu T. J., Yu L. & Ren Z. P., 2004. Experimental research on convection heat transfer in sintered porous plate channels, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 47, 2085–2096.

[10] Jiang P. X., Si G. S., Li M. & Ren Z. P., 2004. Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer of air in non-sintered porous media, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, 545–555.

[11] Chang P.Y., Shiah S.W. & Fu M.N., 2004. Mixed convection in a horizontal square packed-sphere channel under axially uniform heating peripherally uniform wall temperature, *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, Taylor & Francis, Vol. 45 (8), 791-809.

[12] Hadim H. & North M., 2005. Forced convection in a sintered porous channel with inlet and outlet slots, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, 33–42.

[13] Tzeng S.C., Jeng T.M. & Wang Y.C., 2006. Experimental study of forced convection in asymmetrically heated sintered porous channels with/without periodic baffles, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 49, 78-88.

[14] Jaballah S., Bennacer R., Sammouda H. & Belghith A., 2006. Simulation of mixed convection in a channel partially filled with porous media, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, *International Journal*, Vol. 6 (6), 335 – 341.

[15] Hetsroni G., Gurevich M. & Rozenblit R., 2007. Sintered porous medium heat sink for cooling of high-power mini-devices, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 27, 259–266.

[16] Benmerkhi M., 2007. Transfert de chaleur et de matière dans un canal rempli partiellement d'une matière poreuse. Thèse de Magistère en Physique Energétique. Université de Constantine, Algérie. 101p.

[17] Patankar S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. 197p.

[18] Bejan A. & Kraus A. D., 1948. *Heat transfer handbook*. USA, 1483p.

Nomenclature

C_f : Coefficient du terme de Forchheimer, ($C_f = 0.55$).
 Da : Nombre de Darcy, $Da=K/H^2$.

Gr_t : Nombre de Grashof thermique,

$$Gr_t = \frac{g\beta_T (T_0 - T_1) H^3}{\nu^2}.$$

H : Hauteur du canal (m).

h_t : Coefficient du transfert de chaleur local ($W/m^2 \cdot K$).

K : Perméabilité du milieu poreux (m^2).

k : Rapport des conductivités thermiques, (milieu poreux / fluide).

k_f : Conductivité thermique du fluide ($W/m \cdot K$).

k_m : Conductivité thermique du milieu poreux ($W/m \cdot K$).

L : Longueur du canal (m).

Nu : Nombre de Nusselt local, $Nu=2h_t H/k_f$.

Nu_{moy} : Nombre de Nusselt moyen.

P : Pression (Pa).

Pr : Nombre de Prandtl, $Pr = \nu / \alpha$

Re : Nombre de Reynolds, $Re = U_0 H / \nu$.

T : Température adimensionnelle.

T_m : Température moyenne adimensionnelle.

t : Temps adimensionnel.

U : Vitesse horizontale adimensionnelle.

V : Vitesse verticale adimensionnelle.

x : Coordonnée axiale adimensionnelle.

y : Coordonnée verticale adimensionnelle.

Lettres grecques

α : Coefficient de diffusion thermique (m^2/s).

β_T : Coefficient d'expansion thermique ($1/K$).

ν : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

ϕ : Porosité du milieu poreux,

$$\phi = \frac{\text{Volume des pores du milieu poreux}}{\text{Volume total du milieu poreux}}.$$

Indices

0 : Fait référence à l'entrée du canal.

1 : Fait référence aux parois du canal.

Etude de l'activité antibactérienne des huiles essentielles de la Sauge officinale : *Salvia officinalis* L. sur quelques entérobactéries pathogènes

Salah Benkherara, Ouahiba Bordjiba & Ali Boutlelis Djahra

Laboratoire de Biologie Végétale et Environnement, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

Accepté le : 01/09/2011

ملخص:

إن بروز الكائنات المجهرية الممرضة يطرح حاليا مشكلا للصحة العمومية و بصفة جد مقلقة. في الواقع إن مقاومة الجراثيم للمضادات الحيوية تجعل العلاج الإستدوائي غير فعال في بعض الأحيان وتستوجب البحث عن عوامل ضد جرثومية جديدة. إن اللجوء إلى النباتات الطبية يمثل واحدة من أهم السبل الواجب استغلالها، ولهذا الغرض نحن معنيون بدراسة النشاط ضد البكتيري لأوراق نبات (*Salvia officinalis* L.) لمنطقة شمال شرق الجزائر. في هذه الدراسة تطرقنا إلى استخلاص وتعريف الزيوت الطيارة و كذا تقييم القدرة ضد البكتيرية لهذه الزيوت تجاه بعض الأنواع البكتيرية الممرضة (entérobactéries). بينت النتائج المتحصل عليها أن هذه الزيوت المستخلصة مكونة من تسعة عشر مركبا وأن أكثرها نسبة هو التوجون (α - et β -thujone). وكشفت نتائج الاختبار ضد البكتيري أن تثبيط نمو هذه الكائنات يتغير حسب النوع البكتيري وكذا تركيز المستخلص النباتي. وعموما فقد أظهرت هذه الزيوت نشاطا تثبيطيا جد هام حيث أن أقطار التثبيط المتحصل عليها تفوق في غالبها تلك المسجلة في حالة وجود المضاد الحيوي. هذه النتائج هي جد واعدة وتحمل تأكيدا علميا للاستعمال الواسع لهذا الصنف النباتي وبهذا فان تأثير المركبات النباتية المستخلصة بإمكانه مزاحمة تأثير المضادات الحيوية.

الكلمات المفتاحية : نشاط ضد بكتيري - زيوت طيارة - *Salvia officinalis* L. - Entérobactéries - شمال شرق الجزائر ي .

Résumé

L'émergence de microorganismes pathogènes, pose actuellement un problème de santé publique particulièrement préoccupant. En effet, la résistance des germes aux antibiotiques rend quelques fois le traitement thérapeutique inefficace et impose la recherche de nouveaux agents antimicrobiens. Le recours aux plantes médicinales constitue alors une des plus intéressantes pistes à explorer ; c'est dans cette perspective que nous nous sommes intéressés à l'étude de l'activité antibactérienne des feuilles de la Sauge officinale (*Salvia officinalis* L.) de la région du nord-est Algérien. Dans cette étude, nous avons procédé à l'extraction et l'identification des huiles essentielles ainsi que l'évaluation de leur pouvoir antibactérien vis-à-vis de quelques entérobactéries pathogènes. Les résultats obtenus ont démontré que l'huile essentielle isolée est formée de dix-neuf (19) composés terpéniques avec une prédominance de la thujone (α - et β -thujone). D'une manière générale, les huiles essentielles obtenues ont un pouvoir antibactérien intéressant sur les germes étudiés. Les zones d'inhibition enregistrées dépassent le plus souvent celles provoquées par l'antibiotique utilisé. Ces résultats sont prometteurs et apportent une validation scientifique quant à l'usage massif de cette espèce. Ainsi l'effet des substances naturelles extraites des plantes médicinales pourraient bien rivaliser celui des antibiotiques.

Mots clés : Activité antibactérienne - Huiles essentielles - *Salvia officinalis* L. - Entérobactéries - Nord-Est algérien.

Abstract

The emergence of pathogen microorganisms is currently a public health concern. Indeed, the resistance of germs to antibiotics makes sometimes the therapeutic treatment inefficient and requires the search for new antimicrobial agents. The use of medicinal plants is then one of the most interesting paths to explore; it is in this perspective that we were interested to study the antibacterial activity of leaves of Sage (*Salvia officinalis* L.) in north-eastern Algeria. In this study, we performed the extraction and identification of essential oils and the evaluation of their antibacterial activity against some pathogen Enterobacteriaceae. The results showed that the isolated essential oil is composed of nineteen (19) terpene compounds with a predominance of thujone (α - and β -thujone). The antibacterial tests revealed that growth inhibition depends on the bacterial species and the concentration of the tested product. In general, the obtained essential oils have an interesting antibacterial power against all studied germs. The recorded inhibition zones most often exceed those caused by the used antibiotic. These results are promising and provide a scientific validation to the massive use of this species. Thus the effect of natural substances extracted from medicinal plants may well rival that of antibiotics.

Auteur correspondant : salahbn07@yahoo.fr

Keywords: Antibacterial activity - Essential oils - *Salvia officinalis* L. - Enterobacteriaceae - North-East Algeria.

1. INTRODUCTION

L'utilisation des plantes pour se soigner date de la préhistoire et tous les peuples ont cette vieille tradition. Malgré les efforts des chimistes dans la synthèse de nouvelles molécules, plus de 25 % des médicaments prescrits dans les pays développés dérivent directement ou indirectement des plantes [1]. Cependant, en tant que source de médicaments, les plantes restent encore sous exploitées surtout dans le domaine de la microbiologie médicale [2].

Selon l'O.M.S, plus de 22000 espèces végétales ont été inventoriées comme plantes médicinales [3]. Leur usage a eu un déclin avec le développement de la chimie de synthèse, toutefois les effets indésirables des médicaments ont ravivé l'intérêt des scientifiques pour les plantes médicinales. C'est ainsi que de nouvelles recherches ont vu le jour, notamment de l'espoir de traiter certaines maladies infectieuses par les huiles essentielles extraites des plantes aromatiques, ce qui est de plus en plus fondé du fait de l'apparition de résistante des germes aux antibiotiques. Il est connu depuis l'Antiquité que les huiles essentielles isolées des espèces végétales présentent une activité antiseptique non négligeable. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines : pharmacie, cosmétique, agro-alimentaire... À la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, plusieurs travaux scientifiques relataient de l'action antiseptique de plusieurs huiles essentielles [4] telles que celles de l'Origan d'Espagne, Thym (*Thymus vulgaris*), Cannelle (*Cinnamomum zeylanicum*), Sarriette (*Satureia montana*), Girofle (*Eugenia*

caryophyllata), Pin (*Pinus sylvestris*), Cajeput (*Melaleuca leucadendron*), Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), Lavande (*Lavandula officinalis*), Myrte (*Myrtus communis*), Géranium rosat (*Pelargonium graveolens*). Ces huiles sont douées de propriétés antimicrobiennes à des degrés divers et reconnues depuis longtemps ; ce sont des propriétés antifongiques [5, 6, 7, 8], antivirales [9], antiparasitaires [10] et également des propriétés insecticides [11, 12]. Les huiles essentielles qui présentent une bonne activité antibactérienne sont aussi de bons antifongiques [13, 14].

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à une espèce végétale très répandue dans le bassin méditerranéen et très utilisée pour ses innombrables vertus thérapeutiques. Il s'agit de *Salvia officinalis* L. ou Saugé officinale. C'est une espèce de la famille des Lamiacées, de 30 à 60 cm de hauteur, de tiges formant des rameaux quadrangulaires dressés et velus, aux feuilles ovales et allongées, gris verdâtre en raison d'une pubescence cotonneuse sur la face inférieure, ont une odeur aromatique caractéristique et de petites fleurs bleu-violettes qui s'épanouissent en juin ou juillet [15, 16]. L'objectif est de vérifier la spécificité de cette espèce végétale sur le plan antiseptique et notamment l'activité antibactérienne des huiles essentielles sur quelques entérobactéries pathogènes qui sont : *Proteus mirabilis*, *Escherichia coli* 12, *Escherichia coli* 1554, *Escherichia coli* 1429, *Escherichia coli* ATCC 25922.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériels utilisés

Le matériel végétal utilisé est constitué des feuilles de l'espèce : *Salvia officinalis* L. ou Sauge officinale. Les échantillons ont été récoltés au niveau du Parc National d'El-Kala (P.N.E.K) au nord-est algérien, tôt le matin et au moment de débourement de la plante. Le matériel microbiologique ayant fait l'objet de cette étude est constitué de cinq entérobactéries pathogènes responsables d'infections plus ou moins graves. Elles proviennent d'un laboratoire d'analyses médicales situé à la wilaya d'Annaba. La gélose Mueller-Hinton (pH = 5,7) est le principal milieu de culture utilisé. Afin de comparer l'effet antibactérien des huiles essentielles extraites avec celui des antibiotiques, on a utilisé la rifampicine à 5 µg/ml [*Rifampicine (5 µg/ml), lot : 070531*]. C'est un antibiotique qui inhibe l'activité de l'ARN polymérase – ADN dépendante dans les cellules sensibles. Il est constitué de 50 mg d'isoniazide et 300 mg de pyrazinamide et possède une activité excellente sur les germes à Gram positif : *Staphylocoques* et *Entérocoques* [17, 18, 19].

2.2 Méthodes suivies

2.2.1 Extraction et identification des huiles essentielles

L'extraction des huiles essentielles est effectuée par entraînement à la vapeur d'eau avec une prise d'essai de matière sèche de l'ordre de 5 à 50 g, portée à ébullition pendant 3h avec une vitesse de distillation de 2 à 4 ml par minute [20].

L'analyse des huiles essentielles extraites est faite à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse de type Shimadzu équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (FID) et muni d'une colonne capillaire en silice fondue de type QP20 10C25 FS-OV1701 de 25 m de longueur, 0,25 mm de diamètre interne et 0,25 µm d'épaisseur de film. La

température de la colonne est programmée de 60 à 200° C à raison de 3° C/ min pendant 13 minutes. La température de l'injecteur est fixée à 240° C et celle de détecteur (FID) à 250° C. Le débit de gaz vecteur (Hélium) est fixé à 1.5 ml/min. Le volume de l'échantillon injecté est 0,1 µl de l'huile pure diluée à 10 % dans l'hexane.

Les composés de l'huile essentielle sont identifiées par leurs indices de rétention sur la colonne (L'indice de rétention est calculé par rapport aux temps de rétention d'une série d'alcane linéaire (C9 –C28)) et par la comparaison de leurs spectres de masse avec ceux des composés chimiques répertoriés dans une bibliothèque commerciale (ov.17/ GCMS Rcal time analysis). Le pourcentage de chaque composé est déterminé à partir des aires de pics sans tenir compte des facteurs de correction en supposant que tous les constituants ont des coefficients de réponse voisins.

2.2.2. Activité Antibactérienne

L'activité antibactérienne est réalisée par la méthode de l'aromatogramme, c'est une technique de laboratoire identique à celle de l'antibiogramme. Ce dernier sert à tester la sensibilité d'une souche bactérienne vis-à-vis d'un ou de plusieurs antibiotiques.

L'aromatogramme est une méthode de mesure *in vitro* du pouvoir antibactérien des huiles essentielles. C'est l'équivalent d'un antibiogramme où les antibiotiques sont remplacés par les huiles essentielles [21, 22].

Principe de la méthode :

C'est une méthode de mesure *in vitro* de l'effet antibactérien de ou des substances actives extraites (principes actifs) qui consiste à déterminer le spectre d'activité de ces composés sur des espèces

bactériennes pour essayer de vérifier la sensibilité ou la résistance des germes pathogènes vis-à-vis de ces principes naturels.

Un disque (6 mm de diamètre) imprégné du produit à tester (HE pure, HE au 1/2, HE au 1/4) est placé sur une gélose (4 mm d'épaisseur ; dans des boîtes de Pétri de 90 mm de diamètre) préalablement inoculée avec la souche, s'humidifie et le produit diffuse radialement du disque dans la gélose en formant ainsi un gradient de concentration. Après une incubation de 18 à 24 heures à une température de 37 °C, si le produit est toxique pour l'espèce bactérienne, il se forme un halo ou une zone autour du disque. Plus grande est cette zone, plus l'espèce est sensible. Des disques témoins (Eau distillée stérile) et des disques de comparaison (Antibiotique) sont inclus dans les essais. Chaque essai a été réalisé en triplicata avec trois disques dans chaque boîte.

Suspensions bactériennes :

A partir des cultures bactériennes préalablement réactivées sur milieu Mueller-Hinton à une température de 37 °C pendant 24 heures, des suspensions bactériennes sont préparées dans de l'eau physiologique stérile et homogénéisées de façon à obtenir une concentration de l'ordre de 10^6 à 10^8 C.F.U/ ml. Après ensemencement des bactéries, les disques imprégnés du produit à tester sont appliqués.

3. RESULTATS

3.1. Extraction et identification des huiles essentielles

Une teneur moyenne de l'ordre de 1,52 ml pour 100 g de drogue végétale correspond à un taux de 1,52 % d'huiles essentielles (Tab. 1). Ces huiles sont de densité plus importante que celle de l'eau, d'un aspect liquide limpide fluide et mobile, de couleur jaune pâle et odeur agréable.

Tableau 1. Teneurs (ml) en huiles essentielles des feuilles de *Salvia officinalis* L.

Essai	Ess.1	Ess.2	Ess.3
Teneur	1,32	1,36	1,88
Teneur moyenne	1,52 ml		

Le profil du chromatogramme obtenu lors de l'identification des huiles essentielles (Fig. 1) a révélé la présence de dix-neuf composés terpéniques.

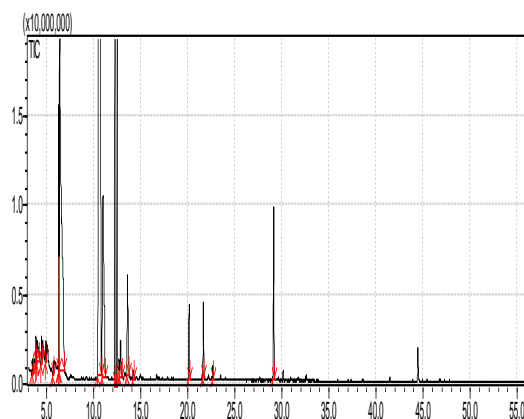


Figure 1. Profil de chromatogramme obtenu par CG / SM de l'huile essentielle isolée.

D'après le temps de rétention, la surface du pic de l'échantillon et la superficie du pic de l'étalon, nous avons pu identifier la nature de ces différents composés dont le plus abondant est l' α -Thujone (36,74 %), suivi du Cinéole (22,97 %), du Camphre avec une teneur moindre (11,34 %). Le β -Thujone vient en 4^{ème} position avec uniquement un pourcentage de 8,81 %.

On note également la présence de composés terpéniques non négligeables avec une teneur comprise entre 2,94 et 3,81 % tels que le Bornéol, la β -Humulène, l'Eucalyptol et le L-Camphre. Le reste des composés identifiés ont des teneurs relativement faibles avec des valeurs comprises entre 0,20 % pour le D-Limonène et 1,54 % pour le Caryophyllène (Tab. 2).

Tableau 2. Composés terpéniques identifiés par CG/SM de l'huile essentielle obtenue.

N pic	(TR)	S (%)	Composé
1	3,460	0,22	α -Pinène
2	3,822	0,41	Camphène
3	3,951	1,06	Ocimène
4	4,409	0,37	β -Pinène
5	4,859	0,25	β -Myrcène
6	5,667	0,20	D-Limonène
7	6,253	3,27	Eucalyptol
8	6,345	22,97	Cinéole
9	10,525	36,74	α -Thujone
10	10,950	8,81	β -Thujone
11	12,247	11,34	Camphre
12	12,435	3,81	L-Camphre
13	12,816	1,10	β -Linalool
14	13,560	2,94	Bornéol
15	14,166	0,25	α -terpénol
16	20,106	1,54	Caryophyllène
17	21,617	1,34	α -caryophyllène
18	22,638	0,23	α -longipinène
19	29,112	3,15	β -Humulène

TR : temps de rétention, S : Superficie

3.2. Activité antibactérienne

L'évaluation de l'activité antibactérienne des huiles essentielles extraites face aux différentes souches bactériennes étudiées à travers les tests *in vitro*, a montré une énorme hétérogénéité dans les résultats obtenus (Fig. 2). Les souches bactériennes testées ont réagi plus ou moins bien selon la concentration du produit végétal extrait. Généralement, les concentrations les moins élevées ont provoqué un effet inhibiteur plus important de la majorité des souches. Ces huiles semblent être plus efficaces que l'antibiotique utilisé. Parmi toutes les concentrations utilisées, les HE diluées au 1/4 semblent plus efficaces par rapport aux autres concentrations vis-à-vis des germes étudiés avec des zones d'inhibition comprises entre 19,35 et 29,96 mm de diamètre.

De l'ensemble des résultats obtenus, la souche *Escherichia coli* 1429 a montré une grande sensibilité sous l'action des huiles essentielles et de l'antibiotique avec une

moyenne d'inhibition de l'ordre de 30 mm de diamètre. Cependant, la souche de référence *Escherichia coli* ATCC 25922 et la souche *Escherichia coli* 12 ont réagi de façon plus ou moins insensible vis-à-vis des huiles essentielles alors qu'elles sont complètement résistantes à l'antibiotique. Concernant la souche *Proteus mirabilis*, elle n'a montré aucune différence dans le degré de sensibilité par rapport aux autres souches d'*Escherichia coli* sauf qu'elle est très sensible face à l'antibiotique utilisé.

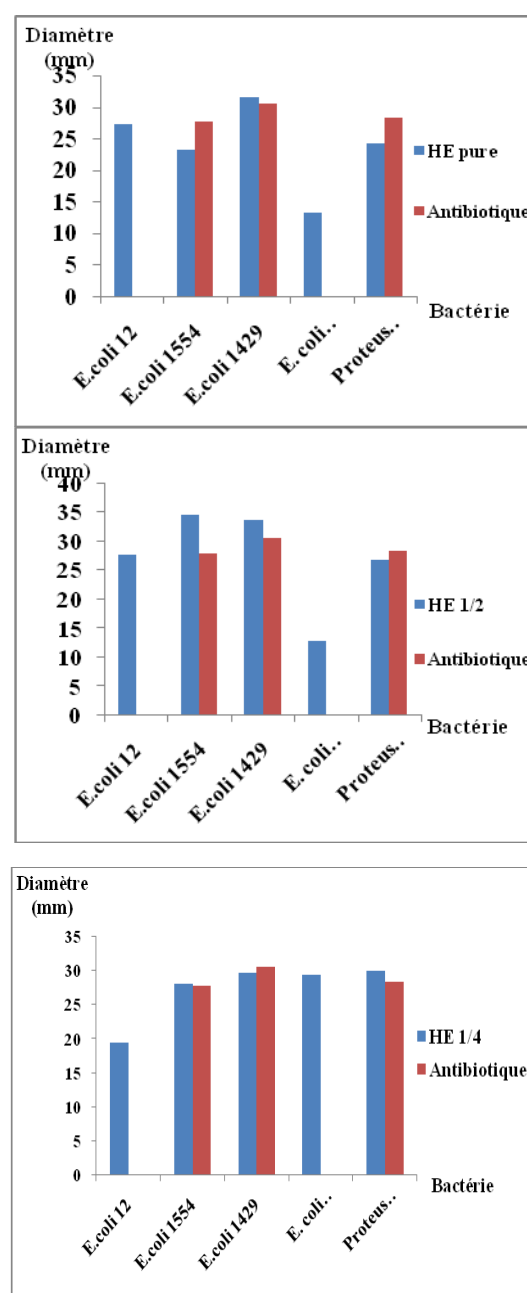


Figure 2. Diamètres des zones d'inhibition de la croissance des bactéries vis à vis des produits testés.

4. DISCUSSION

A travers l'étude phytochimique des feuilles de l'espèce végétale *Salvia officinalis* L. et à partir de l'extraction, la séparation et l'identification des huiles essentielles ; l'espèce s'est révélée très riche en substances volatiles avec un rendement de l'ordre de 1,52 % et un chémotype formé de dix-neuf composés terpéniques dont le plus abondant est la thujone (mélange α - et β - thujone).

A la lumière de ces résultats et par comparaison avec d'autres recherches, des résultats plus ou moins similaires ont été obtenus sur la même espèce végétale dont les rendements d'huiles essentielles varient entre 1 et 2,5 % et avec environ 60 % de thujone (mélange composé α - et β - thujone) [23]. Cependant, dans un autre travail réalisé sur la Sauge officinale de l'Espagne, l'auteur a montré la présence d'un chémotype à différents composés terpéniques avec une prédominance de Camphre (11 à 36 %), suivi de Cinéole (11 à 25 %) et très peu de thujone (< 0,5 %) [16]. Cette divergence dans les résultats explique le rôle que peuvent jouer les facteurs environnementaux et climatiques sur la composition biochimique et sur la qualité de l'extrait de l'espèce végétale.

Des tests de l'activité antibactérienne évaluée, il ressort que les huiles essentielles de *Salvia officinalis* L. sont très efficaces contre toutes les bactéries testées et plus particulièrement à la concentration $\frac{1}{4}$. Les meilleurs résultats sont constatés envers des souches d'*Escherichia coli* que celle de *Proteus* qui ne joue qu'occasionnellement un rôle pathogène.

Ces résultats meilleurs et cet effet positif de ces substances naturelles contre les bactéries a été signalé par de nombreux travaux notamment ceux réalisés sur cinq huiles essentielles de l'Origan et de Thym qui ont provoqué des propriétés bactériostatiques et bactéricides les plus fortes, suivi de celles de Laurier et de Clou

de girofle sur *Escherichia coli* sous des températures variables [24]. Dans ce même contexte, les huiles essentielles de Clou de girofle et d'Origan en particulier le Thymol et l'Eugénol ont provoqué la lyse cellulaire des bactéries associée à une rapide mortalité sur *Escherichia coli* et *Bacillus subtilis* [25]. Par ailleurs, l'efficacité thérapeutique du Carvacrol et de l'Eugénol, deux composants phénoliques d'huiles essentielles, a été affirmée contre la Candidose buccale induite de façon expérimentale chez des rats avec un système immunitaire déprimé [26].

Une investigation récente réalisée sur l'activité des huiles essentielles isolées de plantes de l'Origan et de Laurier, a signalé un pouvoir inhibiteur sur des bactéries Gram (+) et Gram (-) entre autre l'inhibition du développement de la souche *Escherichia coli* [27]. On cite encore des recherches très récemment publiées sur six huiles essentielles obtenues à partir de plantes cultivées dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : *Lavandula latifolia* et *Lavandula angustifolia*, *Rosmarinus officinalis*, *Origanum vulgare*, *Thymus vulgaris* et *Thymus zygis* où les trois dernières présentent la meilleure activité antibactérienne vis-à-vis des souches d'*Escherichia coli* [28], ainsi que d'autres travaux réalisés sur les germes nosocomiaux des infections hospitalières dont l'auteur a évoqué l'efficacité d'une trentaine d'huiles essentielles réputées pour leur activité antimicrobienne sur les souches bactériennes telles que *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus* [29]. De même, les huiles essentielles isolées d'une Lamiacée *Ocimum gratissimum* ont provoqué une forte inhibition de la croissance de la souche *Escherichia coli* ATCC 25922 qui a fait également l'objet de notre étude [30]. Ces mêmes huiles essentielles ont fortement inhibé la croissance des bactéries isolées à partir des pus des malades hospitalisés [31].

D'ailleurs, nos résultats sont comparables avec ceux obtenus concernant l'effet des huiles essentielles extraites des feuilles de *Lippia multiflora* L. où la puissance antibactérienne sur quelques entérobactéries a été démontrée [32].

L'activité biologique des principes actifs entre autre celle des huiles essentielles est liée à leur Chémotype c'est-à-dire la ou les molécules biologiquement actives et majoritairement présentes, leur composition ou les groupes fonctionnels des composés majoritaires (alcool, phénols, composés terpéniques et cétoniques) et à leurs effets synergiques car une huile essentielle contient souvent 50 à 100 molécules biochimiques différentes. Le plus souvent, l'action des huiles essentielles est assimilée à un effet bactériostatique. Cependant, certains de leurs constituants chimiques semblent avoir des propriétés bactéricides.

Cette activité antibactérienne de substances naturelles s'explique par la lyse des membranes bactériennes. Les huiles essentielles, flavonoides, alcaloïdes voire même les tanins pourraient induire une fuite d'ions potassium au niveau de la membrane et par voie de conséquences des lésions irréversibles au niveau de cette membrane. Cette perméabilité au potassium est un effet précurseur de leur mort.

5. CONCLUSION

En guise de conclusion, il semble que la Sauge officinale ou *Salvia officinalis* L. est une espèce végétale de nature aromatique dont les huiles essentielles extraites de ses feuilles sont constituées de dix-neuf composés terpéniques avec une prédominance de la thujone (α - et β -thujone).

De l'activité antibactérienne évaluée, il ressort que les huiles essentielles possèdent un pouvoir antibactérien important sur les germes pathogènes étudiés. L'inhibition de la croissance varie en fonction de l'espèce bactérienne et de la concentration du produit testé. De toutes les souches testées,

quatre d'entre elles se sont montrées très sensibles vis-à-vis de ces substances naturelles qui sont : *Proteus mirabilis*, *Escherichia coli* 12, *Escherichia coli* 1554 et *Escherichia coli* 1429. Seule la souche de référence *Escherichia coli* ATCC 25922 qui a été moyennement résistante aux différentes concentrations d'huiles essentielles alors qu'elle est complètement résistante à l'antibiotique utilisé. Cette activité antibactérienne est due à la richesse des huiles essentielles en substances inhibitrices ; il s'agit probablement des phénols qui sont doués d'une forte activité antibactérienne. La puissance de cette activité prouve de plus en plus l'efficacité de ces substances face à ces bactéries pathogènes. D'autre part, de nombreuses bactéries ont récemment développé une résistance à la plupart des antibiotiques. De ce fait, nous pensons que les principes actifs isolés de diverses plantes médicinales pourraient présenter une alternative intéressante à l'utilisation des antibiotiques.

Enfin, il est intéressant d'extraire les autres principes actifs de la plante et de tester leur pouvoir antibactérien sur un large panel de souches bactériennes et fongiques devenues à l'heure actuelle multirésistantes aux antibiotiques.

REFERENCES

- [1] Ibrahim D., Osman H., 1995. Antimicrobial activity of cassia alata from Malaysia, *J. Ethnopharmacol.*, Vol. 45, 151-156.
- [2] Cowan M.M., 1999. Plants products as antimicrobial agents, *Clinical Microbiology Review*, Vol. 12, 564-582.
- [3] Duraffourd C., Lapraz J.C., Chemli R., 1997. La plante médicinale de la tradition à la Science. Ed. Grancher. Paris, p.538-539.
- [4] Bertrand G., 1983. Le goménol, *Bull Gén de Thér Ann Inst Pasteur*, 153-154.

- [5] Azzouz M.A., Bullerman L.R., 1982. Comparative antimycotic effects of selected herbs and spices, plant components and commercial antifungal agents, *J. Food Protect.*, Vol. 45, 1248-1301.
- [6] Akgul A., Kivanc M., 1988. Inhibitory effects of selected Turkish spices and oregano components on some food borne fungi, *International Journal of Food Microbiology*, Vol. 6, 263-268.
- [7] Jayashree T., Subramanyam C., 1999. Antiaflatoxic activity of eugenol is due to inhibition of lipid peroxidation, *Letters in Applied Microbiology*, Vol. 28, 179-183.
- [8] Mari M., Bertolini P., Pratella G.C., 2003. Non-conventional methods for the control of post-harvest pear diseases, *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 94, 761-766.
- [9] Bishop C.D., 1995. Antiviral activity of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* (Maiden and Betche) Cheel (tea tree) against tobacco mosaic virus, *Journal of Essential Oil Research*, Vol. 7, 641-644.
- [10] Pessoa L.M., Morais S.M., Bevilacqua C.M.L., Luciano J.H.S., 2002. Anthelmintic activity of essential oil of *Ocimum gratissimum* Linn. And *eugenol* against *Haemonchus contortus*, *Veterinary Parasitology*, Vol. 109, 59-63.
- [11] Konstantopoulou I., Vassilopoulou L., Mavragani-Tsipidou P., Scouras Z.G., 1992. Insecticidal effects of essential oils: A study of the effects essential oils extracted from eleven Greek aromatic plants on *Drosophila auraria*, *Experientia*, Vol. 48, 616-619.
- [12] Karpouhtsis L., Pardali E., Feggou E., Kokkini., Scouras Z.G., Mavragani-Tsipidou P., 1998. Insecticidal and genotoxic activities of oregano essential oils, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 46, 1111-1115.
- [13] Pellecuer J., Roussel J.L., Andary C., 1973. Propriétés antifongiques comparatives des essences de trois Labiées méditerranéennes : Romarin, Sarriette et Thym, *Travaux de la Société de pharmacie de Montpellier* 3, 584-585.
- [14] Pellecuer J., Allegrini J., Buochberg S., 1974. Etude in vitro de l'activité antibactérienne et antifongique de l'essence de *Satureia montana*, *J. Pharm. Belg* 2., 137-144.
- [15] Lacoste S., 2006. Les plantes qui guérissent. Ed. LEDUC.S. Paris. 331-332.
- [16] Fleurentin J., 2008. Plantes médicinales : Traditions et thérapeutique. Ed. OUEST – France. 92-93.
- [17] Ganescu I., Bratulescu G., Lilea B., Ganescu A., 2002. Anions complexes du chrome en analyse et le contrôle des médicaments, détermination de la Rifampicine, *Acta. Chim. Slov.*, Vol. 49, 339-340.
- [18] Couraud S., Girodet B., Vuillermoz S., Vincent M., 2006. Thrombopénie immunoallergique à la rifampicine, à propos d'un cas Rifampin induced thrombocytopenia, *Revue Française d'Allergologie*, Vol. 46, 656-658.
- [19] Yala D., Merad A.S., Mohamedi D., Ouar Korich M.N., 2001. Résistance Bactérienne Aux Antibiotiques, *Médecine du Maghreb*, Vol. 91, 12-13.
- [20] Bruneton J., 1999. Pharmacognosie : Phytochimie. Plantes Médicinales. Ed. TEC & DOC., Paris, 239-243.
- [21] Belaïche P., 1979. Traité de Phytothérapie et d'Aromathérapie, Tome 1. Ed. Maloine. Paris, 136-138.
- [22] Girault M., Bourgeon J., 1971. Les cahiers de biothérapie, Vol. 29, d'après <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aromatogramme>.

- [23] Brieskorn C.H., 1991. Seine inhaltsstoffe und sein therapeutischer wert, *Z. Phytotherapie.*, Vol. 12, 61-69.
- [24] Burt S.A., 2003. Antibacterial activity of select plant essential oils against *Escherichia Coli* O 157: 47, *Lett. Appl. Microbial.*, Vol. 36, 162-167.
- [25] Rhayour K., 2003. Mechanism of bactericidal action of Oregano and Clove essential oils and their phenolic major components in *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*, *Journal of essential oil research*, 60-62.
- [26] Chami F., Chami N., Bennis S., Bouchikhi T., Remmal A., 2005. Oregano and Clove essential oils induced surface alteration of *Saccharomyces cerevisiae*, *Phytother. Res.*, Vol. 19, 405-408.
- [27] Ohno T., Kila M., Yamaoka Y., Imamura S., Yamamoto T., Mitsufuji S., Kodama T., Kaschima K., Imanishi J., 2003. Antimicrobial activity of essential oils against *Helicobacter pylori*, *Helicobacter*, Vol. 8, 207-215.
- [28] Kaloustian L., Chevalier J., Mikail C., Martino M., Abou L., Vergnes M.F., 2008. Etude de six huiles essentielles : composition chimique et activité antibactérienne, *Phytothérapie*, 160-164.
- [29] Ezzaoui S., 2007. Action bactéricide des huiles essentielles sur des bactéries multirésistantes responsables des infections nosocomiales, Thèse de doctorat biologie, Univ Mohamed V, Rabat, Maroc, 210p.
- [30] Oussou K.R., Yolou S., Boti J.B., Guessennd K.N., Kanko C., Ahibo C., Casanova J., 2008. Etude chimique et activité antidiarrhéique des huiles essentielles de deux plantes aromatiques de la Pharmacopée Ivoirienne, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 24, 94-103.
- [31] N'dounga M. , Ouamba J.M., 1997. Antibacterial and antifungal activities of essential oils of *Ocimum gratissimum* and *O. basilicum* from Congo, *Fitoterapia*, Vol. 68, 191-192.
- [32] Pelissier Y., Kone D., Loukou Y., Marion C., Nanga Y., Casadebaig J., 1998. Etude chimique, toxicologique, bactériologique et clinique de l'huile essentielle de *Lippia multiflora* Mold, *EPPOS.*, 735-747.

Inventaire des Plantes Mellifères du Sud Ouest Algérien

Hadda¹ Laallam , Larbi² Boughediri & Samia¹ Bissati

¹ *Laboratoire Bio ressources Sahariennes, Université de Ouargla (Algérie).*

² *Département de Biologie, Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie).*

Accepté le : 06/09/2011

ملخص

بغية التعرف على الأنواع النباتية العسلية الرئيسية الموجودة بالجنوب الغربي الجزائري ، أجرينا تحقيق ميداني خلال العام (2007-2008) في المناطق التالية: النعامة، وبيشار. مكنتنا هذه الدراسة من اكتشاف مجموعة متنوعة من النباتات، منها نباتات المحاصيل مثل البقول والأعلاف وأشجار الفاكهة وأشجار الغابات وأشجار النخيل... ولكن لاحظنا أن أغلب الأنواع المعمرة عفوية وسريعة الزوال. أحصينا 66 نوعا من النباتات العسلية في مناطق الدراسة وحددنا لكل نوع من الأنواع فترة الإزهار وكذلك المواد التي تجنيها النحل منها.

الكلمات المفتاحية : أنواع النباتات العسلية - الجنوب الغربي الجزائري - النباتات المعمرة تلقائيا.

Résumé :

Afin de reconnaître les principales espèces de plantes mellifères spécifiques au sud ouest algérien, nous avons effectué des enquêtes de terrain au cours de la saison 2007-2008, au niveau des régions suivantes : Naama et Bechar. Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'existence d'une flore diversifiée, composée de plantes cultivées (cultures maraîchères et fourragères ; arbres fruitiers et forestiers ; palmier dattier ...) mais surtout d'espèces spontanées vivaces et éphémères. Nous avons recensé 66 espèces mellifères dans les régions étudiées en faisant apparaître leur période de floraison, les produits récoltés par l'abeille.

Mots clés : Espèces mellifères – Sud ouest algérien - Flore spontanée.

Abstract

In order to recognize the main species of melliferous plants in the south west of Algeria, we carried out field investigations during the season 2007-2008, across the following areas: Naama and Bechar. This study enabled us to put in evidence the existence of a diversified flora, composed of cultivated plants (gardening and forage cultures; fruit and forest trees; palm dattier...) but especially of vivacious and ephemeral spontaneous species. We counted 66 melliferous species in the studied regions while making appear their period of flowering, the products harvested by the bee.

Key words: Melliferous species - South west of Algeria - Spontaneous flora.

Auteur correspondant : nrhalimi@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Nous assistons depuis l'année 2004 à un développement remarquable de l'apiculture dans notre pays grâce au Plan National du Développement Agricole (PNDA) qui a soutenu des milliers de jeunes diplômés du secteur agricole à travers plusieurs wilayas du pays, dans le but d'accroître la production nationale en miel.

Le programme d'extension de cette spéculation a touché également certaines régions sahariennes, il s'agit des wilayas de Naâma et Béchar [1].

Ces régions caractérisées par une insuffisance des précipitations avec une irrégularité du régime des pluies, de fortes températures parcourues par des vents continuels en provoquant ainsi une évaporation intense [2]. Il en résulte donc un effet néfaste direct sur les plantes mellifères, ressource alimentaire des abeilles.

Selon Rabiet (1984), [3], les plantes mellifères les plus importantes sont celles qui présentent une productivité nectarifère élevée et régulière. Toutefois, les conditions atmosphériques influent sur la sécrétion nectarifère et la production du pollen. Le même auteur signale également qu'au pire, le nectar et le pollen peuvent être inexistantes.

Il en ressort que la réussite de l'apiculture dans ces régions est incontestablement liée à la disponibilité et l'abondance en espèces végétales. On note, aussi, l'existence d'une race d'abeille locale nommée « l'abeille saharienne » connue selon Ruttner et *al.* (1978), [4] ; Kenfar et *al.* (2007), [5] par son caractère de rusticité (thermo tolérance, capacité d'adaptation à la flore mellifère).

L'objectif principal de notre travail est la mise en évidence des principales espèces de plantes mellifères dans ces régions en vue de leur valorisation pour le développement de l'apiculture saharienne.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Présentation de la zone d'étude :

Nous avons mené cette étude dans les régions de Ben-Zireg, Beni-Ounif, Sfisifa (wilaya de Bechar) et Ain safra, Tiout, Moghrar et Djeniene (wilaya de Naama). Ces zones localisées sur les confins Algéro-Marocains sont positionnées au pied de l'atlas saharien à une Altitude d'environ 800 mètres, ce qui a pour effet la diminution des fortes températures et la réduction de l'évaporation et par conséquence de diminuer l'aridité (Fig. 1).

2.2 Méthodologie

Dans un premier temps nous avons effectué une pré enquête sur la situation actuelle de l'apiculture au niveau de deux wilayas, à savoir Naama et Bechar. Pour cela nous nous sommes basés sur des données statistiques, recueillies auprès des Directions des Services Agricoles (DSA), relatives aux Communes où se pratique l'apiculture, l'effectif des apiculteurs et des ruches, des types de ruches utilisées, de la production de miel, des races d'abeilles exploitées, ainsi que des contraintes du développement du secteur apicole. Cette étape nous a permis de localiser nos sites d'étude.

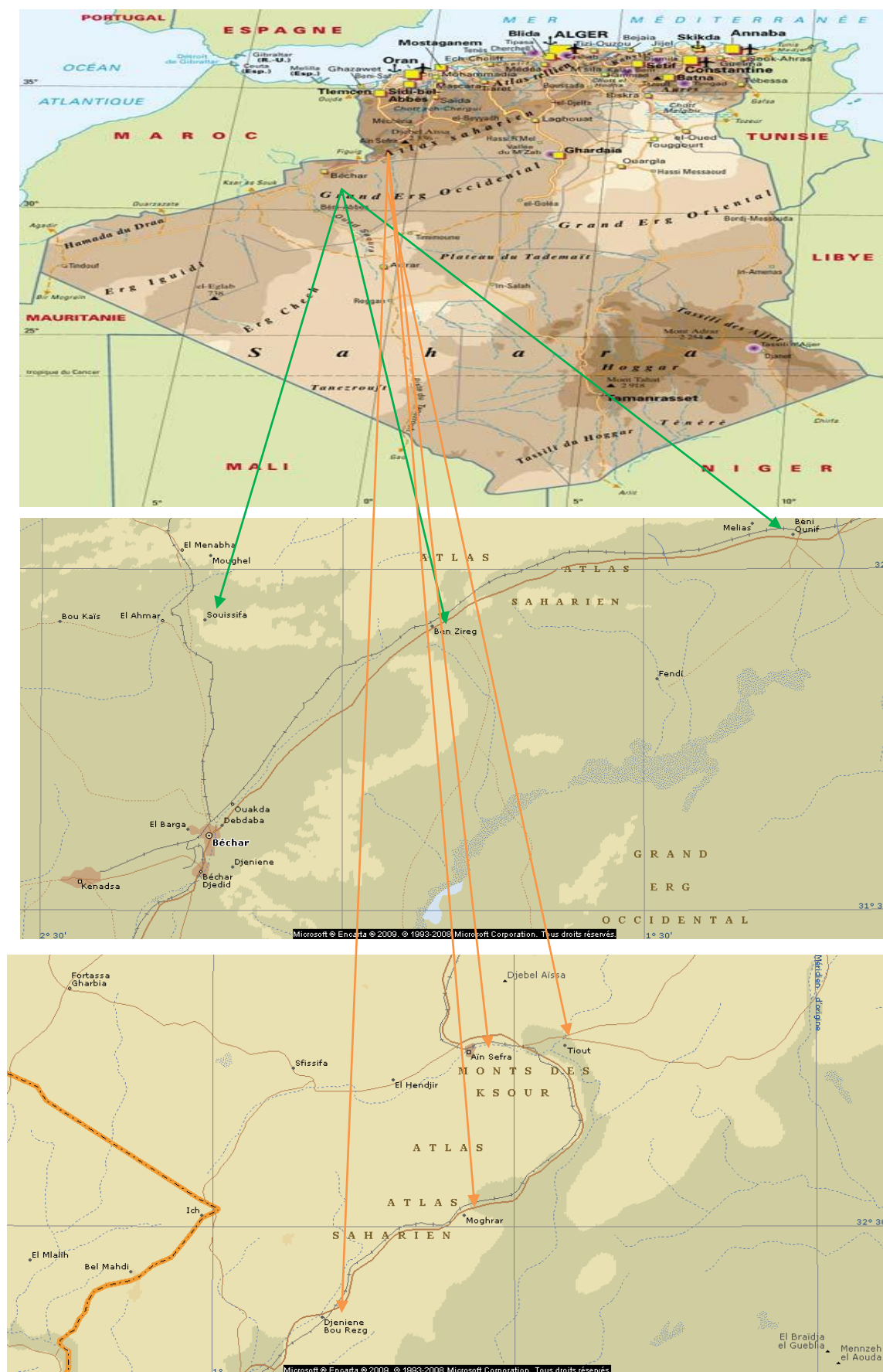


Figure 1. Situation géographique des zones d'étude.
(Source ENCARTA, 2009).

Bechar	■
Naama	■

En second lieu, nous avons confectionné un questionnaire pour la réalisation des enquêtes sur terrain auprès d'environ 20 apiculteurs sur une totalité de 50 (chiffre incontrôlable) durant l'année (2007-2008). Au cours de cette phase, nous avons récolté les informations sur la flore mellifère qui comporte des données botaniques (noms vernaculaires et périodes de floraison), et des informations sur les produits récoltés par l'abeille (pollen, nectar...). Enfin nous avons confectionné un herbier composé d'espèces florales entourant les ruchers au niveau de chaque wilaya.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

D'après cette étude, il ressort que les ressources mellifères de la zone étudiée sont constituées principalement d'une flore spontanée qui représente plus de 69% des végétaux inventoriés. Le reste est composé d'arbres fruitiers, de cultures maraîchères, de cultures fourragères, et d'arbres forestiers (Fig. 2).

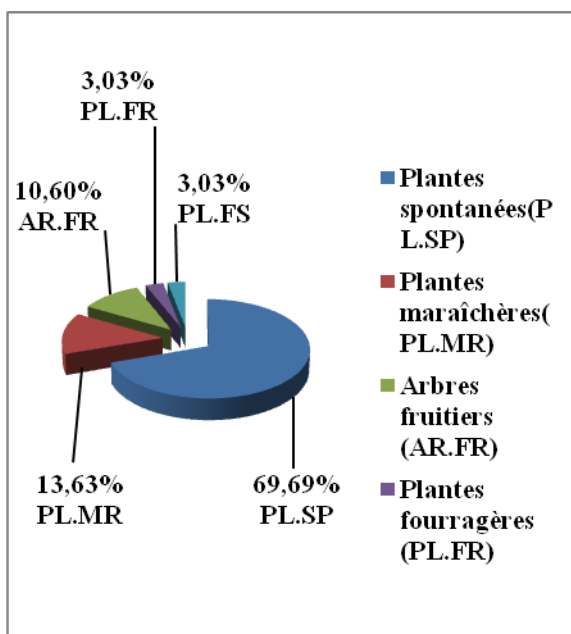


Figure 2. Répartition des ressources mellifères dans la région d'étude.

Le tableau n°1 met en évidence la liste d'espèces spontanées recensées dont l'analyse des résultats montre :

(Quarante Six) espèces caractérisées par leur production en nectar ou en pollen ou les deux en période de floraison printanière et hivernale. Ces plantes appartiennent à 21 familles botaniques dont les *Astéracées* qui sont les plus représentées. En effet, des travaux antérieurs effectués sur la composition de la flore saharienne ont démontré une prédominance de trois familles, à savoir : les *Astéracées*, les *Poacées* et les *Fabacées*, qui représentent plus du tiers (30 à 40%) de la flore [6] [7].

En revanche, l'estimation de l'importance, relative aux espèces mellifères les plus visitées par l'abeille sur terrain, au niveau de chaque famille, est une tâche délicate et assez longue. Elle ne peut être facilitée que par des analyses polliniques au laboratoire, c'est-à-dire la détermination du spectre pollinique des miels sahariens (travail en cours), ce qui va sans doute améliorer nos connaissances sur la composition réelle de la flore mellifère, des différents sites étudiés ; chose confirmée par plusieurs auteurs à l'échelle mondiale, nous signalons ici plus précisément ceux de Louveau (1968), [8]. Nous signalons que les espèces spontanées sont considérées comme étant une source alimentaire pour les abeilles et sont, également, très appréciées par la population de ces régions vu leurs vertus thérapeutiques.

Cette constatation a été confirmée par plusieurs travaux réalisés sur les bienfaits de ces plantes médicinales [9].

Le butinage des plantes médicinales par les abeilles comme par exemple *Zizyphus lotus*, *Peganum harmala*, *Cleome amblyocarpa*, *Pergularia tomentosa* utilisées en pharmacopée traditionnelle augmente, sans doute, les qualités thérapeutiques du miel saharien et font de lui un excellent et précieux produit local.

Le tableau 2 représente les espèces cultivées dont l'analyse montre ce qui suit : Sept espèces d'arbres fruitiers réparties sur deux (02) familles, dominées de palmeraie (Palmiers dattiers) sur lesquels les abeilles peuvent butiner le pollen, mais aussi les dattes pendant la période de disette (phénomène constaté par les apiculteurs de la région).

Neuf espèces de plantes potagères (maraîchères) réparties sur six (06) familles dont la période de floraison s'étale sur toute l'année.

Deux espèces fourragères, *Brassica oleracea*, et *Medicago sativa*. Cette dernière est caractérisée par une floraison qui s'étale sur toute l'année.

Deux espèces forestières, très nectarifères : *Eucalyptus globulus* et *Tamarix articulata*. Pour ce qui est de la répartition des espèces inventoriées dans les différentes zones d'études, nous avons constaté que la composition de ces dernières, particulièrement pour les espèces spontanées, est très comparable dans l'ensemble des régions. En effet, elles sont assez communes dans tout le Sud ouest. En ce qui concerne la production en miel, les enquêtes réalisées sur l'état actuel de l'apiculture dans la région témoignent que cette dernière dépend surtout de système d'élevage et de la saison (belle ou mauvaise). Généralement, une ruche moderne peuplée par la race *Apis mellifica intermissa* (l'abeille tellienne) produit 05Kg et peut aller jusqu'à 20Kg de miel (hausse). Une ruche traditionnelle peuplée par la race locale *Apis mellifica saharensis* (l'abeille saharienne) peut produire jusqu'à 30Kg. Actuellement, cette production reste insuffisante pour satisfaire les besoins locaux, en raison d'une faible exploitation de l'abeille saharienne en ruche moderne. Par ailleurs on ne peut négliger certaines contraintes pouvant limiter la production, telles que : les traitements phytosanitaires non sélectifs qui menacent le cheptel apicole de la région (disparition progressive des abeilles) ainsi que le

nombre réduit d'apiculteurs qualifiés. Ces facteurs constituent une entrave à la mise en place d'une apiculture hautement productive.

4. CONCLUSION

L'apiculture est considérée parmi les activités agricoles les plus répandues dans le monde en raison, du rôle des abeilles dans la pollinisation [10], ainsi que la production de miel. Cet aliment à très grande valeur nutritive est très apprécié par les populations.

Cette étude nous a permis de :

- Mettre en évidence que l'apiculture dans le Sud Ouest Algérien (cas de Bechar et Naama) dans l'état actuel n'arrive pas à satisfaire les besoins locaux en miel en raison d'une nécessité de moderniser les techniques apicoles, avec une promotion de l'élevage de *Apis mellifera sahariensis*, race locale de ces régions, qui possède de grandes potentialités en vue d'augmenter la production de miel et mettre en place une apiculture de qualité.
- Recenser 66 espèces mellifères, réparties sur 33 familles, avec une prédominance des *Astéracées*. Un calendrier de floraison a été établi, et nous a permis de constater que la région d'étude dispose de ressources mellifères non négligeables qui permettent aux abeilles de butiner durant toute l'année. Néanmoins, nous n'avons pu donner avec précision toutes les espèces mellifères d'un territoire aussi vaste en une année.

Nous précisons qu'une prospection plus large de ce territoire nous permettra probablement d'augmenter le nombre d'espèces butinées, en tenant compte de l'effet des conditions climatiques sur la sécrétion nectarifère, et la production en pollen de la flore inventoriée.

REFERENCES

- [1]- ITELV (Institut Technique des Elevages), 2004 : Rapport de Synthèse sur « La Biodiversité Importante pour l'Agriculture en Algérie » MATE-GEF/PNUD : Projet ALG/97/G31 27 p123.
- [2]- Ozenda P. 1991 : Flore de Sahara. (3ème édition). Ed. CNRS, Paris, 662 p.
- [3]- Rabiet E. 1984 : Plantes mellifères, plantes apicoles : Rapport entre les plantes et l'abeille domestique. Ed. RABIET E, 424p.
- [4]-Ruttner F., Tassencourt L., et Louveaux J. 1978: Biometrical statistical analysis of the geographic variability of *Apis mellifera* L. *Apidologie*, Vol. 9, 363-381.
- [5]-Kenfar A., Chenane N., et Mohammedi A. 2007 : Réhabilitation et préservation de l'abeille saharienne en Algérie. *In : Agriculture & Développement*. Ed. INVA Alger, n°4 pp 62-65.
- [6]- Ozenda P. 1983 : Flore de Sahara. (2ème édition). Ed. CNRS Paris, 662 p.
- [7]- Ozenda P 1953 : Flore du Sahara septentrional. Ed. CNRS Paris, 486p.
- [8]-Louveau J. 1968 : L'analyse pollinique des miels. *Traité de Biologie de l'abeille, Les produits de la ruche. Tome III.* Maison et Cie, 362 p.
- [9]- Chehma A. et Djebar M.R. 2008 : Les espèces médicinales spontanées du Sahara septentrional Algérien : distribution spatio-temporelle et étude ethnobotanique. *Synthèse.univ Annaba.*, n° 17, 36-45.
- [10]- Persson P. et Louveau J. 1984 : Pollinisation et productions végétales. Ed. INRA, Paris, 363p.

Tableau N°1 : les principales espèces mellifères spontanées dans la région d'étude.

Famille	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Période de floraison				Produits récoltés par l'abeille				Observations		
			Hiver	Printemps	Eté	Automne	Pollen	Nectar	miellat	propolis			
Plantes spontanées													
Anacardiaceae	<i>Pistacia atlantica</i>	Btam (Pistachier d'atlas)							X	X			Plante vivace
Apiaceae	<i>Pituranthos chlorantus</i>	Guezah(Férule)									X		Plante vivace
	<i>Ferula vesceritensis</i>	kalkha							X				
Asteraceae	<i>Cotula cinerea</i>	Gartofa							X				Plante annuelle
	<i>Artemisia herba alba</i>	Chih (Armoise)								X			Plante vivace
	<i>Atractylis delicatula</i>	Sag leghrab							X				Plante vivace
	<i>Calendula aegyptiaca</i>	Ain sefra (Souci)							X	X			Plante annuelle
	<i>Chrysanthemum macrocarpum</i>	Bouchicha							X				Plante annuelle
	<i>Launea glomerata</i>	Harchaia							X	X			Plante annuelle
	<i>Echinops spinosus</i>	Fougaa el djmel											Plante vivace
	<i>Ifloga spicata</i>	Zouadet lekhrouf							X			X	Plante annuelle
	<i>Rhanterium adpressum</i>	Arfage									X		Plante vivace
	<i>Launea mucronata</i>	Adide							X	X			Plante annuelle
	<i>Muricaria prostrata</i>	Bouibicha											Plante annuelle
Asclépiadaceae	<i>Pergularia tomentosa</i>	kalga										X	Plante vivace
Boraginaceae	<i>Moltkiopsis ciliata</i>	Halma									X		Plante vivace
	<i>Echium humile</i>	Ouacham (Vipérine)							X	X			Plante annuelle
	<i>Nonnea resedifolia</i>	Ghourima											Plante annuelle
	<i>Arnebia decumbens</i>	Ouechem											Plante annuelle
Brassicaceae	<i>Moricandia arvensis</i>	Krombe							X				Plante annuelle, bisannuelle ou vivace
	<i>Malcomia aegyptiaca</i>	Lehma								X			Plante vivace
	<i>Sinapis arvensis</i>	Khardal bari(séneve)								X			Plante annuelle

Tableau N°1 : les principales espèces mellifères spontanées dans la région d'étude (suite).

	<i>Diploaxis harra</i>	Harra	■	■														X	X		Plante annuelle ou vivace
	<i>Alyssum sp</i>	Boudriga					■	■											X		Plante annuelle
	<i>Diploaxis acris</i>	Kerkaz					■	■											X		Plante annuelle
Capparidaceae	<i>Cleome amblyocarpa</i>	Netil		■	■													X			Plante vivace
	<i>Anabasis articulata</i>	Baguel																		X	Plante vivace
Chenopodiaceae	<i>Atriplex halimus</i>	Gatfa (Arroche)					■	■											X		Plante vivace
	<i>Haloxylon scoparium</i>	Remth					■	■													Plante vivace
Cistaceae	<i>Helianthemum lippii</i>	Reguig (Hélianthème)					■	■	■										X		Plante vivace
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i>	Kharoua (Ricin)					■	■	■	■									X		Plante vivace
	<i>Genista saharae</i>	Merkh (Genêt)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			X	Plante vivace
Fabaceae	<i>Retama retam</i>	Rtem (Retam)					■	■											X		Plante vivace
	<i>Astragalus armatus</i>	Kedada (Astragale)	■	■															X		Plante vivace
	<i>Medicago minima</i>	Heska (Luzerne)																			
Lamiaceae	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Yazir el djebel (Romarin)	■	■	■			■	■	■											Plante vivace
Liliaceae	<i>Asphodelus tenuifolius</i>	Tazia					■	■	■										X	X	Plante annuelle
Malvaceae	<i>Malva aegyptiaca</i>	Khobize (Mauve)		■	■															X	Plante annuelle
Plombaginaceae	<i>Limonium sinuatum</i>	Khedda (Stalice)					■	■											X		Plante annuelle
Resedaceae	<i>Reseda villosa</i>	Dembal (Réséda)	■	■															X		Plante annuelle
Rhamnaceae	<i>Zizyphus lotus</i>	Sedra (Jujubier)					■	■											X		Plante vivace
Rosaceae	<i>Neurada procumbens</i>	Hassak ou Saadane					■	■	■										X		Plante annuelle
Rutaceae	<i>Ruta tuberculata</i>	Fajjel (Rue)					■	■											X		Plante annuelle
Urticaceae	<i>Forskohlea tenacissima</i>	Hamched			■	■													X		Plante annuelle
Zygophyllaceae	<i>Fagonia glutinosa</i>	Cherrik					■	■											X		Plante vivace
	<i>Peganum harmala</i>	Harmel			■	■													X		Plante vivace

Tableau N°2 : les principales espèces mellifères cultivées dans la région d'étude.

Famille	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Période de floraison				Produits récoltés par l'abeille						
			Hiver	Printemps	Eté	Automne	Pollen	Nectar	miellat	propolis			
Les arbres fruitiers													
Palmaceae	<i>Phoenix dactylifera L.</i>	Palmier dattier (dokkar)								X			
		Dattes											
Rosaceae	<i>Prunus armeniaca L.</i>	Abricotier								X	X		
	<i>Pyrus malus L.</i>	Pommier								X			
	<i>Prunus persica</i>	Pêcher								X	X		
	<i>Pyrus communis</i>	Poirier								X	X		
	<i>Prunus amygdalus</i>	Amandier								X	X		
	<i>Prunus domestica</i>	Prunier								X	X		
Les arbres forestiers													
Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalyptus									X		
Tamaricaceae	<i>Tamarix articulata</i>	Tamarin									X		
Les plantes maraîchères													
Cucurbitaceae	<i>Cucumis sativus</i>	Concombre								X	X		
	<i>Cucurbita pepo</i>	Courge								X	X		
	<i>Cucumis citrulus</i>	Pastèque								X	X		
Brassicaceae	<i>Brassica dotrytis</i>	Chou-fleur								X	X		
	<i>Brassica napus</i>	Navet											
Liliaceae	<i>Allium cepa L.</i>	Oignon								X			
Apiaceae	<i>Daucus carota</i>	Carotte								X			
Fabaceae	<i>Vicia faba</i>	Fève									X		
Solanaceae	<i>Solanum melongena</i>	Aubergine											
Les plantes fourragères													
Brassicaceae	<i>Brassica oleracea</i>	Colza											
Fabaceae	<i>Medicago sativa</i>	Luzerne									X		

Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien).

Rachid Djamaï¹, Djamel Fadel¹, Aziz Laïfa¹, Mohamed Benslama¹,
Youcef Daoud², & Vincent Vallès³

¹⁾ Laboratoire de Biologie Végétale et Environnement, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.

²⁾ Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Avenue Hacène Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.

³⁾ Laboratoire d'Hydrogéologie, UAPV, 74 rue Louis Pasteur, F84000, Avignon, France.

Accepté le : 07/09/2011

ملخص

النتائج المحصلة على ترب بحيرة فزارة، تشير أن القلوية المتبقية كالسيت (ARC) تقل عندما تتركز المحاليل؛ نجدها قليلا سالبة في البداية لتصبح أكثر وضوحا فيما بعد في العينات الأكثر تركيزا. الكالسيوم يسود على القلوية، إنها الطريق الملحية المحايدة. نجدها تتطور في نفس المسار، لأنها ، ARC+g تقل عندما تتركز المحاليل تكون قليلا موجبة في البداية، ثم تصبح سالبة عندما يزيد تركيز المحلول، إنها كذلك الطريق الملحية المحايدة. يمكن أن يفسر بتثبيت قلب إشارة RC+g من الموجب إلى السالب يكون مربوط بظواهر تبادل بين المحلول و معدن ادمصاص التربة. بعكس ARC لتبين أهم المسارات الجيوكيميائية Na^+ ، K^+ و Mg^{2+} وتحرير Ca^{2+} . التطور نحو الإشارة السالبة من ARC+g و ARC معدن ادمصاص الدراسة الاحصائية عن طريق تحليل المكونات الأساسية تركيز محاليل التربة تحت تأثير التبخر (ACP) المسؤولة عن تطور الملوحة بتوضيح أن المكتف، الذي يسود المنطقة، يعتبر الظاهرة الأساسية. مساران أقل أهمية من الأول، يستحقان الاهتمام في هذا الوسط المشبع بالماء في أغلب الأحيان، ممكن أن تكون ظواهر التبادلات الأيونية بين محلول التربة و معدن ادمصاص من جهة و مسارات الاكسدة و الارجاع من جهة أخرى.

الكلمات المفتاحية: تربة مالحة - مسارات جيوكيميائية - قلوية متبقية - كالسيت - جيس - ACP .

Résumé

Les résultats obtenus sur les sols du lac Fetzara montrent que l'alcalinité résiduelle calcite (ARC) diminue lorsque les solutions se concentrent. Elle est légèrement négative au départ pour devenir plus franche par la suite dans les échantillons les plus concentrés. L'alcalinité est dominée par le Ca^{2+} , c'est la voie saline neutre. Concernant l'alcalinité résiduelle généralisée calcite+gypse (ARC+g), elle évolue également dans le même sens, puisqu'elle diminue lorsque les solutions se concentrent. Mais contrairement à ARC, ARC+g est légèrement positive au départ, puis devient négative au fur et à mesure que la concentration de la solution augmente, c'est également la voie saline neutre. L'inversion du signe de ARC+g serait attribuée à des phénomènes d'échange entre la solution et le complexe adsorbant du sol. L'évolution vers le signe négatif de ARC et ARC+g peut être expliquée par la fixation du complexe argilo-humique du Na^+ , K^+ et Mg^{2+} et libération de Ca^{2+} . L'étude sur l'approche statistique établie à partir de l'ACP afin de déterminer les principaux processus géochimiques responsables de l'évolution de la salinité, montre que la concentration des solutions de sols sous l'effet de l'intense évaporation qui caractérise la région est le principal phénomène. Deux autres processus de moindre importance par rapport au premier, méritent d'être confirmés dans ce milieu très souvent saturé d'eau, il s'agirait certainement des phénomènes d'échanges ioniques entre la solution du sol et le complexe adsorbant et les processus d'oxydo-réduction.

Mots clés : Sols salés - Processus géochimiques - Alcalinité résiduelle - Calcite - Gypse - ACP.

Abstract

The results obtained on the grounds of the lake Fetzara soils show that the residual calcite alkalinity (ARC) decreases when the solutions concentrate. It's slightly negative at first to become more obvious afterward in the most concentrated samples. The alkalinity is dominated by Ca^{2+} it is the neutral salt way. Concerning the generalized residual alkalinity calcite+gypse (ARC+g), it also evolves in the same sense, because it decreases when the solutions concentrate. But contrary to ARC, ARC+g is slightly positive at first, then becomes negative as the concentration of the solution increases, it is also the neutral salt path. The inversion of the sign of ARC+g

Auteur correspondant : djamaï_rachid@yahoo.fr

would be attributed an exchange phenomenon between the solution and the complex adsorbing of the ground. The evolution of ARc and ARc+g to the negative sign could be explained by the fixation of the argilo-humic complex of Na^+ , K^+ and Mg^{2+} and liberation of Ca^{2+} . The study on statistical approach set from the PCA in order to define the principal geochemical process responsible for the evolution of the salinity, shows that the soil's solutions concentration under the effect of the intense evaporation, typical of the area, is the principal phenomenon. Two other processes of minor importance compared to the first, worth to be confirmed in this environment mostly saturated by water, it could concern certainly phenomenon of ionic exchanges between the soil's solution and the adsorption complex and the oxydo-reduction process.

Keywords: Salty grounds- Geochemical process- Residual alkalinity- Calcite- Gypsum- PCA.

1. INTRODUCTION

La salinisation est une résultante globale de plusieurs processus géochimiques et hydrologiques qui se produisent dans les sols. Ces processus dépendent de l'environnement physique et bio-géochimique ainsi que des pratiques hydro-agricoles [1, 2]. La salinisation est considérée comme un processus général regroupant trois grands types de phénomènes, la salinisation neutre, la salinisation alcaline ou alcalinisation et la sodisation. Ces trois mécanismes peuvent apparaître lorsque la solution du sol se concentre, son faciès chimique déterminera alors la voie empruntée, soit la voie saline neutre ou soit la voie alcaline. La sodisation est une résultante de ces deux dernières et traduit le phénomène de fixation d'ions sodium sur le complexe adsorbant du sol [3].

Les critères de qualité d'une solution sont en général la conductivité électrique (CE) et le pourcentage de sodium adsorbé (SAR). Mais ces deux paramètres sont de moins en moins utilisés car on leur préfère actuellement le concept d'alcalinité résiduelle qui permet de prévoir l'évolution géochimique des solutions durant leur concentration par évaporation et estimer le sens de l'évolution, soit vers une voie saline neutre ou vers une voie alcaline [4, 5]. L'alcalinité résiduelle calcite (ARc) d'une solution est définie comme étant la différence entre l'alcalinité carbonatée et la quantité de calcium (1) :

$$\text{Alcalinité résiduelle calcite (ARc)} = \text{Alcalinité carbonatée} - \text{Ca}^{2+} \text{ (}\mu\text{g/l)} \quad (1)$$

En effet lorsqu'une solution se concentre et atteint le point de saturation avec la calcite, il y a deux évolutions possibles :

- Si la quantité de $\text{Ca}^{2+} >$ alcalinité carbonatée ; $\text{ARc} < 0$: c'est la voie saline neutre.
- Si la quantité de $\text{Ca}^{2+} <$ alcalinité carbonatée ; $\text{ARc} > 0$: c'est la voie alcaline.

Le concept de ARc a été étendu par la suite à la précipitation successive de plusieurs minéraux à la fois [6, 7], c'est ce qu'on appelle l'alcalinité résiduelle généralisée (ARG). Les eaux du lac Fetzara sont soumises à une évaporation très intense pendant la période estivale et ont tendance à se concentrer provoquant ainsi la salinisation des sols pouvant être accompagnée d'une alcalinisation du complexe adsorbant, pour ce dernier cas l'utilisation des sols à des fins agricoles peut devenir très problématique même à faibles facteurs de concentration des solutions [8, 9].

L'objectif de cette étude est d'utiliser un modèle appelé «AQUA» qui permet de prédire par simulation la voie de l'évolution géochimique des solutions de sol du lac Fetzara à partir de leur composition chimique, de ARc et ARG (ARc+g) [10]. Pour cette dernière, c'est la calcite et le gypse qui ont été choisis, car ces deux minéraux sont non seulement abondants en milieux salés mais présentent également un côté très pratique en ayant un élément chimique commun (Ca^{2+}).

D'autre part une approche statistique sera menée à partir de l'analyse en composantes principales (ACP) afin de déterminer les processus géochimiques responsables de l'évolution de la salinité des sols.

2. Matériel et méthodes

2.1 Cadre physique

Le lac Fetzara est situé à 18 km au Sud-Ouest de Annaba. Il est représenté par une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13 km du Nord au Sud avec une superficie d'environ 18600 ha (fig. 1).

La partie inondable du lac est située au centre et couvre une surface estimée en hiver à 13 000 ha. La présence d'un canal principal traversant le lac d'Ouest en Est assure son drainage, mais il est insuffisant pour évacuer toutes les eaux en hiver. Sur le plan climatique, la région de Annaba reçoit en moyenne 750 mm/an de pluie avec 80% attribués à seulement 6 mois de l'année, d'octobre à mars. L'évaporation annuelle est très importante puisqu'elle est en moyenne de 1375 mm/an, ajouter à cela une sécheresse estivale de 6 mois (d'avril à septembre) qui caractérise la région, tout ceci va engendrer un déficit hydrique énorme (Pluviométrie < Evaporation), dont les conséquences vont se répercuter sur la concentration des eaux, l'accumulation et la redistribution des sels sur les sols d'où en générale l'accentuation du phénomène de salinisation.

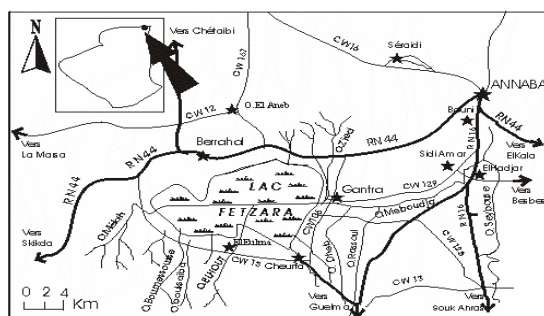


Figure 1 : Situation géographique du lac Fetzara

2.2 Matériel d'étude

L'échantillonnage sur le terrain a été effectué en plusieurs campagnes s'étalant sur une période allant de décembre 1988 à novembre 1999 ; il s'est fait uniquement sur les deux premières couches de sol (0 - 25 et 25 - 50 cm), car on estime que c'est à ce niveau que se font les échanges ioniques les plus importants. Pour mener cette étude, la détermination du bilan de salure des échantillons de sols a été effectuée sur extrait de pâte saturée et les caractéristiques chimiques suivantes de la solution du sol ont été mesurées :

- CE et pH
- Cations solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+)
- Anions solubles (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-})

2.3 Outils de traitement des données

Il est à rappeler que la notion d'alcalinité résiduelle utilise les concepts thermodynamiques de solubilité des minéraux en faisant intervenir différents processus géochimiques [7]. L'activité ionique des éléments a été calculée grâce au logiciel «AQUA», c'est un modèle d'association ionique qui utilise la loi de Debye-Huckel [11], il a été spécialement adapté au cas des solutions salines. A partir du pH, de la température (°C) et de l'analyse des éléments chimiques réalisée au laboratoire, il permet de calculer les activités chimiques des minéraux en solution et leur répartition entre les formes libres ou complexes, ainsi que la pression partielle équilibrante en CO_2 ($p\text{CO}_2$) [10].

Les données obtenues permettent de déterminer ARc et ARc+g, ce concept d'alcalinité résiduelle est utilisé pour prévoir qualitativement le sens de variation de la concentration des différents éléments dans les solutions de sols étudiées. Il permet également de simuler l'évolution de la composition chimique des solutions lors de leur concentration sous l'effet de l'évaporation [12, 13, 14]. Afin d'identifier, hiérarchiser et quantifier les

différentes sources de variation de la composition chimique des solutions, une analyse en composantes principales (ACP) a été conduite à partir de la matrice des corrélations. Cette méthode de traitement des données multi-paramètres permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité de tous les paramètres confondus et de hiérarchiser les processus qui prédominent dans ce milieu. Les valeurs propres recherchées permettent d'accéder aux axes factoriels présentant un maximum d'inertie [15].

3. Résultats et discussion

3.1. Approche géochimique

3.1.1 Diagrammes de concentration

Dans un milieu évaporitique littoral comme celui du lac Fetzara, le chlorure est un élément abondant et soluble ; il peut donc être utilisé comme traceur hydrochimique. Seuls les cas de faciès chimiques pauvres en Cl^- et affectés par de forts processus d'oxydo-réduction sont inadaptés à l'utilisation du chlorure comme traceur à cause des phénomènes de sorption ou de co-précipitation du chlorure par des oxydes et hydroxydes ferreux et ferriques [16]. Il est alors possible d'estimer un facteur de concentration (FC) global d'une solution par le rapport entre la teneur en Cl^- de cet échantillon et la teneur en Cl^- de l'échantillon le plus dilué.

Les calculs et les graphiques ont été réalisés pour l'ensemble des solutions de sols. Les diagrammes obtenus montrent une dispersion notable des points, ce qui signifie que les solutions de sols du lac Fetzara ne peuvent pas être considérées comme un système hydrochimique unique. Au delà du phénomène de salinisation par concentration des solutions, il existe une autre source de variabilité de la composition chimique (fig. 2).

Le Ca^{2+} augmente, mais moins fortement que Cl^- , cet écart montre que des ions Ca^{2+} sont soustraits à la solution de sol. L'évolution du Na^+ est quant à elle comparable au Cl^- , sauf pour les solutions diluées à cause de la fixation de cet

élément sur les argiles. Le K^+ est très stable car il est très contrôlé par les minéraux argileux [17]. Les SO_4^{2-} augmentent également puis ralentissent au même titre que le Ca^{2+} , ceci est dû certainement à la précipitation du gypse. L'alcalinité est stable et elle a même tendance à diminuer. Ce résultat conforte l'hypothèse de la précipitation de calcite avec alcalinité $< \text{Ca}^{2+}$, c'est-à-dire dans le cadre d'une alcalinité résiduelle calcite négative.

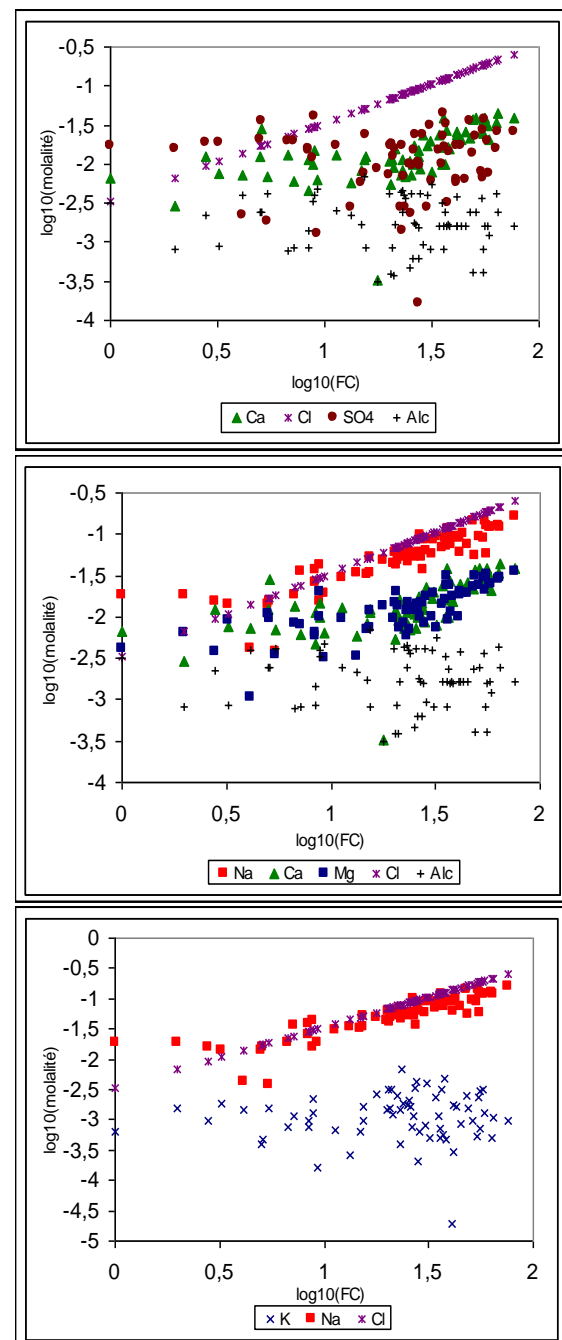


Figure 2. Diagrammes de concentration des solutions de sols (Traceur hydrochimique : Cl^-)

Par ailleurs, le nuage de points représentatifs des teneurs en alcalinité présente une très forte dispersion. Ce résultat traduit une forte variabilité des teneurs en CO_2 de ces solutions. Des processus d'oxydo-réduction sont donc probables dans ce système [18, 19, 20].

3.2 Alcalinité résiduelle calcite (ARc)

Lorsqu'une solution se concentre par évaporation et atteint le point de saturation avec la calcite, il y a deux évolutions possibles : si les équivalents de Ca^{2+} excèdent l'alcalinité carbonatée ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) dans la solution, l'alcalinité va diminuer et la molalité en Ca^{2+} va continuer de croître aboutissant à une ARc négative (voie saline neutre) ; par contre si l'alcalinité est supérieure au Ca^{2+} , elle va continuer à augmenter et le Ca^{2+} va diminuer, dans ce cas la ARc est positive (voie alcaline). Selon le cas, la concentration des solutions mène à des sols salins neutres ou bien à des sols alcalins [6, 9, 21].

Dans le cas des solutions de sols du lac Fetzara, le diagramme montre que l'alcalinité résiduelle calcite (ARc) est d'une manière générale légèrement négative au départ dans les solutions les plus diluées, puis diminue et devient franchement négative par la suite dans les échantillons les plus concentrés indiquant ainsi l'intervention d'un processus géochimique pouvant changer le signe de l'alcalinité résiduelle calcite (fig. 3) ; il s'agirait probablement d'une réaction de précipitation de la calcite [14, 22]. Avec la précipitation de la calcite, la teneur en calcium devrait augmenter et l'alcalinité diminuer, ces variations sont confirmées par les diagrammes de concentration des solutions ainsi que la loi du «T» qui signifie que lorsque $\text{Ca}^{2+} > \text{alcalinité}$, c'est la voie saline neutre [23, 24]. Le calcium sera abondant sur le complexe adsorbant, les argiles resteront floculer et le milieu perméable. Ce cas est très fréquent sur les sols se développant sur des roches sédimentaires marines [25].

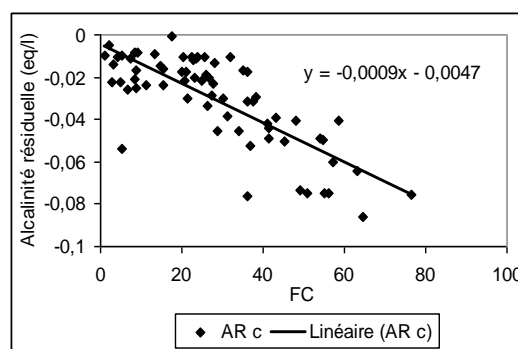


Figure 3. Evolution de l'alcalinité résiduelle calcite des solutions de sols.

3.3. Alcalinité résiduelle généralisée (ARc+g)

Ce concept est applicable à la succession des équilibres qui contrôlent la composition d'une solution lorsque sa concentration augmente au contact d'une source d'éléments minéraux.

La calcite et le gypse sont deux minéraux dont la précipitation successive permet de distinguer plusieurs phases dans l'évolution de la composition chimique des éléments dissous de la solution du sol [2, 7].

La présentation graphique de l'alcalinité résiduelle calcite+gypse (ARc+g) montre qu'elle est positive au départ, elle diminue ensuite et devient franchement négative lorsque les solutions de sols se concentrent (figure 4). Cette évolution ne peut être attribuée ni à la précipitation de la calcite ni à celle du gypse, qui ne survient qu'à partir du moment où l'état de saturation avec l'un des minéraux est atteint. L'inversion du signe de cette alcalinité résiduelle doit être attribuée à la désorption du Ca^{2+} par le complexe argilo-humique, au profit d'autres éléments, particulièrement des monovalents tel que le Na^+ . En effet, lorsque les solutions se concentrent, le Na^+ se fixe sur le complexe adsorbant en déplaçant le Ca^{2+} , ce qui modifie le signe de l'alcalinité résiduelle calcite + gypse [2, 23, 24].

D'une manière générale, lorsque l'alcalinité résiduelle calcite + gypse est positive au départ, comme dans le cas des

solutions les plus diluées, le signe de ce paramètre ne peut changer tant que n'intervient pas un processus de réaction autre que la précipitation ou la dissolution de la calcite ou du gypse. Ce résultat montre que probablement un autre processus impliquant Ca^{2+} , SO_4^{2-} ou encore l'alcalinité, intervenant dès le début de la concentration des solutions. Ce paramètre peut servir d'indicateur lors de la rencontre d'eaux ayant une origine très différente entrant en contact avec les sols [6].

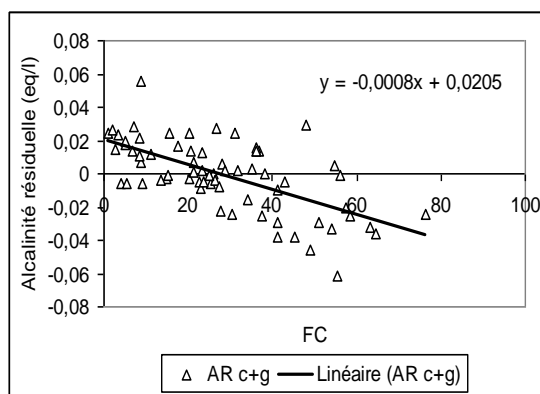


Figure 4. Evolution de l'alcalinité calcite+gypse des solutions de sols.

4. APPROCHE STATISTIQUE

4.1 Analyse en composantes principales (ACP)

L'étude statistique de l'ACP montre un premier axe factoriel représentant seul 41% de la variabilité totale, tous paramètres confondus ; c'est un processus important qui devrait être facilement identifié. Il est suivi ensuite par un second, un troisième et un quatrième axe avec respectivement des inerties sensiblement proches de 14%, 12% et 11%. Les autres axes, avec des pourcentages de variance inférieurs à 8% peuvent être considérés comme négligeables et portent probablement sur des imprécisions analytiques (fig.5).

Pour les sols du lac Fetzara, un mécanisme semble être prédominant pour la chimie

des solutions des sols, puis viennent ensuite trois processus à peu près d'égale importance. Il convient maintenant de tenter de déterminer quels sont ces processus ou sources de variation de la composition chimique des solutions des sols. Pour cela, les deux premiers plans factoriels seront examinés successivement.

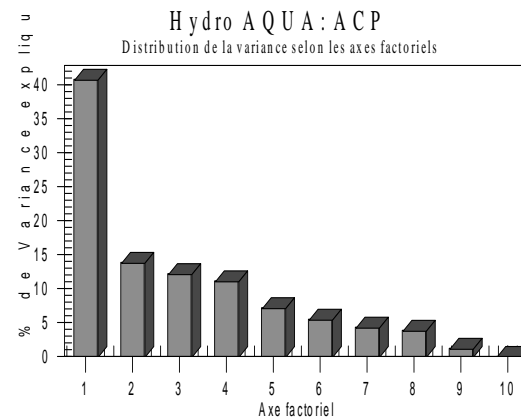


Figure 5. Taux de variance expliquée selon les différents axes factoriels.

4.1.1 Premier plan factoriel

Il comprend les axes factoriels N°1 et N°2. Le premier axe factoriel oppose les éléments solubles dont la concentration augmente fortement avec la salinité, à savoir Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} et accessoirement Ca^{2+} avec les éléments dont la concentration est contrôlée par la précipitation de minéraux comme l'alcalinité et le pH. Ce cas de figure est habituel pour les sols salés. Ce premier axe traduit la concentration globale des solutions sous l'effet de l'évaporation et donc du climat. Habituellement cet axe porte 65 à 75% de la variance. Sa relativement faible inertie traduit la complexité de notre système.

Pour déterminer la source de variabilité représentée par le second axe, on constate que SO_4^{2-} s'oppose au K^+ et à CE. Il pourrait s'agir d'une opposition dans les phénomènes de sulfato-réduction, processus extrêmes de réduction dans ce type de milieu, souvent inondé par les eaux durant une grande partie de l'année et de

fixation de K^+ très énergique par certains minéraux argileux (figure 6).

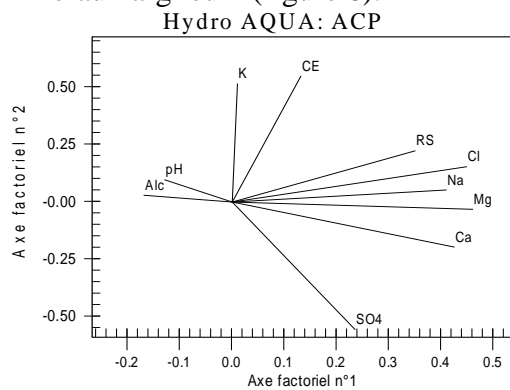


Figure 6. Premier plan factoriel : contribution des différentes variables

4.1.2 Second plan factoriel

Il est constitué des axes factoriels N°2 et N°3. Le deuxième axe a été discuté précédemment, seul le troisième axe sera donc étudié. Ce troisième axe factoriel, oppose SO_4^{2-} et CE à l'alcalinité et au pH (figure 7). Cette opposition sulfates-alcalinité se rencontre parfois en hydrochimie et peut correspondre à deux cas possibles :

- Dans certains cas, deux origines de solutions conduisent à des mélanges, lorsque les eaux sont riches en sulfates par dissolution du gypse par exemple, elles sont plus minéralisées (corrélation positive SO_4^{2-}/CE) et l'apport de Ca^{2+} par la dissolution du gypse conduit à une précipitation de la calcite qui diminue l'alcalinité (opposition $SO_4^{2-}/alcalinité$).
- Dans d'autres cas, lorsque les processus d'oxydo-réduction sont très actifs ou bien lorsque la lithologie renferme des pyrites, c'est-à-dire du sulfure de fer (FeS_2), l'oxydation de cette dernière conduit à la libération d'acide qui provoque une diminution de l'alcalinité et une augmentation de la conductivité électrique (CE).

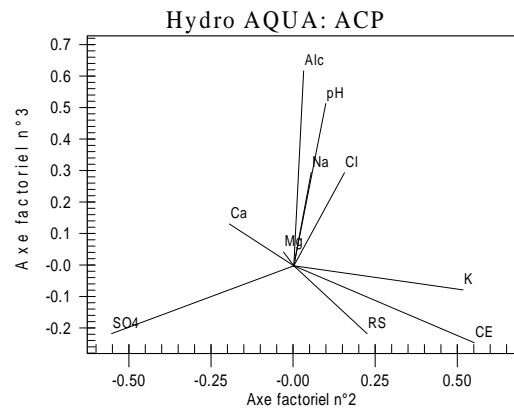


Figure 7. Second plan factoriel : contribution des différentes variables

5. CONCLUSION

La dynamique des sels solubles des sols du lac Fetzara semble être contrôlée par un certain nombre de processus géochimiques. En effet, lorsque les eaux se concentrent par évaporation, des phénomènes d'échange ioniques entre le complexe adsorbant et la solution de sols affectent l'évolution de certains éléments. Les résultats obtenus sur les solutions de sols du lac Fetzara peuvent être expliqués en partie par l'intervention du complexe argilo-humique du sol qui fixe certains ions tels que Na^+ , K^+ et probablement du Mg^{2+} et libère Ca^{2+} , ceci devient suffisant pour inverser le signe des alcalinités résiduelles calcite (ARc) et calcite+gypse (ARc+g), qui deviennent franchement négatives à mesure que les solutions de sols se concentrent, conduisant l'évolution géochimique des sols vers la voie saline neutre qui est un phénomène assez fréquent en Afrique du Nord.

L'approche statistique par ACP établie afin de déterminer les mécanismes géochimiques prédominant dans ce milieu assez complexe, montre que la concentration des solutions sous l'effet de l'intense évaporation qui caractérise la région de Annaba, est le principal processus de salinisation des sols. Mais il n'est pas le seul, deux autres processus sont certainement responsables de l'évolution de la dynamique des sels sur les sols du lac Fetzara, mais à cause du faible

pourcentage d'inertie qu'ils représentent, leur identification est délicate. Il pourrait s'agir des phénomènes d'échanges ioniques entre la solution et le complexe argilo-humique du sol d'une part et d'autre part la forte variabilité des conditions d'anoxie et de pression partielle en CO₂ engendrées par l'engorgement du milieu par l'eau, provoquant des processus d'oxydo-réduction affectant probablement la variabilité spatiale de la chimie des sulfates avec présence du gypse ou de pyrites [14, 20]. Ces deux processus doivent être pris en considération afin de confirmer leur rôle dans ce milieu.

REFERENCES

- [1] Aubert G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologie*, Vol. 20 (1), 73-78.
- [2] Hamdi-Aissa B., Vallès V., Avanturier A. & Ribozi O., 2004. Soils and brine geochemistry and mineralogy of hyperarid desert playa, Ouargla basin, algerian sahara. *Arid Land Research and Rehabilitation*, Vol. 18 (2), 103-126.
- [3] Amrhein C. & Suarez D.L., 1990. A procedure for determining sodium-calcium selectivity in calcareous and gypsiferous soils. *Soil Science Society American Journal*, Vol. 54, 999-1007.
- [4] Debièche T.H., 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat., Université Franche-Comte, Besançon. 235p.
- [5] Djamaï R., 2007. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes. Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Agronomique d'Alger. 167p.
- [6] Barbiéro L., Vallès V. & Régeard A., 1995. Précipitation de la fluorine et contrôle géochimique du calcium dans des sols alcalins du Niger. Conséquences pour une estimation quantitative de l'évolution géochimique des sols. *Géosciences de Surface, C.R. Acad. Sci.*, Vol. 321 (2), 1147-1157.
- [7] Droubi A., Fritz B., Gac J.Y. & Tardy Y., 1980. Generalized residual alkalinity concept : application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science*, Vol. 280, 560-572.
- [8] Cheverry C., 1974. Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels lors de la transformation des sédiments argileux et organiques en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 175 p.
- [9] Cheverry C. & Robert M., 1993. Salure des sols Maghrébins. Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Rapport Projet CEE. 41p.
- [10] Vallès V. & de Cockborne A.M., 1992. Élaboration d'un logiciel de géochimie appliquée à l'étude de la qualité des eaux. Colloque : Altération et restauration de la qualité des eaux continentales'92, Port-Leucate, France, 27-30.
- [11] Debye P. & Hückel E., 1923. On the theory of electrolytes. *Phys. Z. (Leipzig)*, Vol. 24, 185-208.
- [12] Condom N., 2000. Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Agronomique de Montpellier. 240 p.

- [13] Lahlou M., Badraoui M., Souidi B., Goumari A. & Tessier D., 2002. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI'02, Montpellier, 1-19.
- [14] Ouardi J., 2006. Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla marocain par salinisation et sodisation. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech. 155 p.
- [15] Talla Diagne M. & Cescas M.P., 1997. Les méthodes d'analyses multidimensionnelles pour l'évaluation des sols de Basse-Casamance (Sénégal). *Cahiers Agricultures*, Vol. 6 (1), 45-53.
- [16] Boivin P., Favre F., Hammecker C, Saejjew A. & Tessier D., 1999. Ion transfers, iron reduction and mineralogical implications in irrigated fields : new results for soil and water quality management under irrigation. Proceedings of 2nd Inter-regional Conference on Environment-Water'99, Lausanne, Switzerland.
- [17] Wang J.J., Harrel D.L. & Bell P.F., 2004. Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Science Society American Journal*, Vol. 68, 654-661.
- [18] Marlet S., Vallès V., Lafolie F. & Condom N., 1998. Hydrogeochemical modeling : a suitable approach to predict the effect of irrigation on soil salinity, sodicity and alkalinity. 16th ISSS World Congress'98, Montpellier, Symposium 29, Paper 537, 1-9.
- [19] Favre F., 2000. Interactions entre oxydo-réduction et dynamiques salines dans un vertisol irrigué par submersion. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 179p.
- [20] Kirk G., 2004. The biogeochemistry of submerged soils. Ed. John Wiley & Sons, London, 304p.
- [21] Barbiéro L. & Van Vliet-Lanoe B., 1998. The alkali soils of the middle Niger valley : origins, formation and present evolution. *Geoderma*, Vol. 84 (4), 323-343.
- [22] Ribolzi O., Vallès V. & Barbiéro L., 1993. Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du Sol*, Vol. 31 (1/2), 77-95.
- [23] Barbiéro L., Vallès V., Régeard A. & Cheverry C., 2001. Residual alkalinity as a tracer to estimate the changes induced by a forage cultivation in a non saline sodic soil. *Agricultural Water Management*, Vol. 50 (3), 229-241.
- [24] Vallès V., Bertrand R., Bourgeat F., & N'Diaye M.K., 1989. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerda (Tunisie). *L'Agronomie Tropicale*, Vol. 44 (3), 157-163.
- [25] Barbiéro L. & Vallès V., 1992. Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (république du Niger). *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologie*, Vol. 27(2), 143-152.

Propriétés physicochimiques et rhéologiques d'un mélange aqueux de biopolymères et d'un tensioactif non ionique

M. Rebiha¹, N. Moulai-Mostefa^{1,2} & A. Hadj Sadok¹

¹ LAFPC, Université de Blida, BP. 270 Route de Soumaa, 09000 Blida, Algérie

² LME, Université de Médéa, Ain D'Heb, 26001 Médéa, Algérie

Accepté le : 13/09/2011

ملخص

في هذا العمل نهتم بتأثير تراكيز كل من الزنتان، كازينات الصوديوم، والتوين 20 على الخصائص الريولوجية، الزيتاميتريية و السطحية لخليط منها في وسط مائي عند درجة حموضة معتدلة. ولقد تبين من خلال استخدام منهجية التصميم التجريبي، وجود تفاعلات تنافر للفصل بين البوليمرات الحيوية مولدة ضعف في معامل اللزوجة $G'0$ و بالمثل إضعاف فينية النظام لكولويدي. في هذه الحالة، لوحظ نقص في احتمال زيتا، والذي يسمح بافتراض ان تفاعلات التنافر الكهروستاتيكية بين الأنيونيين (سالبين الشحنة) ليست مسؤولة عن تخفيف الهيكلة. علاوة على ذلك، لوحظ أن الخصائص السطحية للخليط تعتمد فقط على تركيز توين 20.

الكلمات المفتاحية: البوليمرات الحيوية - توين 20 - الريولوجيا - الخصائص السطحية - احتمال زيتا.

Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse à l'effet des concentrations du xanthane, du caséinate de sodium et du tween 20 sur les propriétés rhéologiques, zétamétriques et de surface de leurs mélanges, dans un milieu aqueux à pH neutre. Il a été mis en évidence, à l'issue de l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences, de l'existence des interactions répulsives de ségrégation entre les biopolymères, générant un affaiblissement du module de conservation viscoélastique, $G'o$ et par la même une fragilisation de la structure du système colloïdal. Dans cette situation, il a été observé que le potentiel zéta diminue, ce qui laisse supposer que les interactions répulsives électrostatiques entre les deux espèces anioniques ne sont pas responsables du relâchement de la structure. Par ailleurs, il a été observé que la tension de surface du mélange dépend essentiellement de la concentration du tween 20.

Mots clés : Biopolymères - Tween 20 – Rhéologie - Tension de surface - Potentiel zéta.

Abstract

In this work, the effects of xanthan, sodium caseinate and tween 20 concentrations on the rheological, zeta potential and surface properties of their mixtures were investigated, in an aqueous medium at neutral pH. Using an experimental design, it was shown the existence of repulsive interactions of segregation between biopolymers, generating a weakening of the viscoelastic modulus, $G'o$ and consequently an embrittlement of the structure of the colloidal system. In this situation, it was observed that the zeta potential decreases, which lets suppose that the electrostatic repulsive interactions between the two anion species are not responsible for the structure relaxation. In addition, it was observed that the surface tension of the mixture depends only on the concentration of tween 20.

Key words: Biopolymers - Tween 20 – Rheology - Surface tension - Zeta Potential

Auteur correspondant : m_rebiha@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les protéines et les polysaccharides suscitent de plus en plus l'intérêt des industriels alimentaire et autres, en raison de leur potentialité d'améliorer la texture, la stabilité et l'aspect diététique des produits à structure complexe [1]. Toutefois, la présence de ces deux espèces polymériques dans un même système, peut engendrer des phénomènes de séparation de phases, soit par incompatibilité thermodynamique [2] ou par floculation par déplétion [3]. Ainsi, il est indispensable de comprendre les mécanismes pour réguler les interactions entre ces espèces et contribuer à l'amélioration des propriétés physiques des produits formulés [4,5]. Dans un milieu aqueux, la séparation de phases due à l'incompatibilité thermodynamique se traduit par des interactions répulsives mutuelles de ségrégation des macromolécules des deux biopolymères, par effet du volume exclu, auquel cas, les interactions polysaccharide-polysaccharide ou protéine-protéine sont suffisamment élevées par rapport aux interactions biopolymère-solvant [4]. Ces conditions d'incompatibilité dépendent de plusieurs facteurs, notamment, de la température, du pH, de la force ionique, de la concentration, et de la conformation des biopolymères [6, 7]. En revanche, dans le cas de la floculation par déplétion, le polymère non adsorbant s'exclut de l'espace interne de deux particules colloïdales, lorsque leur surface de séparation devient plus petite que la taille de la chaîne de ce polymère. Ceci conduit à la naissance d'une différence de pression osmotique et par la même à la floculation des deux particules, pouvant enregistrer une séparation de phases [8]. Par ailleurs, divers auteurs ont étudié la stabilité des systèmes à base de protéines par l'introduction dans leurs mélanges de tensioactifs de faible poids moléculaire [9, 10]. Il a été montré que les deux espèces rentrent en compétition pour l'interface et

que les tensioactifs sont susceptibles de déplacer les protéines dans la phase aqueuse. Pour notre part, on s'intéresse à l'effet propre que peut engendrer la présence de protéines et biopolymères sur le comportement rhéologique et électrocinétique de leur mélange.

Notre intérêt s'est porté sur le caséinate de sodium, protéine très utilisée de par ses propriétés émulsifiantes et sa structure macromoléculaire et la gomme xanthane. Des travaux sur les mélanges de caséinate de sodium et de gomme xanthane, à pH neutre, ont été réalisés en utilisant la viscosité apparente, la microscopie confocale [11] et la diffusion de lumière [12] dans le but de déterminer le comportement de phases de leur mélange. Il a été trouvé que les deux polymères présents dans la solution produisent une séparation de phases quand la concentration du xanthane est de l'ordre de 0.5 % et celle du caséinate de sodium de l'ordre de 5 % en masse. A ces deux excipients, on adjoint un tensioactif non ionique (Tween 20), du fait de ses excellentes propriétés de surface et de son bas poids moléculaire. Selon les travaux de Dickinson et al. [13] sur les émulsions alimentaires, une concentration en tween 20 de l'ordre de 0.25% est suffisante pour obtenir des émulsions stables. Cependant, l'utilisation de concentrations élevées de tween provoque une déstabilisation des émulsions par floculation par déplétion par les micelles de tensioactif.

Dans une étude réalisée sur les mélanges de xanthane et de caséinate de sodium [14], nous avons mis en évidence l'effet des concentrations des deux biopolymères sur leurs propriétés rhéologiques, notamment la contrainte seuil et la viscosité plastique. Ainsi, il ressort de cette étude d'effet sur la contrainte seuil, qu'au delà d'une certaine concentration critique de caséinate de sodium qui dépend de la quantité mise en jeu de xanthane, ces deux polymères développent une interaction

répulsive, se traduisant par une diminution de la contrainte seuil, et par la même un relâchement de la structure colloïdale. Cet état de fait peut se manifester par une séparation de phases, l'une riche en caséinate de sodium et l'autre en xanthane. L'objectif de cette étude est l'évaluation de l'effet des concentrations du xanthane, du caséinate de sodium et du tween 20 sur les propriétés rhéologiques, zétamétriques et de surface de leurs mélanges, dans un milieu aqueux à pH neutre. Pour aboutir à cet objectif, une stratégie expérimentale s'appuyant sur la méthode des plans d'expérience a été utilisée.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Produits utilisés

Le caséinate de sodium, qui est une protéine anionique, est fournie par Armor Protéines (France). Le tween 20, qui est un tensioactif non ionique, est fourni par Fluka. La gomme xanthane est un biopolysaccharide anionique naturel, fournie par Rhodia (Algérie). L'azide de sodium est utilisé comme agent de conservation et il est fourni par Sigma Chemical Co.

2.2 Méthodes de mesure

La tension de surface est mesurée à l'aide d'un tensiomètre bidirectionnel de type Du Nouy 70545. La mesure des paramètres viscoélastiques a été assurée grâce à un rhéomètre de marque Paar Physica Rheolab MCR 300, qui est muni également du logiciel US 200. Des essais oscillatoires sont utilisés pour examiner les différents types de matériaux viscoélastiques. De ce test, on déduit la valeur du module G'_0 , qui est le module de conservation au repos, représenté par un palier dans la courbe de viscoélasticité donnant l'évolution du module de conservation (G') et celui de perte (G'') en fonction de la déformation. La mesure du potentiel zêta a été effectuée à l'aide d'un zétamètre de type Malvern

Zetasizer 2000. Le pilotage de cet appareil est assuré par le logiciel Zeta Mode v 1.6.

2.3 Préparation des solutions aqueuses

Les solutions aqueuses sont préparées en faisant dissoudre les quantités appropriées de caséinate de sodium, de xanthane et de tween 20, suivant la matrice d'expérience, dans de l'eau distillée, en présence de 0.01 % d'azide de sodium pour protéger la solution contre les contaminations microbiennes, à pH neutre. La dissolution des constituants est assurée à l'aide d'agitateurs magnétiques, pendant 20 heures, à température ambiante.

2.4 Méthodologie expérimentale

La démarche adoptée dans ce travail est basée sur la planification des expériences. Le recours à cette méthode des plans d'expériences permet d'obtenir des modèles prévisionnels des réponses étudiées, ainsi que les conditions optimales, et ce avec un minimum d'essais et un maximum de crédibilité [15]. Compte tenu de l'objectif visé par cette étude, à savoir la détermination des effets de trois constituants, la stratégie de planification expérimentale la plus adéquate repose sur une modélisation en surface de réponse, par un modèle d'ordre 2 tenant compte de toutes les interactions entre les facteurs.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

Où Y est la réponse et x_1 , x_2 et x_3 sont les facteurs.

Dans cette étude, x_1 représente la concentration massique du caséinate de sodium [1 - 6%]; x_2 représente la concentration massique du tween 20 [0 - 0.2%]; x_3 est la concentration massique de la gomme xanthane [0-0.5%]. Les domaines de variation de ces facteurs ont été déduits de la littérature [11-14]. Les réponses choisies dans cette étude pour tenir compte des interactions entre les différents constituants sont : la tension de surface de la solution aqueuse du mélange,

TS (dyne/cm); le module de conservation issu de l'étude viscoélastique, G'_0 (Pa) ; et, le potentiel Zêta, ζ (mV).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Modélisation en surfaces de réponse

La matrice d'expériences choisie qui répond à cette stratégie est de type D-optimal. Le calcul des paramètres des modèles polynomiaux de surface de réponse s'effectue par la méthode de régression multilinéaire (MLR), en utilisant les valeurs expérimentales des réponses en fonction des concentrations des constituants.

La qualité au sens statistique des résultats obtenus à l'issue des ajustements, est conditionnée par le coefficient expliquant la variance, R^2 , et le coefficient de prédiction, Q^2 . Le premier indique à quel point le modèle explique les valeurs observées. Plus il est proche de 1, plus le modèle est bien ajusté. Le second indique la puissance prédictive du modèle. Au delà de 0.7, le modèle présente un bon pouvoir prédictif. Les expressions mathématiques de ces deux coefficients sont:

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2)$$

$$Q^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{1 - h_i} \right)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad 0 \leq Q^2 \leq 1 \quad (3)$$

Où y_i est la réponse mesurée au point i , \bar{y} est la moyenne de l'ensemble des réponses y_i mesurées, e_i est le résidu au point i , \hat{y}_i est la réponse prédite par le modèle au point i et, h_i la variance de prédiction au point i .

Au regard des valeurs de ces deux coefficients (Fig.1), on peut dire que les modèles obtenus sont prédictifs, ce qui permet de déterminer, sans équivoque, les

effets des trois constituants sur les réponses.

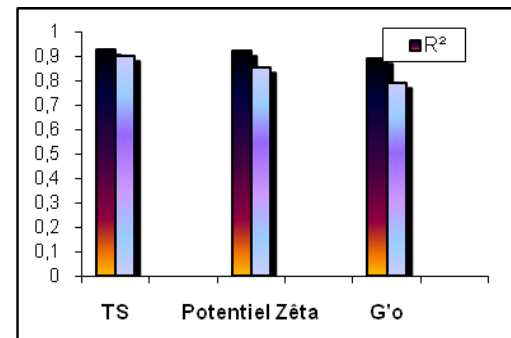


Figure 1. R^2 et Q^2 des trois modèles de surface de réponses.

Les modèles polynomiaux exprimant chaque réponse en fonction des facteurs de formulation, exprimés en coordonnées centrées réduites, s'écrivent alors :

Pour la tension de surface, TS :

$$TS = 43.42 - 2.70x_2 + 1.49x_2^2 \quad (4)$$

Pour le module de conservation G'_0 :

$$G'_0 = 5.53 - 2.4x_1 + 3.89x_3 - 3.74x_1^2 + 2.38x_3^2 - 2.52x_1x_3 \quad (5)$$

Pour le potentiel Zêta :

$$\zeta = 45.17 - 5.89x_1 + 7.92x_3 + 2.77x_1^2 - 3.37x_3^2 - 1.96x_1x_3 \quad (6)$$

3.2 Influence des facteurs sur les réponses

Au terme de la modélisation en surface de réponse, on se propose de déterminer l'effet de chaque facteur sur les propriétés de surface, viscoélastiques et électrocinétiques de la solution étudiée à l'aide d'une simulation polynomiale.

3.2.1 Sur la tension de surface

La tension de surface est un paramètre physico-chimique important, qui permet la caractérisation d'un tensioactif. Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure 2. On note que la tension de surface diminue avec la concentration en tween 20. Cependant, il faut noter que cette diminution n'est pas très importante. Ceci

peut être expliqué par le fait que les concentrations en tween 20 capables de réduire la tension de surface ne sont pas très élevées [0-0.2%]. Par ailleurs, les concentrations en caséinate de sodium utilisées sont supérieures à la concentration micellaire critique, ce qui expliquerait en outre, pourquoi, la tension de surface n'a pas beaucoup varié lorsqu'on a fait varier la concentration en caséinate. Le modèle de la tension de surface (Eq.2), montre clairement que cette réponse ne dépend que de la concentration du tween 20 dans le domaine de variation choisi. Donc ce dernier présente l'effet le plus caractéristique sur cette réponse (Fig.2). Ceci étant prévisible, du fait que cet élément est un fort tensioactif et son rôle principal consiste à réduire la tension de surface de la solution. Par ailleurs, la gomme xanthane n'a aucun effet sur la variation de la tension de surface.

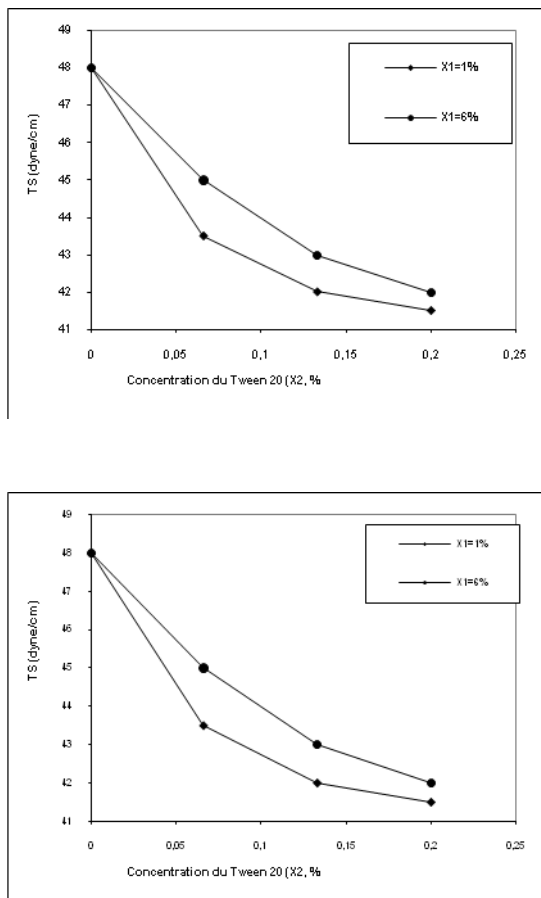


Figure 2. Courbes d'influence des facteurs sur la tension de surface.

3.2.2 Sur le module de conservation

Le module de conservation G'_0 (dans le domaine linéaire) est un paramètre rhéologique important pour l'analyse de l'état structural de la solution polymérique au repos. Il caractérise le degré de cohésion des réseaux polymériques obtenus à l'issue d'enchevêtrement ou l'interpénétration des macromolécules par effet d'interactions attractives de type de Van Der Waals ou à l'issue de leur séparation par effet d'interactions répulsives entropique ou électrostatique [16].

Le modèle (Eq.3) de la réponse G'_0 , dénote que ce paramètre rhéologique est subordonné aux concentrations du xanthane et du caséinate de sodium, comme le montre les figures 3-a et 3-b.

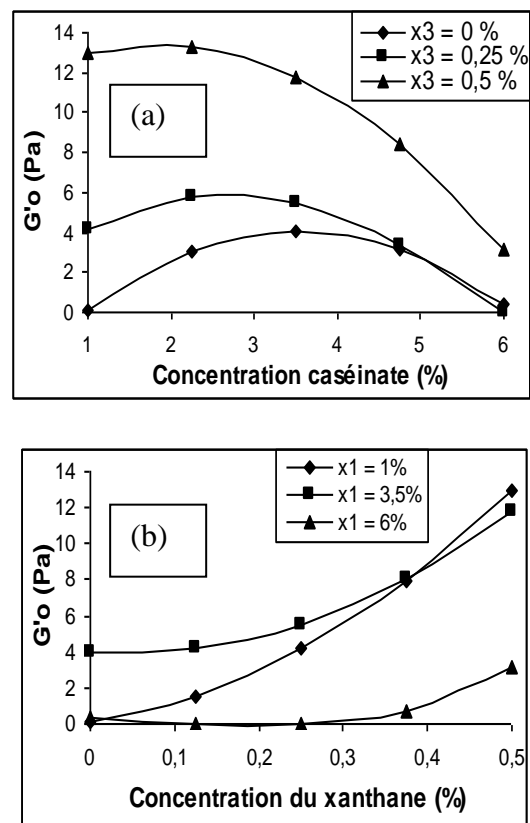


Figure 3. Courbes d'influence des facteurs sur le module de conservation G'_0 .

En outre, ces deux éléments développent une interaction négative (le coefficient, $a_{13} = - 2.52$), susceptible de modifier

négativement l'état structural du réseau polymérique, par affaiblissement de la structure. En effet, des figures 3-a et 3-b, on peut observer clairement que les trois courbes ne sont pas parallèles, d'où l'existence de cette interaction xanthane-caséinate influençant le module de conservation (le tween 20 n'a pas d'effet marquant sur G'_0). Donc, lorsque la concentration du xanthane augmente (du minimum au maximum), l'effet du caséinate de sodium (Fig.3-a) devient très négatif sur la cohésion de la structure. Et lorsque le caséinate passe de la valeur minimale à la valeur maximale (Fig.3-b), le xanthane perd toutes ses propriétés épaississantes, vue que les valeurs enregistrées de G'_0 sont relativement petites.

3.2.3 Sur le potentiel Zêta

Le potentiel zêta représente la charge électrostatique que les particules acquièrent quand elles sont mises en suspension [17]. Sa mesure permet d'évaluer la part de contribution des interactions éventuelles électrostatiques répulsives sur l'affaiblissement de la rigidité de la structure, du fait que les deux polymères sont anioniques. Le xanthane a un effet positif sur le potentiel zêta (valeur absolue), au regard de la figure 4-b, particulièrement pour des concentrations faibles de caséinate. Selon Mirhosseini et al. [18] qui ont utilisé les mesures du potentiel zêta pour déterminer la stabilité d'une émulsion alimentaire, l'augmentation de la valeur absolue du potentiel zêta est due en particulier à sa charge négative. L'augmentation de la concentration en xanthane conduit à une augmentation de la charge négative de la surface suivie par une augmentation du potentiel zêta. Néanmoins, cet effet s'atténue par la présence en excès du caséinate. En conséquence, les interactions électrostatiques répulsives dans ces conditions ne peuvent que s'affaiblir, pour laisser seul les interactions répulsives de nature entropique. Par ailleurs, en dépit du

caractère légèrement anionique du caséinate, il apparaît que cet élément abaisse le potentiel zêta (Fig.4-a).

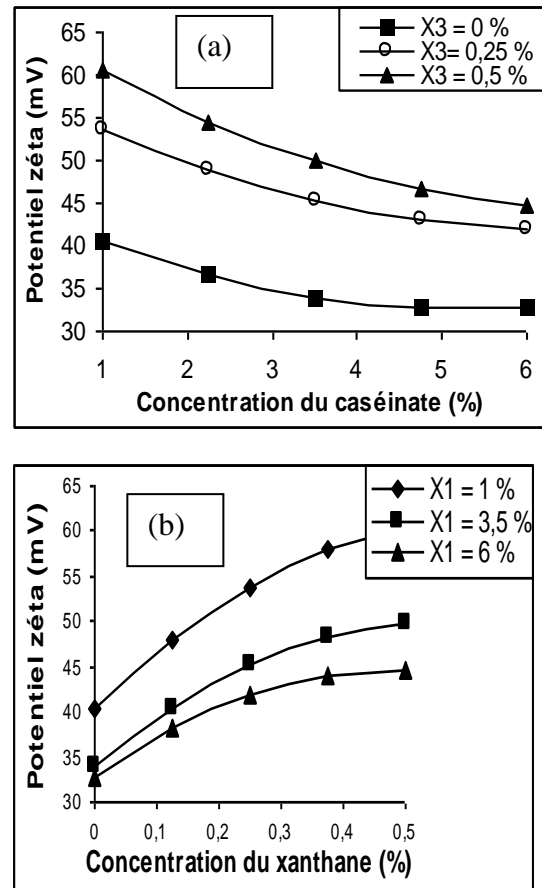


Figure 4. Courbes d'influence des facteurs sur le potentiel Zêta.

Cet abaissement du potentiel zêta est dû probablement à l'augmentation du nombre de gros agrégats formés, qui lorsqu'ils sont soumis au champ électrique, E , leur vitesse de déplacement, V , est plus faible que celle d'une sub-micelle ou d'une protéine individuelle. Ainsi, ils auront une mobilité électrophorétique, ($\mu = V/E$), plus petite et par là même un potentiel zêta plus faible.

Ainsi, à l'issue de ces constatations, on peut déduire que la formation d'assemblages micellaires de caséinate de sodium affaiblit les interactions électrostatiques répulsives et de ce fait, le relâchement de la rigidité de la structure,

observé lorsqu'on dépasse la concentration critique de caséinate, est causé par les interactions ségréatives qui ont eu lieu entre les deux polymères par incompatibilité thermodynamique. Donc les interactions répulsives observées, à l'issue d'étude d'effet sur le module de conservation, G'_0 , entre le xanthane et le caséinate ne sont pas d'origine électrostatiques. On remarque aussi l'absence de l'effet du tween 20 sur le potentiel zêta, et ceci est dû au fait qu'il est non ionique.

4. CONCLUSION

Il ressort de cette étude d'effet sur les propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la solution aqueuse les points importants suivants. Pour la tension de surface, le tween 20 est le facteur le plus important, susceptible de la faire baisser de façon dominante. Les autres constituants ont un effet négligeable. En plus, il n'existe pas d'interaction double entre les constituants, pouvant modifier les propriétés de surface. Pour le module de conservation, le tween 20 a une influence négligeable sur la cohésion intermoléculaire au sein du mélange polymérique. Globalement, c'est le caséinate de sodium qui est responsable de la fragilité de la cohésion intermoléculaire. Par contre, le xanthane a toujours un effet positif sur G'_0 et donc sur la cohésion. Ainsi, il existe une interaction forte ségréative entre le caséinate et le xanthane, présentant un effet négatif sur G'_0 et par la même sur la cohésion de la solution polymérique. Pour le potentiel zêta, l'effet du xanthane est positif. Cependant, celui du caséinate de sodium est négatif, ce qui laisse supposer que ce phénomène est dû à la différence des charges de ces deux colloïdes.

REFERENCES

- [1] Dickinson E., 1995. Emulsion stabilization by polysaccharides and protein-polysaccharide complexes. In A.M. Stephen, *Food polysaccharides and their applications*, Marcel Dekker Inc, New York, 501-515.
- [2] Grinberg V., Tolstoguzov V., 1997. Thermodynamic incompatibility of proteins and polysaccharides in solutions, *Food Hyd.*, Vol. 11 (2), 145-158.
- [3] Tuinier R., Rieger J., de Kruif C.G., 2003. Depletion-induced of phase separation in colloid-polymer mixtures, *Adv. Colloid Int. Sci.*, Vol. 103 (1), 1-31.
- [4] Dickinson E., Golding M., Povey M.J.W., 1997. Creaming and flocculation in oil-in-water emulsions containing sodium caseinate, *J. Colloid Int. Sci.*, Vol. 185 (2), 515-529.
- [5] Tolstoguzov V., 1997. Thermodynamic aspects of dough formation and functionality, *Food Hyd.*, Vol. 11 (2), 181-193.
- [6] Laneuville S.I., Paquin P., Turgeon S.L., 2000. Effect of preparation conditions on the characteristics of whey protein-xanthan gum complexes, *Food Hyd.*, Vol. 14 (4), 305-314.
- [7] Nono M., Lalouette L., Durand D., Nicolai T., 2011. Cluster formation and phase separation in mixtures of sodium k-carrageenan and sodium caseinate, *Food Hyd.*, Vol. 25 (4), 743-749.
- [8] Gast A.P., Hall C.K., Russel W.B., 1983. Polymer-induced phase separations in non aqueous colloidal suspensions, *J. Colloid Int. Sci.*, Vol. 96 (1), 251-267.
- [9] Dickinson E., Ritzoulis C., Povey M.J.W., 1999. Stability of emulsions containing both sodium caseinate and Tween 20, *J. Colloid Int. Sci.*, Vol. 212 (2), 466-473.

- [10] Krstonosic V., Dokic L., Dokic P., Dapcevic T., 2009. Effects of xanthan gum on physicochemical properties and stability of corn oil-in-water emulsions stabilized by polyoxyethylene (20) sorbitanmonooleate, *Food Hyd.*, Vol. 23 (8), 2212–2218.
- [11] Hemar Y., Tamehana M., Munro P.A., Singh H., 2001. Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixtures of commercial milk protein products and xanthan gum, *Food Hyd.*, Vol. 15 (4), 565-574.
- [12] Nash W., Pinder D.N., Hemar Y., Singh H., 2002. Dynamic light scattering investigation of sodium caseinate and xanthan mixtures, *Int. J. Biol. Macromol.*, Vol. 30 (5), 269–271.
- [13] Dickinson E., Radford S.J., Golding M., 2003. Stability and rheology of emulsions containing sodium caseinate: combined effects of ionic calcium and non-ionic surfactant, *Food Hyd.*, Vol. 17 (2), 211-220.
- [14] Rebiha M., Moulai-Mostefa N., HadjSadok A., Sabri N., 2005. Comportement rhéologique des systèmes mixtes biopolymères/proteins. *J. Phys. IV.*, Vol. 124, 183-188.
- [15] Morgenthaler S., Schumacher M.M., 1999. Robust analysis of a response surface design, *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, Vol. 47 (1), 127-141.
- [16] Loveday S.M., Rao M.A., Creamer L.K., Singh H., 2010. Rheological behavior of high-concentration sodium caseinate dispersions, *J. Food Sci.*, Vol. 75 (2), 30-35.
- [17] Hunter R.J., 1981. Zeta potential in colloid science. Principles and applications, Ottewill R.H. and Rowell R.L. (Eds), *Colloid Science*, Academic Press, London, 386 p
- [18] Mirhosseini H., Tan C.P., Hamid N.S.A., Yusof S., 2008. Effect of Arabic gum, xanthan gum and orange oil contents on ζ -potential, conductivity, stability, size index and pH of orange beverage emulsion, *Colloids Surf. A.*, Vol. 315 (1-3), 47–56.

Sommaire

L'homme et la biodiversité marine : les liaisons dangereuses. Rachid Amara.....	6
Etude théorique du comportement des tirants d'ancrage dans un sol pulvérulent. Feriel Mekki, Mohamed Meksaouine & Mohamed Guenfoud.....	22
Elaboration, caractérisation et comportement à l'oxydation haute température des nanomatériaux Fe₃O₄, Al₂O₃ obtenus par mécanosynthèse. Rabah Chater, Sifi Ghrieb & Daoud Chaanbi.....	31
Etude et réalisation de capteurs de gaz à base de silicium poreux. Nassera Ghellai, Anisse Chiali, Nasr Eddine Chabane-Sari & Nouredine Gabouze....	40
Effet <i>in vitro</i> du glucose sur le fibroblaste adventiciel aortique de <i>Psammomys obesus</i>. Billel Chaouad , Fouzia Zerrouk , Adel Ghoul , Khira Othmani-Mecif , Hamid Sahraoui Samia Neggazi , Souhila Aouichat-Bouguerra & Yasmina Benazzoug.....	48
Transfert de chaleur dans un canal Partiellement rempli d'une matière poreuse. Benmerkhi Meriem & Afrid Mohamed.....	56
Etude de l'activité antibactérienne des huiles essentielles de la Sauge officinale : <i>Salvia officinalis</i> L. sur quelques entérobactéries pathogènes. Salah Benkherara, Ouahiba Bordjiba & Ali Boutlelis Djahra.....	72
Inventaire des Plantes Mellifères du Sud Ouest Algérien. Hadda Laallam, Larbi Boughediri & Samia Bissati.....	81
Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Rachid Djamaï, Djamel Fadel, Aziz Laïfa, Mohamed Benslama, Youcef Daoud & Vincent Vallès.....	90
Propriétés physicochimiques et rhéologiques d'un mélange aqueux de biopolymères et d'un tensioactif non ionique. M. Rebiha, N. Moulai Mostefa & A. Hadj Sadok.....	99