

-IEE-

Conférence Internationale sur l'Ingénierie de l'Environnement et l'Ecologie

Proceedings of Engineering & Technology -PET-



Editeur : Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)

-IEE-



CNPSI

Centre National de la Promotion Scientifique et de L'innovation

Conférence Internationale sur l'Ingénierie de l'Environnement et l'Ecologie

Proceedings of Engineering & Technology -PET-

PET-Vol. 88

ISSN : 1737-9334

Editeur : Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)

Comités

Comités Scientifiques

Atanas Lazarov

Ahmed Rhif

Ali Akbar Jalali

Anna Belyaeva

Anna Ólafsdóttir

Arnaud Bournel

A. Sargolzaei

Abhilasha Gaur

Abdul Kadir Ozcan

Anand Rajavat

Ankit Chaudhary

Belkacem Sait

Belgin Emre Turkey

Barbara Bis

Bahareh Safaei K

Brajesh Kumar Kaushik

Chang-Hua Lien

Caroline Desa

Djamila Rekioua Ziani

Esin Can

G. Darmani

H. Ramezanpour

H.V. Ramakrishnan

Ille Gebeshuber

Jin-Cherng Lin

Jian Yuan

Khaled Sailan

Massato Oguchi

Madeleine Du Toit

Marwa Ezzat

Mohammad H.Sobhani

Moon Ho Lee

Rita Cucchiara

Rajni Garg

Said Grouni

Silaiman Khalifa Yakhlef

Xu Chen

Sommaire

Contribution à l'étude numérique de la production d'entropie dans l'écoulement d'un fluide soumis à des contraintes variables dans le temps Ben Hsine Hamdia.....	1
Répercussion du stress oxydatif induit par les contraintes environnementales sur les plantes de <i>Rosmarinus officinalis</i> L Bekka Selma, Ouatah Cylia, Messaoudi Aziza, Djazouli Zahr-Eddine.....	5
Etude d'une Unité de Séchage de Sel à l'Energie Solaire Chama Ben Lagha, Leila Zili-Ghedira, Maher Ben Cheikh.....	8
Intérêt de l'intégration de la dimension spatiale dans la modélisation de taux de chômage en Tunisie Meriem Bel Haj Mohamed.....	14
Convection Naturelle au sein d'une Cavité Remplie de Deux Fluides Immiscibles Labsi Nabila, Benkahla Youb Khaled, Chebri Sofiane, Boudiaf Ahlem.....	22

Email : hamdiabenhssine@gmail.com

Numéro téléphone : 21111787-94690791

Sujet de thèse : *Contribution à l'étude numérique de la production d'entropie dans l'écoulement d'un fluide soumis à des contraintes variables dans le temps*

Elaboré par: Ben Hsine Hamdia

Sommaire :

- 1- Introduction**
- 2- Fluide: Définition, Propriétés Physique et Classification**
- 3- Deuxième Principe De La Thermodynamique**
- 4- Irréversibilités Dans Les Fluides**
- 5- conclusion**

1-Introduction :

- La production d'entropie due toujours au transfert de chaleur : Conduction, convection, et rayonnement.
- Le calcul de l'entropie se fait par la résolution numérique des équations bilan de masse, de quantité de mouvement, et d'énergie à l'aide d'une méthode d'éléments finis à volume Contrôlé (CVFEM).

Problématique :

- **Qu'est ce qu'un fluide ?**
- **Comment calculer l'entropie d'un fluide?**
- **Quels sont les facteurs qui influençant la génération d'entropie ?**

2- Fluide: Definition, Proprieties Physique et Classification:

a-Définition :

Un fluide: est un milieu matériel, continu, parfaitement Déformable et sans rigidité, qui peut s'écouler. Il peut être sous l'état solide (peu compressible) ou sous l'état gazeux (très compressible).

b-Propriétés Physique :

Masse volumique :

$$\rho = \frac{m}{v} = [Kg/m^3]$$

Poids volumique spécifique :

$$\sigma = \frac{m \cdot g}{v} = \rho \cdot g [N/m^3]$$

Densité :

$$\rho = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

Avec ($\rho_{ref} = \rho_{air}$ dans le cas de gaz et $\rho_{ref} = \rho_{eau}$ dans le cas de liquide)

La viscosité: c'est une grandeur qui caractérise le frottement interne du fluide autrement dit sa viscosité à s'écouler. Ou on a la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

✓ *Viscosité dynamique:* exprime la proportionnalité entre la force qu'il faut

exercer sur une plaque lors qu'elle est plongée dans un courant et la variation de la vitesse des veines de fluide entre les deux faces de la plaque.

✓ *Viscosité cinématique :* $\nu = \frac{\mu}{\rho} = (m^2/s)$

Classification des fluides : On peut classer les fluides newtoniens selon la compressibilité (fluide compressible et fluide incompressible) et aussi selon la viscosité (fluide parfait et l'autre réel).

3- Deuxième principe de la thermodynamique:

- La notion d'entropie est introduite en 1865 par Rudolf Clausius dans le cadre du deuxième principe de la thermodynamique classique.
- L'entropie est une grandeur physique qui caractérise le degré de désorganisation d'un système.
- Le second principe de la thermodynamique qui est un principe d'évolution: il introduit la notion d'irréversibilité des phénomènes physique. Cette irréversibilité est formalisée par la fonction d'entropie S, en fonction d'état extensive non conservative.

Avec $C_{rée} = 0$ si la transformation est réversible et si $C_{rée}$ est différent de zéro donc la transformation est irréversible.

$$S_{crée} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{ext} \geq 0$$

Calcul d'entropie: le calcul d'entropie se fait soit par une résolution mathématique (dimensionnelle ou adimensionnelle) ou par une résolution mathématique par l'intermédiaire d'un logiciel noté **COMSOL Multiphysics**.

Résolutions numérique:

✓ Se fait par le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique

basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés.

✓ Ce programme permet le calcul de la production d'entropie à partir de la résolution des équations de Navier Stokes et de l'énergie.

- ✓ Les résultats numériques obtenus sont validés avec des résultats trouvés dans les littératures
- Plusieurs chercheurs ont étudié la production d'entropie telle que:
 - **Datta** : a étudié la génération d'entropie dans une flamme laminaire confinée, il a distingué que la principale cause pour la production d'entropie due au transfert de chaleur à l'intérieur de flamme.
 - **Baytas**: il a présenté une étude numérique pour calculer l'entropie dans une enceinte inclinée, il met l'accent sur l'influence du nombre de Rayleigh (Ra), nombre de Bejan et de l'angle d'inclinaison sur la production d'entropie. La production minimale d'entropie est due considérablement à l'angle d'inclinaison de l'enceinte.

4- Irréversibilités Dans Les Fluides :

- Magherbi et Al ont étudié la génération d'entropie au début de la convection naturelle. Les résultats montrent que la génération d'entropie totale prend une valeur maximale juste au début du régime transitoire, qui augmente avec le nombre de Rayleigh et le rapport de distribution des irréversibilités.

Ils ont constaté qu'à mesure que le temps augmente la génération d'entropie diminue et tend vers une valeur constante témoignant de l'atteinte du régime stationnaire. Ils ont observé que cette diminution vers une valeur constante se fait asymptotiquement à un nombre de Rayleigh faible tandis qu'elle présente des oscillations à des nombres de Rayleigh élevés.

- Bouabid et al ont étudié numériquement l'irréversibilité dans un fluide en convection naturelle à travers une cavité carrée en présence d'un champ magnétique horizontal imposé. D'après tout résultat trouvé Ils ont constaté que le nombre de Hartmann relatif au champ magnétique freine l'écoulement et par suite diminue la production d'entropie.
- Eegunjobi et Makinde ont étudié numériquement la deuxième loi de la

Thermodynamique relative à un écoulement stable d'un fluide conducteur et incompressible dans un canal avec des parois imperméables et des conditions aux limites de type convectives d'après les résultats on distingue que la minimisation de la production d'entropie peut être atteinte par une combinaison appropriée des valeurs des propriétés thermodynamiques qui contrôlent l'écoulement de système.

- **HIDOURI et al** porte sur la détermination numérique de l'entropie dans un thermosolutal de convection en utilisant la méthode des volumes finis adaptée à la grille décalée en une cavité carrée remplie d'un gaz binaire avec deux parois verticales l'un est chauffé et l'autre est refroidi et les deux autres murs sont isolés.
- *Après discussions ils ont montré que:* La génération totale d'entropie augmente avec l'augmentation de L'effet de thermodiffusion et la valeur absolue de la flottabilité.
- ❑ La génération d'entropie totale prend une valeur minimale **S_{min}**, pour des rapports de diffusion thermique ($K_T = 0,3$)
- ❑ La production minimale de taux d'entropie est observée à nombre de Grashof

thermique très élevé ($GrT = 10^5$) et de rapport de flottabilité $N = - 1$.

Dans le cas de forces de flottabilité thermique et solutale opposées et pour des valeurs plus élevées du nombre de Grashof thermique, la thermodiffusion tend d'abord à diminuer la génération d'entropie, puis à stabiliser l'écoulement du fluide. Lorsque le processus de thermodiffusion devient considérable $KT = 0,5$

5- conclusion :

Une étude bibliographique sur les irréversibilités et surtout l'irréversibilité des fluides montre l'influence des plusieurs facteurs sur la production d'entropie telle que:

- ✓ Le nombre de Rayleigh .
- ✓ Le rapport de distribution des irréversibilités.
- ✓ L'effet de thermodiffusion et la valeur absolue de la flottabilité.
- ✓ Le nombre de Bejan et de l'angle d'inclinaison.

Répercussion du stress oxydatif induit par les contraintes environnementales sur les plantes de *Rosmarinus officinalis L*

BEKKA Selma¹, OUATAH Cylia¹ MESSAOUDI Aziza¹ et DJAZOULI Zahr-Eddine^{1,2}

(1) Ecole supérieure des Sciences de l'Aliment et Industries Agro-alimentaires (ESSAIA), Avenu Ahmed Beaulieu, El Harrach, Alger, laboratoire des Aliments.

(2) Université de Blida 1, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biotechnologie, laboratoire de Biotechnologie des Productions Végétales, B.P. 270, route de Soumaa, Blida, Algérie.

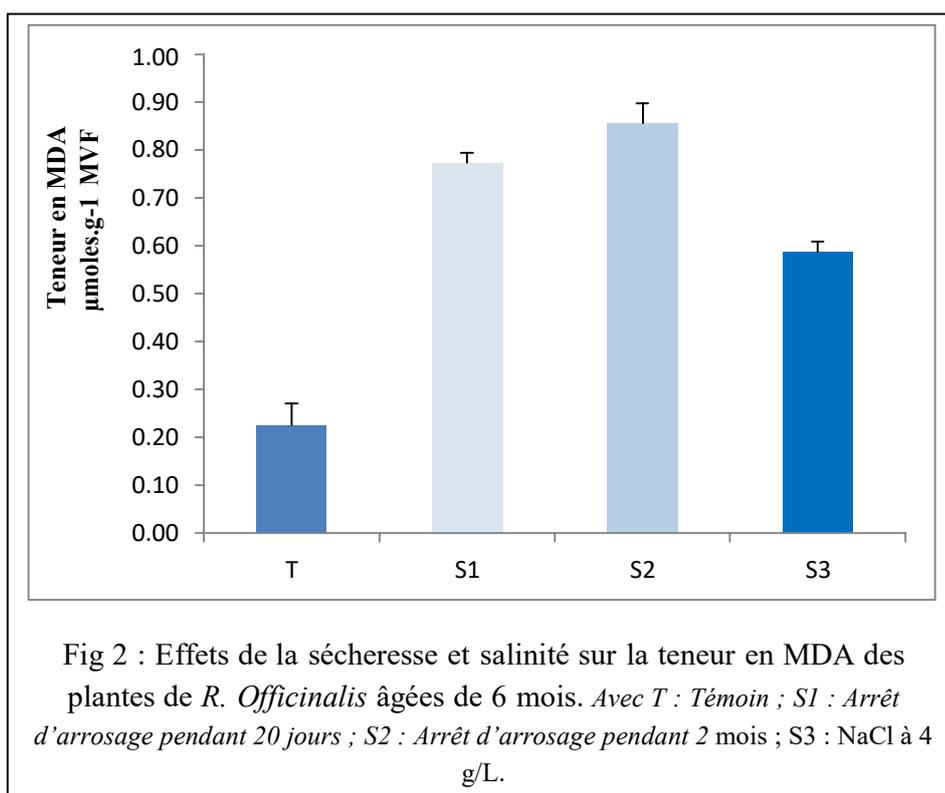
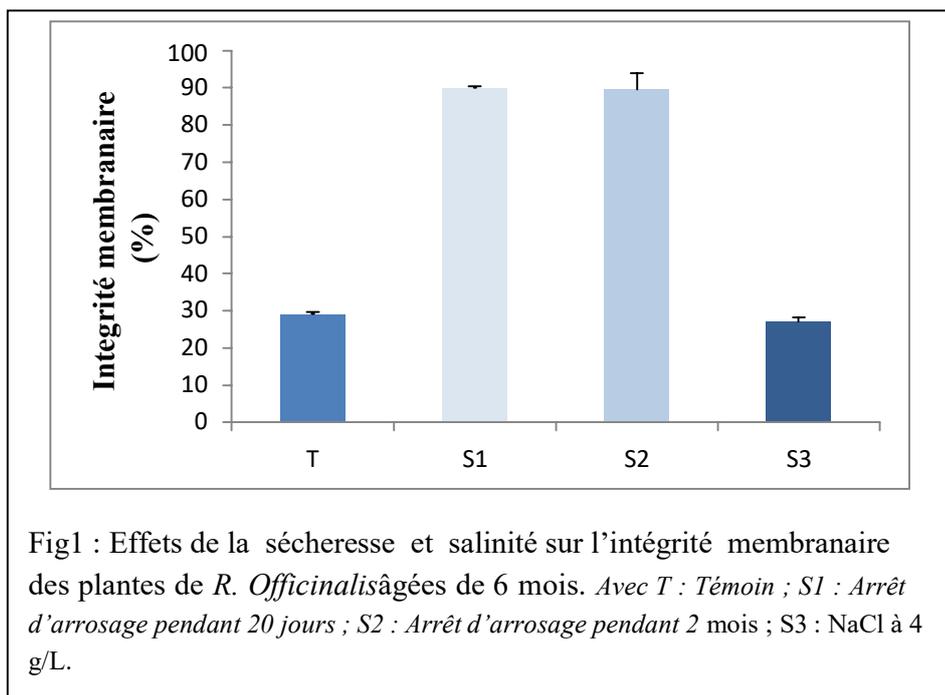
bekka@selma.live.fr/bekka@essaia.dz
c_ouatah@essaia.dz
a_messaoudi@essaia.dz
zahro2002@gmail.com

Introduction :

Le stress oxydatif est généralement utilisé pour toute agression environnementale ayant pour conséquence une production accrue des espèces réactives de l'oxygène. C'est dans cette optique, que nous nous sommes proposé d'évaluer le degré des dommages occasionnés chez les plantes de *Rosmarinus officinalis* Let leurs réponses vis-à-vis au stress oxydatif induit par la sécheresse et la salinité du sol. Pour ce faire, les plantes âgées de 4 mois ont été séparées en quatre blocs et soumises par la suite à un stress de sécheresse : modéré (arrêt d'arrosage de 20 jours) ; sévère (arrêt d'arrosage de 2 mois) et stress salin (NaCl à 4g/L).

Résultats :

Nos résultats ont démontré que sous l'effet du stress hydrique et salin, une augmentation significative ($p \leq 0.05$) de la teneur en malondialdéhyde (MDA) a été enregistrée. Ceci peut témoigner d'un stress oxydant au niveau des feuilles du romarin. Les résultats obtenus ont également révélé une très forte fuite d'électrolytes pour les plantes ayant subi un stress de sécheresse (modéré et sévère), ce qui indique une altération de l'intégrité membranaire des cellules, lors du stress de sécheresse, due à la peroxydation lipidique causée par un stress oxydatif. Ce qui indique une dégradation de l'état de la structure membranaire foliaire des plantes du romarin sous stress hydrique. De même, il y a eu augmentation des activités antioxydantes notamment les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tains condensés avec une élévation remarquable de la capacité antioxydante enzymatique totale (Canet). Cependant, la fuite relative d'ions, l'activité antioxydante et la Canet restent inchangées chez les plantes soumises à une contrainte saline.



Conclusion :

Les plantes du romarin sont adaptées à vivre dans des conditions de sécheresse, elles sont capables donc de mettre en œuvre un système de prévention et détoxification en réponse au stress. Ces résultats obtenus, suggèrent que ces plantes disposent d'un puissant système antioxydant, leur permettant d'atténuer les effets délétères du stress oxydatif engendrés par la sécheresse.

Références :

- [1] Bekka, S., Tayeb-Hammani, K., Boucekkine, I., El-AminAissiou, M.Y., Djazouli, Z.E. (2022). Adaptation strategies of *Moringaoleifera* under drought and salinity stresses. *Ukrainian Journal of Ecology*. 12:8-16.
- [2] Hasan, M., Alharby, H., Hajar, A., Hakeem, K., Alzahrani, Y., Arabia, S. (2018). Effects of magnetized water on phenolic compounds, lipid peroxidation and antioxidant activity of *Moringa* species under drought stress. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 28:803-810.
- [3] Moller, I.M. Jensen, P.E. Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annu.Rev. Plant Biol.* 58: 459-481.
- [4] Benhassaine-Kesri, G. Aid, F. Demandre, C. Kader J.C. Mazliak, P. (2002). Drought stress affects chloroplast lipid metabolism in rape (*Brassica napus*) leaves. *PhysiolPlantarum*. 115: 221-227.
- [5] Smirnoff, N. (1993). The Role of Active Oxygen in the Response of Plants to Water Deficit and Desiccation. *New Phytologist*. 125: 27-58.
- [6] Sies, H. (1997). Oxidative stress: oxidants and antioxydants. *ExperimPhysio*. 82 (2):291- 295.

Etude d'une Unité de Séchage de Sel à l'Energie Solaire

Chama Ben Lagha^{#1}, Leila Zili-Ghedira^{#2}, Maher Ben Cheikh^{#3}

[#] *Département de Génie Energétique, LESTE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Université de Monastir
Rue Ibn El Jazar, Monastir 5019, Tunisie*

Email 1 - Benlaghachama@gmail.com

Email 2 - leilazilighedira@gmail.com

Email 3 - benchiekh.maher@gmail.com

Résumé— Le secteur de séchage étant un secteur très énergivore, ce travail propose une solution qui réside dans l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage du sel. Une étude d'une unité de séchage de sel (serre) est présentée. La modélisation mathématique de la serre utilisée pour le séchage du sel a été menée. La résolution numérique du système d'équations résultant en utilisant une méthode numérique a été faite. Un code de calcul Matlab a été élaboré. Son exploitation a permis de visualiser les évolutions de l'éclairement solaire, des températures d'air extérieur, d'air intérieur, du sel et de la couverture ainsi que des humidités de l'air extérieur et de l'air intérieur, et ce pour des journées types des différentes saisons. D'un autre côté, des expériences de séchage du sel en couche mince ont été menées grâce à l'utilisation d'un dessiccateur. Les évolutions de la teneur en eau et de la vitesse de séchage ont été examinées et commentées. L'impact de la température de l'air sur l'opération de séchage a été examiné. Les données expérimentales de séchage ont été ensuite ajustées à l'aide d'un modèle mathématique préexistant dans la littérature sélectionné parmi plusieurs modèles, le but étant d'établir une cinétique de séchage du sel. De suite, cette corrélation élaborée a été exploitée dans le code numérique de calcul sous Matlab, ce qui a permis de déterminer l'évolution de la teneur en eau du sel dans la serre pour des jours types.

Mots clés— séchage, sel, serre, énergie solaire, étude numérique, détermination expérimentale cinétique de séchage en couche mince.

I. INTRODUCTION

À la lumière de la perspective d'une rareté des énergies fossiles, l'augmentation de leurs prix au cours de ce siècle et la croissance de la consommation énergétique en parallèle avec une déchéance de la production nationale, la Tunisie a exprimé son intérêt à intégrer des sources d'énergies renouvelables en remplacement dans certains choix industriels et à accélérer la mise en œuvre des projets visant à maîtriser l'énergie [1]. De plus, la Tunisie bénéficie d'une situation géographique avantageuse qui lui confère un taux d'ensoleillement important [2]. Le secteur du séchage, qui compte parmi les secteurs les plus demandeurs d'énergie, se présente comme un candidat idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire, compte tenu de son importance en tant qu'opération unitaire largement répandue dans l'industrie tunisienne.

Dans ce contexte, ce travail propose de mener une étude de conception pour un séchoir solaire en Tunisie afin d'optimiser l'utilisation de cette source d'énergie renouvelable. Cette initiative vise à proposer des solutions concrètes pour répondre aux besoins spécifiques du secteur industriel.

L'étude présentée dans ce travail vise à étudier un séchoir solaire de sel qui exploite la convection naturelle du vent et le rayonnement solaire afin d'obtenir un sel parfaitement séché. Le but étant est de lancer une étude d'une unité de séchage du sel de camelle (serre) uniquement à l'énergie solaire.

Le travail comporte à la fois un volet théorique et un volet expérimental. Dans le volet théorique, les échanges thermiques qui se produisent au sein de la serre sont établis afin d'aboutir au bilan énergétique de celle-ci. La modélisation mathématique de la serre utilisée pour le séchage du sel est menée. La résolution numérique du système d'équations résultant en utilisant une méthode numérique est faite. Un code de calcul Matlab est élaboré. Dans le volet expérimental, des expériences de séchage du sel en couche mince sont menées grâce à l'utilisation d'un dessiccateur, le but étant d'établir une cinétique de séchage du sel et de l'utiliser dans le code.

II. BILAN ENERGETIQUE DE LA SERRE

Cette section présente le bilan énergétique global de la serre. La figure 1 illustre la représentation graphique de tous les flux de chaleur interagissant entre la serre et son environnement. À partir de ce schéma, il est possible de formuler les bilans des flux thermiques propres à chaque composante de la serre.

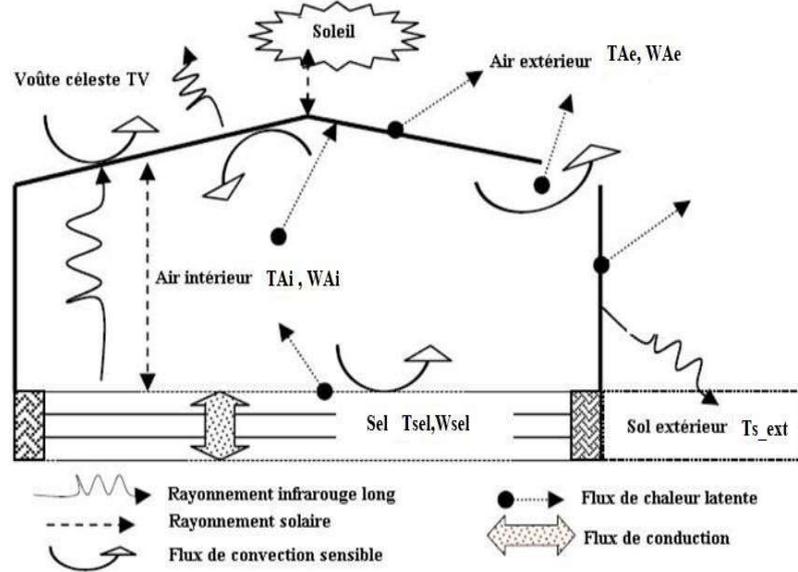


Fig. 1 Schéma des différents flux dans la serre

A. Hypothèses simplificatrices

Le présent travail de modélisation thermique a été inspiré par les travaux de Janjai et al [3]. Un modèle thermique pour évaluer les performances d'un séchoir tunnel a été développé. Les hypothèses suivantes ont été faites lors du développement du modèle thermique :

- Il n'y a pas de stratification de l'air à l'intérieur de l'unité de séchoir tunnel.
- Le calcul est basé sur un modèle de séchage en couche mince.
- La chaleur spécifique de l'air, de la couverture et du produit est constante.
- Les transferts de chaleur par rayonnement du sol au couvercle et du sol au produit sont négligeables.
- L'épaisseur de la couverture est si réduite qu'il est possible de négliger les transferts de chaleur par conduction
- Les caractéristiques thermiques des matériaux constituant la serre, de l'air ambiant, et du sel demeurent stables au sein de la plage de températures envisagée.
- Dans la majorité des modèles décrits dans la documentation, il est supposé que les deux côtés de la couverture soient maintenus à la même température en raison de la faible épaisseur de celle-ci. Dans cette situation, une valeur moyenne entre la température extérieure et intérieure de la couverture vitrée est prise en considération. En conséquence, les températures des deux côtés du matériau de couverture sont équivalentes : $T_{C2} \equiv T_{C1} \equiv T_C$.

B. Bilan énergétique de la serre

Les équations de transfert sont formulées en se basant sur des bilans thermiques qui établissent une analogie entre les transferts de chaleur et les transferts électriques.

- Bilan d'énergie sur la couverture :

$$\rho_c V_c C_{Pc} \frac{dT_c}{dt} = Q_C^S + Q_{sel,c}^r + Q_{Ai,c}^L + Q_{Ai,c}^c + Q_{cl,c}^r + Q_{Ae,c}^c \quad (1)$$

Q_C^S : Puissance de rayonnement solaire absorbée par la couverture.

$Q_{Ae,c}^c$: Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air extérieur et la couverture.

$Q_{Ai,c}^c$: Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et la couverture.

$Q_{Ai,c}^L$: Chaleur latente générée par la condensation de la vapeur d'eau sur la paroi intérieure de la couverture.

$Q_{cl,c}^r$: Puissance radiative entre le ciel et la couverture.

$Q_{sel,c}^r$: Puissance radiative entre le sel et la couverture.

- Bilan thermo-hydrigue de l'air intérieur :

a) Bilan de chaleur sensible :

$$\rho_{ai} V_{ai} C_{pai} \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{Sel,A_i}^C + Q_{C,A_i}^C + Q_{A_e,A_i}^C \quad (2)$$

Q_{C,A_i}^C : Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et la couverture

Q_{Sel,A_i}^C : Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et le sel

Q_{A_i,A_e}^C : Puissance de renouvellement de l'air sec

b) Bilan de chaleur latente :

$$\rho_{ai} V_{ai} L_v \frac{dW_{ai}}{dt} = Q_{Sel,A_i}^L + Q_{C,A_i}^L + Q_{A_e,A_i}^L \quad (3)$$

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).

$Q_{A_i,C}^L$: Puissance de l'évaporation au niveau de la couverture (W).

Q_{A_i,A_e}^L : Puissance de renouvellement de l'air humide (W).

Q_{Sel,A_i}^L : Puissance de l'évaporation au niveau du sel (W).

-Bilan d'énergie du sel :

$$\rho_{sel} V_{sel} C_{sel} \frac{dT_{sel}}{dt} = Q_{Sel}^S + Q_{A_i,Sel}^C + Q_{C,Sel}^r + Q_{A_i,Sel}^L \quad (4) (4)$$

Q_{Sel}^S : Puissance du flux de rayonnement solaire absorbé par le sel (W).

$Q_{A_i,Sel}^C$: Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre le sel et l'air intérieur (W).

$Q_{C,Sel}^r$: Puissance radiative entre le sel et la couverture (W).

$Q_{A_i,Sel}^L$: Puissance de l'évaporation au niveau du sel (W).

Le tableau I donne les caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composantes de la serre.

TABLEAU I
 CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET SPECTRALES MOYENNES DES COMPOSANTES DE LA SERRE

	Emissivité ϵ	Absorptivité α	Réfectivité ρ	Transmissivité τ	C_m (J/kg.K)	ρ (Kg/m ³)	λ (W/m.K)
Sel	0.34	0.75	0.25	0	880	2160	
Air	-	-	-	-	1007.26	1.161	0.024
Verre	0.93	0.15	0.1	0.75	2700	840	0.85
Ciel	1	1	0	0			
Sol	0.9				1480	1620	13.21

III.

DIMENSIONS DU SECHOIR SOLAIRE

Les dimensions du séchoir solaire sont données dans la figure 2.

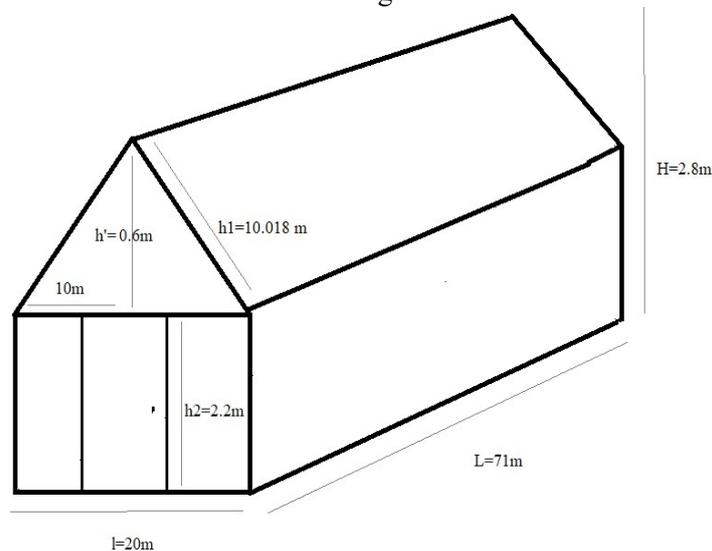


Fig. 2 Dimensions du séchoir solaire type serre

Les dimensions du séchoir solaire à tunnel sont présentées dans le tableau II :

TABLEAU III
 PARAMETRES DE CONCEPTION DU SECHOIR SOLAIRE

Paramètres	Valeur
Surface de la serre (sol intérieur)	1491 m ²
Longueur de la serre (L)	71 m
Largeur de la serre (l)	21m
Hauteur (H)	2.8 m
Surface de la couverture (Sc)	1839.356 m ²
Volume de la serre (V)	3727.5 m ³
Épaisseur de la couverture(V)	0.006 m
Épaisseur du sel (h _{sel})	0.03 m
Longueur de sel (L _{sel})	69.45 m
Largeur de sel (l _{sel})	20m

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Le Tableau III présente les conditions climatiques extérieures moyennes pour chaque journée-type.

Afin d’analyser l’évolution des courbes d’humidité de l’air, de température, etc., nous avons choisi quatre dates, représentant respectivement les journées les plus froides et les plus chaudes de chaque saison de l’année 2022.

La sélection des journées types implique de choisir plusieurs journées qui représentent bien les variations climatiques tout au long de l’année à ZARZIZ (Tunisie).

- Été : une journée chaude avec beaucoup d’ensoleillement.
- Automne : une journée qui représente la baisse des températures et une luminosité solaire modérée.
- Hiver : une journée froide avec moins d’ensoleillement.
- Printemps : une journée de transition avec des températures en augmentation et une luminosité solaire croissante.

• TABLEAU IIIII
 CONDITIONS METEOROLOGIQUES EXTERIEURES MOYENNES POUR CHAQUE JOURNEE

Journées types	Température moyenne (°C)	Eclairement Solaire global Egh (W/m ²)	Durée d'ensoleillement (h).	U _{e,moy} (m/s)
Jour 1 26/01/2022	10.85	360	11h	2.47
Jour 2 18/03/2022	16.49	364.31	12h	2.4
Jour 3 17/08/2022	32.34	534.6153	13h	3.55
Jour 4 25/11/2022	20.3	348.05	10h	1.86

Les échanges convectifs et radiatifs au sein de la serre sont établis. Après discrétisation et simulation numérique, on obtient les résultats pour des journées types. Comme exemple et pour le jour type 17/8/2022, la figure 3 représente la variation des températures de l’air intérieur T_{Ai}, de l’air extérieur T_{Ae}, du sel T_{sel}, de la couverture T_c et de l’éclairement solaire Egh et la figure 4 représente la variation des humidités de l’air intérieur et extérieur.

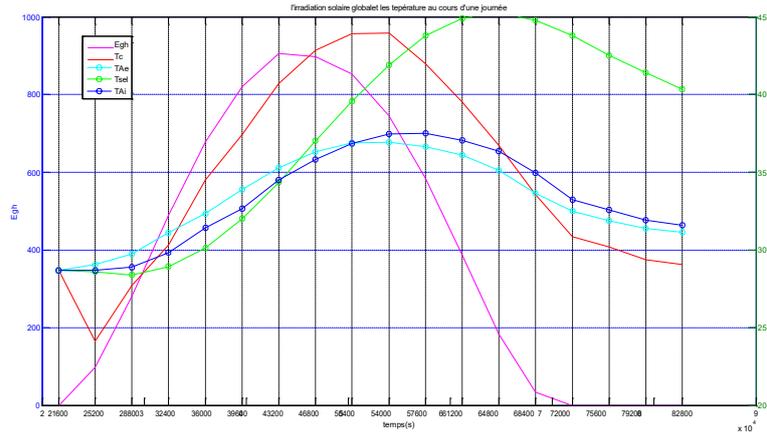


Fig. 3 Variations des températures et de l'éclairage global pour la journée type 3

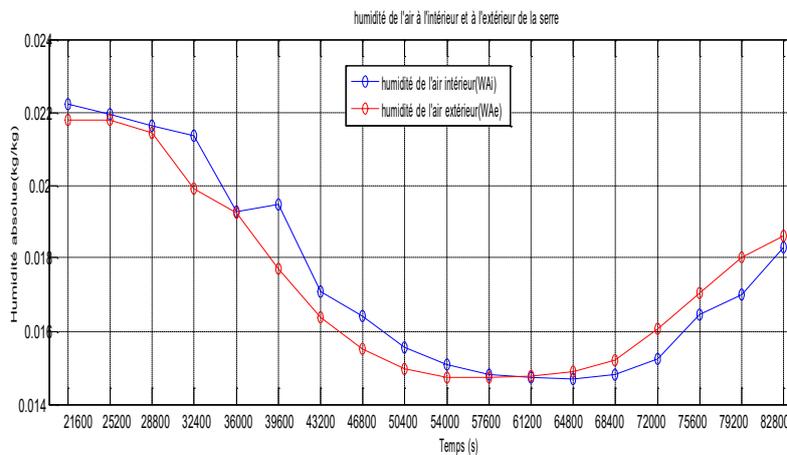


Fig. 4 Variations des humidités de l'air intérieur et extérieur pour la journée type 3

Une analyse comparative entre la température du sel présente dans une serre tunnel de séchage et celle à l'intérieur de la serre met en évidence des distinctions notables. La température du sel affiche des variations spécifiques, avec une augmentation graduelle dès le début de la journée, atteignant un sommet en milieu d'après-midi, puis amorçant une décroissance progressive en fin de journée. D'autre part, la température à l'intérieur de la serre suit également une tendance similaire, mais avec des amplitudes différentes. Ces observations suggèrent une corrélation entre les deux, tout en mettant en lumière l'impact de facteurs environnementaux spécifiques propres à chaque zone de mesure.

A partir des expériences menées sur le sel en couche mince dans un dessiccateur, la corrélation suivante de la teneur en eau en fonction du temps (et des teneurs en eau initiale W_0 et à l'équilibre W_{eq}) est élaborée :

$$W(t) = \exp(-Kt) \times (W_0 - W_{eq}) + W_{eq} \quad (5) \quad (5)$$

où $K = 4.10^{-5} \times Tai - 0.001$

La figure 5 représente l'évolution de la teneur en eau du sel au cours du temps pour la journée susmentionnée.

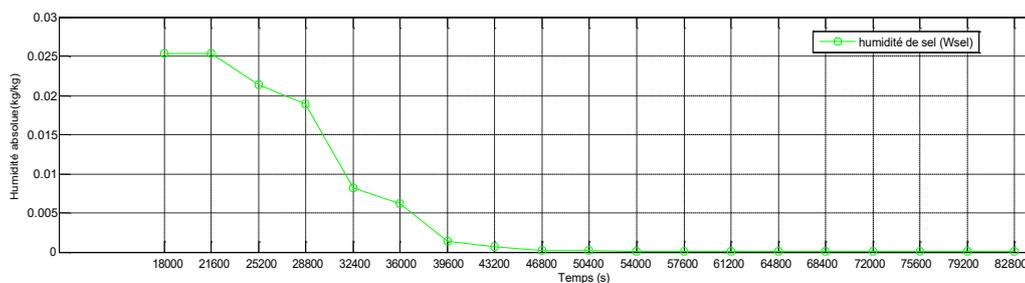


Fig. 5 Variation de la teneur en eau du sel pour la journée type 3

En explorant tous les résultats pour les différentes journées types, on remarque que le séchage du sel par la serre à convection naturelle n'est atteint que pour la saison d'été.

V. CONCLUSIONS

Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- La vitesse de séchage et le taux d'humidité sont directement influencés par la température de l'air de séchage. Une élévation de la température accélère la vitesse de séchage et réduit la durée nécessaire pour le séchage.
- L'humidité du sel diminue significativement à des températures élevées (en été).
- Par conséquent, durant la saison hivernale, il est essentiel d'avoir un système d'appoint énergétique tel que la ventilation par convection forcée ou l'utilisation de panneaux photovoltaïques.

REFERENCES

- [1] N. Kannan, D. Vakeesan, Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 62: 1092-1105, 2016.
- [2] World Map of Global Horizontal Irradiation, SolarGIS – 2013.
- [3] Janjai S, Intawee P, Kaewkiew J, et al. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renew Energy*, 2011;36:1053 –62.

Intérêt de l'intégration de la dimension spatiale
dans la modélisation de taux de chômage
en Tunisie

Meriem Bel Haj Mohamed

Meriem.hjmed@yahoo.fr

Résumé— L'analyse de données spatiales permet d'appréhender des phénomènes en général ignorés de l'analyse économique standard. Les modèles spatiaux ont néanmoins une application plus large, l'approche étant compatible avec tout problème où des relations de "voisinage" interviennent. En particulier, dans le cadre du marché du travail, l'approche spatiale peut révéler l'importance de la concentration spatiale du chômage, la propagation dans l'espace des chocs d'emplois et les raisons possible de la persistance d'un niveau de chômage élevé dans certains secteurs géographiques. L'objectif de cette étude n'est pas de détailler les résultats d'une étude économique mais d'illustrer les techniques mises en œuvre: la définition d'une matrice de voisinage qui décrit les relations de proximité entre les territoires, les tests de corrélation spatiale et de spécification, l'estimation, et l'interprétation de modèles d'économétrie spatiale. En effet, la présente étude consiste à détailler la mise en pratique d'une étude d'économétrie spatiale de la modélisation du taux de chômage pour 24 gouvernorats de la Tunisie à l'aide caractéristiques de la population, à la structure économique et du marché du travail.

Mots clés— Analyse spatiale, Taux de chômage, Tunisie

I. INTRODUCTION

L'espace peut constituer une variable qui s'ajoute aux autres variables classiques (économiques, sociales, politiques etc...) pour expliquer l'impact de l'activité d'une zone (région, gouvernorat, ville, pays et ...) sur une autre. De cela, les théories économiques spatiales sont fondées essentiellement pour apprécier les formes et la manière de répartition des données économiques. En effet, ces théories permettent de comprendre le choix de la localisation des activités de production ainsi que le processus d'agglomération économique. Donc, l'espace constitue pour les géo-économistes un facteur essentiel et explicatif des interactions économiques interrégionales. Une région plus attractive (ayant des avantages régionaux en termes de ressources, conditions climatiques, infrastructures, etc...) dense en activités dynamiques peut rendre sa voisine dynamique, performante et plus contributive comme elle peut la rendre pauvre et moins attractive. Ainsi, l'évolution économique d'une région quelconque ne peut pas être interprétée qu'en termes des facteurs internes et propres à cette région, puisque la répartition géographique du phénomène d'emploi n'est pas aléatoire. Par exemple, une région agricole peut stimuler l'emploi de sa voisine en tant que région industrielle.

Pourquoi cet intérêt pour les données spatiales? La réponse est simple: elles révèlent d'intéressantes régularités. Notamment, en anticipant un peu sur la description des données, il apparaît que le taux de chômage des régions a une très forte variabilité, et que cette variabilité définit des gradients de taux de chômage importants, avec la coexistence de zones à chômage élevé et des zones à chômage faible. Cette dispersion, plus forte dans les régions défavorisées, a sustenté le thème de la composante géographique de la fracture sociale, c'est à dire l'existence de régions ou de gouvernorats en difficulté économiques.

Dans ce travail, nous détaillons la mise en pratique d'une étude d'économétrie spatiale, en modélisant le taux de chômage localisé, c'est-à-dire par zone d'emploi, à l'aide des caractéristiques structurelles relatives aux caractéristiques de la population active (proportion des personnes peu diplômées et des personnes de moins de 30 ans dans la population active), de la structure économique (proportion des emplois dans le secteur industriel et de l'emploi public) et du marché du travail (taux d'activité). L'objectif de cette étude n'est pas de détailler les résultats d'une étude économique mais d'illustrer les techniques mises en œuvre: la définition d'une matrice de voisinage qui

décrit les relations de proximité entre territoires, les tests de corrélation spatiale et de spécification, l'estimation, et l'interprétation de modèles d'économétrie spatiale. Ainsi, les variables explicatives prises en compte peuvent intégrer l'effet de ces variables omises et non leur seul effet propre. Enfin, le décalage temporel entre les variables explicatives et le taux de chômage ne supprime pas complètement le caractère simultané des phénomènes (par exemple entre le taux d'activité et le taux de chômage), structurellement stables à court terme.

II. LA MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR L'ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE

L'application de l'analyse spatiale nécessite au préalable la compréhension d'un certain nombre de concepts tels que les données spatiales (désignent des informations liées à des objets ou éléments présents dans un espace géographique), les effets spatiaux (l'autocorrélation spatiale et l'hétérogénéité spatiale), les matrices de voisinage, l'indice et le test de Moran, le diagramme de Moran et les modèles économétriques spatiales.

A. L'autocorrélation spatiale

Les approches de l'économétrie spatiale visent à traiter les deux grandes particularités des données spatiales: l'autocorrélation spatiale qui se réfère à l'absence d'indépendance entre observations géographiques et l'hétérogénéité spatiale qui est liée à la différenciation dans l'espace des variables et des comportements. L'autocorrélation spatiale peut être définie comme la ressemblance des valeurs prises par une variable, exprimée en fonction de leur localisation géographique. Alors, elle fournit une information supplémentaire par rapport aux statistiques traditionnelles, invariables par rapport à la configuration spatiale des données. Anselin (2004) a définie l'autocorrélation spatiale comme la coïncidence de valeurs similaires de localisation. Selon Ertur (2012), l'autocorrélation spatiale est différente de l'autocorrélation temporelle dans le sens qu'elle est multidimensionnelle. Par conséquent, les techniques valables pour les séries temporelles ne sont pas directement transposables au cas spatial. (Le Gallo, 2002), a montré qu'il existe deux types d'autocorrélation: l'autocorrélation positive et l'autocorrélation négative. L'autocorrélation négative intervient lorsque les valeurs sur les quelles porte la concentration sont dissimilaires. Quant à l'autocorrélation positive apparaît lorsque des valeurs similaires tendent à se concentrer dans l'espace. Elle est présente dans les processus de diffusion et contagion bien qu'il faille signaler que la diffusion tend à produire une autocorrélation spatiale positive mais que la réciproque n'est pas nécessairement vraie.

B. L'hétérogénéité spatiale

L'hétérogénéité spatiale est liée à la différenciation des comportements dans l'espace. Il s'agit de l'instabilité structurelle due à une instabilité spatiale des coefficients de la régression et à la non-linéarité des formes fonctionnelles ou de l'hétéroscédasticité provenant de variables omises ou de toute autre forme de mauvaise spécification (Ertur, 2012). Ainsi, ce phénomène se retrouve à plusieurs échelles: les comportements et les phénomènes économiques ne sont pas les mêmes dans le centre d'une ville et dans sa périphérie ou dans une région urbaine et dans une région rurale (Le Gallo, 2004).

C. Les matrices de voisinage

Pour mesurer la corrélation spatiale entre les zones géographiques ou les agents, tout commence par la définition des relations de voisinage entre les zones géographiques ou les agents. Ces relations peuvent être estimées par une matrice de voisinage qui est la version spatiale de l'opérateur retard en séries temporelles. Cette matrice de voisinage est également appelée matrice de poids notée W telle que chacun de ses éléments w_{ij} indique l'intensité de la proximité de la zone i par rapport à la zone j . Cette matrice de voisinage est une matrice dont la valeur des éléments non diagonaux est le fruit de l'expertise. Par contre, les éléments diagonaux sont nuls (on ne peut pas être son propre voisin).

D. L'indice et le test de Moran

Avant de spécifier un modèle d'économétrie spatiale, il convient de vérifier qu'il y a bien un phénomène spatial à prendre en compte. Le principal indices d'autocorrélation spatiale est celui de Moran. Cet indice permet de mesurer l'association globale, est défini comme suit :

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{W \sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

Où Y_i représente la variable observée au gouvernorat i , \bar{y} est la moyenne des valeurs de l'ensemble des N observations, W est la matrice des pondérations spatiale avec,

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}$$

L'indice I peut s'interpréter comme un coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1 et dépendent de la matrice de poids utilisée. La borne supérieure est notamment égale à 1 si la matrice est standardisée en ligne, la borne inférieure reste différente en toute généralité de -1. Les valeurs négatives et fortes de I indiquent une autocorrélation spatiale négative, alors que les valeurs positives et fortes de I indiquent une autocorrélation spatiale positive et les valeurs proches de 0 une absence d'autocorrélation. L'indice de Moran est un indice qui définit le rapport d'une sorte de covariance entre unités contiguës à la valeur du champ. Par ailleurs, I est invariant à un changement d'unité de mesure et à une symétrisation de la matrice W . Le test de Moran est un test d'absence d'autocorrélation spatiale avec les deux hypothèses suivantes : H_0 : absence d'autocorrélation spatiale, contre l'alternatif, H_1 : présence d'autocorrélation spatiale.

E. Les modèles économétriques

Dans la littérature plusieurs modèles dans la matière qui sont développé dans des différentes études. Dans ce qui suit Nous présentons les principaux modèles utilisés dans les différents travaux qui se concentrent sur l'économétrie spatiale après avoir fait une description des tests d'autocorrélation spatiale.

La spécification économétrique considérée dans cette recherche prend comme point de départ le modèle de régression linéaire des moindres carrés ordinaires (MCO): $Y = X\beta + \varepsilon$.

Y représente la variable dépendante (taux d'hospitalisation, taux de décès, taux de sur mortalité). X représente les variables explicatives utilisées, β est le vecteur de paramètres à estimer et ε est le terme d'erreur. Lorsqu'un phénomène d'autocorrélation spatiale est ignoré dans la spécification du modèle, mais présent dans le processus générateur des données, les estimateurs des MCO sont biaisés et non convergents.

Étant donné une matrice de voisinage normalisée W et une variable Z , il vient automatiquement que WZ présente une autocorrélation spatiale avec Z .

Selon Thomas Agnan (2012), la famille des modèles économétriques spatiaux consiste à introduire une telle variable dans le modèle de régression linéaire non spatial MCO à divers endroits:

- Introduire une "variable endogène décalée" WY dans le modèle (1) et prendre en compte l'autocorrélation spatiale relative à la variable Y conduit au modèle spatial autorégressif (SAR).
- Introduire WX dans le modèle SAR conduit au modèle Durbin spatial (SDM)
- Utiliser le modèle SAR pour le terme d'erreur conduit au modèle d'erreur spatiale SEM. Ce modèle consiste à spécifier un processus de dépendance spatiale des erreurs dans un modèle de régression.

III. MODÉLISATION SPATIALE DU TAUX DE CHÔMAGE EN TUNISIE

A. Position du problème

La majorité des pays présentent des disparités spatiales importantes et appuyées en matière d'accès à l'emploi. La dispersion des taux de chômage offre une porte d'entrée dans notre travail, qui va explorer le poids des processus géographiques (essentiellement internes à un pays) dans les inégalités interindividuelles, en couvrant l'ensemble des dimensions d'accès à l'emploi. L'ampleur des mesures de chômage, de salaires ou de revenus au sein des pays est aussi importante qu'entre les pays de même niveau de croissance, que l'on conduise l'analyse au niveau des régions ou plus localement. Les différences régionales sont importantes dans presque tous les pays développés. Alors, les taux de chômage diffèrent fortement entre les régions. Par exemple, en France de fortes disparités entre les taux de chômage des différentes zones d'emploi, avec un large spectre allant en métropole, des Herbiers en Vendée (4.3%) à Agde-Pézenas dans l'Hérault (15.7%) de taux de chômage en 2019, et dépassant 17 % sur l'ensemble des zones des départements d'outre-mer, Guadeloupe et Réunion. De même, au cours des trois dernières décennies, l'Italie du Nord a connu, un taux de chômage trois à quatre fois inférieur à celui de l'Italie du Sud (Kline, Moretti 2013). Des résultats similaires sont constatés pour les États-Unis. Le taux de chômage à Flint (Michigan) était près de six fois plus élevé que celui de la ville d'Iowa (Iowa). De même, pour le cas des pays en développés, par exemple en Tunisie, une des caractéristiques du marché du travail réside dans l'ampleur du chômage au niveau régional. En effet, la répartition régionale du chômage montre que les régions du Nord-Ouest, Centre-Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est exhibent des taux de chômage supérieurs au taux de chômage national. Les taux de chômage sont proportionnellement élevés en Tunisie et se situent selon les recensements de la population et les enquêtes sur l'emploi, aux voisinages de 14.9 % en 2002, de 12.36 % en 2007 et de 15.3% en 2019.

Les disparités régionales en termes de chômage résultent non seulement de facteurs internes en relations avec les marchés locaux du travail, mais aussi, de certains facteurs externes. En effet, les spécificités de chaque région en matière de localisation géographique, d'infrastructure de base et d'investissement expliquent en grande partie les disparités régionales du taux de chômage. Ces disparités territoriales du fait même de leur permanence ne trouvent pas leur origine de causalité dans des déséquilibres conjoncturels de l'offre et de la demande sur les marchés du travail mais sont en partie de nature structurelle. Donc, les conditions de fonctionnement du marché du travail, peuvent contribuer à déterminer le taux de chômage. Ainsi, les disparités spatiales du taux de chômage peuvent être un indicateur de l'existence de différences d'efficacité du fonctionnement des marchés locaux du travail.

En effet, une des caractéristiques du marché du travail Tunisien réside dans l'ampleur du chômage au niveau régional. En d'autre terme, les taux de chômage diffèrent fortement entre les régions. La répartition régionale du chômage montre que les régions du Nord-Ouest, Centre-Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est exhibent des taux de chômage supérieurs au taux de chômage national. Il s'agit de 18 gouvernorats qui connaissent des taux de chômage supérieurs à 15.3% en 2019. Les disparités régionales en termes de chômage résultent non seulement de facteurs internes en relations avec les marchés locaux du travail, mais aussi, de certains facteurs externes. En effet, les spécificités de chaque région en matière de localisation géographique, d'infrastructure de base et d'investissement expliquent en grande partie les disparités régionales du taux de chômage (source INS).

En effet, la présente étude consiste à détailler la mise en pratique d'une étude d'économétrie spatiale de la modélisation du taux de chômage de la Tunisie à l'aide caractéristiques de la population, à la structure économique et du marché du travail.

Notre base de données est composée de six variables : « taux de chômage, taux d'activité, le pourcentage d'actifs peu diplômés, le pourcentage des Jeunes Actifs entre 15 et 30 ans, le pourcentage emploi industriel et le pourcentage emploi public pour 24 gouvernorats de la Tunisie de l'année 2019. Les données utilisées dans ce travail proviennent de l'Institut National de la Statistique (INS), l'Institut d'Economie Quantitative (IEQ), L'Agence Nationale pour l'Emploi et le Travail Indépendant (ANETI), les annuaires statistiques de la Tunisie. La figure 1 représente les taux de chômage par zone d'emploi de la Tunisie en 2019. On constate des zones polarisées, ce qui pourrait être le signe d'une hétérogénéité spatiale.

de l'emploi à la conjoncture et fermeture d'usines). Au contraire, les emplois publics étant plus stables, le pourcentage d'emploi public devrait être négativement corrélé avec le taux de chômage. La p-value quasiment nulle du test de Moran indique que l'hypothèse nulle d'absence d'autocorrélation spatiale doit être rejetée. Le résultat est robuste au choix de la matrice de voisinage.

TABLE II
 RÉSULTATS DES ESTIMATIONS DU TAUX DE CHÔMAGE

	MCO	SEM	SAR	SDM
taux d'activité	-0,473*** (0,068)	-0,385*** (0,032)	-0,561*** (0,021)	-0,851*** (0,023)
%Actifs Peu Diplômés	0,098*** (0,029)	0,231*** (0,011)	0,098*** (0,012)	0,356*** (0,001)
%Jeunes Actifs 15-30 ans	0,298*** (0,037)	0,096*** (0,032)	0,057** (0,022)	0,231*** (0,038)
%Emploi Industriel	-0,089*** (0,013)	-0,024 (0,023)	-0,031*** (0,009)	-0,514 (0,008)
%Emploi Public	-0,057*** (0,027)	-0,032*** (0,009)	-0,052*** (0,007)	-0,54** (0,01)
ρ			0,641*** (0,033)	0,594*** (0,052)
λ		0,568*** 0,041		
Observation	250	250	250	250
AIC	1051	994	978	957
R2 Ajusté	0,564			
Test Moran	0			
Test Facteur Commun				0,005
Test LM residual auto.			0,004	0,612

Les résultats d'estimation (Table II) montrent que la variable du taux d'activité affiche un signe négatif et est statistiquement significative au seuil de 0.01. Cette influence montre que le taux d'activité joue un rôle important dans la réduction du taux de chômage, c'est-à-dire une hausse de cette variable entraîne une baisse du chômage. En plus, les effets de l'emploi Industriel et l'emploi Public sont négatifs qui signifie qu'une hausse du taux de l'emploi Industriel ou du taux de l'emploi Public entraîne une diminution du taux de chômage.

Les résultats des estimations et les critères statistiques résumés dans le Table 2 de la modélisation spatiale du taux de chômage ont montré le vestibule de l'autocorrélation spatiale et conduiraient à retenir un modèle SDM (colonne 4), qui signifie que les effets d'interaction entre les régions en ce qui concerne l'emploi sont liés à des caractéristiques inobservées. Ce modèle SDM présente l'AIC le plus faible (957). L'ensemble des tests d'autocorrélation spatiale menés à partir des résidus du modèle MCO sont rejetés (colonne 1). De même, l'hypothèse de facteur commun du modèle SDM est rejetée (p-value de 0.005). Plusieurs effets d'interaction exogène sont significativement non nuls (le pourcentage d'actifs non diplômés au seuil de 1 %).

Le choix d'un modèle SAR (colonne 3) serait ici déconseillé. Un test montre qu'une autocorrélation spatiale résiduelle reste présente (p-value (test LM residual auto) de 0.004). Les conséquences sont importantes sur

l'interprétation des résultats. La variable "pourcentage d'emploi industriel" reste significatif à 1 %, alors que le signe négatif peut paraître contre-intuitif.

En ce qui concerne, les effets directs et indirects du taux d'activité, les pourcentages actifs diplômés, les pourcentages des jeunes actifs de 15-30 ans, les pourcentages d'emploi industriel et les pourcentages d'emploi public sur le taux de chômage (Table3), les résultats montrent au niveau de notre modèle optimal (SDM), que les effets directs du taux d'activité semblent négatif, par contre pour les autres variables ont un effet positif. En revanche, les effets indirects des pourcentages de l'emploi industriel est positif, mais pour les autres variables ont un effet indirect négatif sur le taux de chômage. Concernant l'effet total, le taux d'activité et les pourcentages d'emploi industriel impactent négativement le taux de chômage.

TABLE III
 EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS DU MODÈLE SDM

variable	Direct	Indirect	Total
Taux d'activité	-0.854	0.621	-0.233
% Actifs Diplômés	0.254	0.031	0.285
% jeunes Actifs 15-30 ans	0.564	0.267	0.831
%Emploi Industriel	0.092	-0.313	-0.221
% Emploi Public	0.098	0.325	0.423

IV. CONCLUSIONS

Les modèles d'économétrie spatiale déterminent un cadre homogène (et paramétrique) pour modéliser tout type d'interférences entre les agents économiques: zones géographiques, produits, entreprises ou individus. En effet, ces modèles reposent a priori sur une définition de relations de voisinage. Deux principales critiques sont adressées à ces modèles d'économétrie. La première critique est liée à leur manque de robustesse au choix de la matrice de voisinage. Alors que, la deuxième critique est liée à leur manque d'identification du processus générateur des données. Néanmoins ces critiques nous semblent exagérées. Comme pour tout travail empirique, des choix toujours discutables de spécification sont nécessaires. La robustesse de ces modèles est de mettre en avant si un problème "spatial" se pose et sous quelle forme. Au contraire, estimer un modèle d'économétrie spatiale dès qu'on dispose de données "spatiales" n'est pas toujours nécessaire. Le raffinement de la méthodologique doit être mis en regard de la question économique et de la complexité de ces nouveaux modèles, en particulier en termes d'interprétation.

Le choix de la modélisation de la corrélation ou de l'hétérogénéité spatiale, ou les deux conjointement, est sensible. Prendre en compte, dans notre étude, la corrélation spatiale pour modéliser le taux de chômage par zone d'emploi apparaît nécessaire d'après les tests statistiques. Ceci corrige quelques interprétations inexactes qui sont dégagés du modèle linéaire classique. Donc, il est nécessaire, de privilégier un modèle spatial de Durbin (SDM), certainement aux termes d'erreurs spatialement autocorrélées (le modèle SEM). Néanmoins, l'analyse de l'hétérogénéité spatiale à partir de régressions géographiques pondérées souligne pareillement que la spécification devrait être améliorée. En effet, quelque résultats étonnants pouvant résulter d'un biais de variables manquées ou négligées et d'une mauvaise prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des marchés du travail. Donc, cette ambiguïté sur le choix du modèle doit conduire à rester circonspect quant à l'interprétation des effets directs et indirects du modèle spatial de Durbin SDM. De plus, ce n'est pas parce que le modèle est plus compliqué qu'il résolu le problème de l'endogénéité des variables explicatives ou du sens de la causalité entre les variables du modèle. En effet, une interprétation causale reste cependant impossible.

REFERENCES

- [1] Anselin, L., Bongiovanni, R. And Lowenberg DeBoer, J (2004) *A Spatial Econometric Approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production*. *American Journal of Agricultural Economics*, 86(3), 675 - 87.
- [2] Blanc, Michel, et François Hild. (2008) « Analyse des Marchés Locaux du Travail : du Chômage à l'Emploi. » *Économie et Statistique*, 415-416, 45-60.
- [3] Ertur, 2012. "Editorial," *Spatial Economic Analysis*, Taylor & Francis Journals, vol. 7(1), pages 1-8, March.
- [4] Floch, J.M. (2012) *Détection des disparités socio-économiques : l'apport de la statistique spatiale*, Document de travail INSEE H2012/04.
- [5] Floch, J.M., et Le Saout R. (2016) *Econométrie spatiale : une introduction pratique*, Document de travail INSEE à venir.
- [6] Henda Oukaili et Wajdi Kthiri (2021), *Tableau de bord social, Tendances régionales de l'inclusion sociale*, Direction Centrale des Etudes sociales.
- [7]
- [8] Le Gallo, J. (2002) *Économétrie spatiale : l'autocorrélation spatiale dans les modèles de régression linéaire*, *Economie & Prévision*, 155(4), 139-157.
- [9] LeSage, J., et Pace R. K. (2009) *Introduction to Spatial Econometrics*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [10] LE GALLO J. 2002, « Économétrie spatiale: l'autocorrélation spatiale dans les modèles de régression linéaire », *Économie et Prévision*, n° 155, pp. 139-157.
- [11] LeSage, J.-P. 1999. « *Spatial Econometrics* », (<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/LeSage/spatial/wbook.pdf>).
- [12] Le Gallo, J. (2002) *Econométrie spatiale : l'autocorrélation spatiale dans les modèles de régression linéaire*, *Economie et Prévision*, 4 (155), 139-158.
- [13]
- [14] Le Gallo J, (2000), *Econométrie spatiale*, Université de Bourgogne
- [15] Le Sage J.P, R. K. Pace (2009), *Introduction to spatial econometrics*, CRC Press.
- [16] Thomas-Agnan C, (2012), *Analyse statistique des données spatiales*, Eustat.
- [17] Pumain, Saint Julien (2006), « *L'analyse Spatiale : Tome 1 Localisations dans l'espace* ».
- [18] <https://www.ins.tn/statistiques/153>.

Convection Naturelle au sein d'une Cavité Remplie de Deux Fluides Immiscibles

Labsi Nabila¹, Benkahla Youb Khaled², Chebri Sofiane³, Boudiaf Ahlem⁴

*Laboratoire des Phénomènes de Transfert (équipe RSNE),
Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés,
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
BP. 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, ALGERIE*

¹nabilalabsi@yahoo.fr

³youbenkahla@yahoo.fr

³chebri.sofian@gmail.com

⁴ahlem.boudiaf@gmail.com

Abstract— La présente étude traite de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire remplie de deux liquides immiscibles : pétrole brut algérien / eau. La cavité est différentiellement chauffée par ses deux parois verticales. Les équations générales de conservation pour les deux fluides sont résolues par le biais de la méthode des volumes finis. Les résultats montrent que l'augmentation de l'intensité des forces de poussées à travers le nombre de Rayleigh, intensifie l'écoulement et favorise les échanges thermiques dans l'enceinte.

Mots clés— Convection naturelle, liquides immiscibles, méthode des volumes finis, cavité, nombre de Rayleigh.

I. INTRODUCTION

Le problème de la convection dans une enceinte remplie de deux fluides immiscibles ou de phases différentes, intervenant dans un grand nombre d'applications mécanique, chimique et technique, telles que la technique de croissance cristalline encapsulées dans un liquide, la contamination d'un pétrolier rempli de pétrole par de l'eau ainsi que la solidification des matériaux électroniques, a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs [1-3] et a reçu une grande considération au cours de ces dernières années. Récemment, Li et *al.* [4] ont considéré la convection mixte de deux couches de fluides immiscibles dans un canal vertical ; une couche de fluide pur et une couche de nanofluide. Ils ont trouvé, entre autres, que l'ajout de plus de nanoparticules dans l'une des couches peut améliorer le transfert thermique des deux couches. Ouahouah et *al.* [5] ont étudié la convection naturelle dans une cavité carrée dont la paroi inférieure est non-uniformément chauffée. Elle est remplie de deux fluides immiscibles : un nanofluide non newtonien (Cu-eau) formant la phase inférieure et de l'air occupant la phase supérieure. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh, de la fraction volumique en nanoparticules, de la hauteur de la phase inférieure ainsi que le rapport de forme de la cavité intensifient l'écoulement et le transfert thermique. Les auteurs ont proposé des corrélations pour prédire le nombre de Nusselt moyen en fonction des paramètres étudiés.

La présente étude représente une contribution dans cet axe de recherche. Elle porte sur la convection naturelle au sein d'une cavité rectangulaire remplie de deux liquides immiscibles : pétrole brut - eau. L'accent est porté sur l'influence des forces de poussée sur le comportement hydrodynamique et thermique de l'écoulement au sein de l'enceinte.

II. FORMULATION MATHÉMATIQUE ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Considérons la convection naturelle laminaire et stationnaire au sein d'une cavité rectangulaire de hauteur H et de largeur h , différentiellement chauffée et remplie de deux liquides immiscibles et incompressibles : l'eau qui occupe la partie inférieure (couche inférieure $0 \leq Y < 0,5$) et le pétrole brut algérien se trouvant au-dessus (couche supérieure $0,5 < Y \leq 1$).

La paroi verticale droite de la cavité est portée à une température T_c tandis que celle de gauche est à une température T_f , inférieure à T_c afin de créer un gradient thermique. Les parois horizontales sont quant à elles adiabatiques. L'écoulement est considéré bidimensionnel plan (Figure 1).

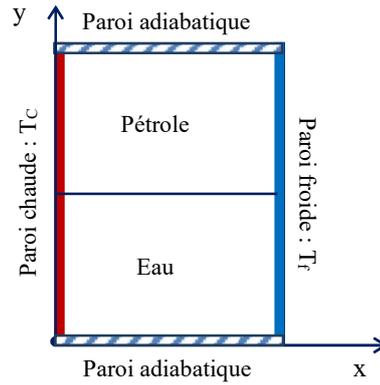


Fig. 1 Schématisation du problème physique considéré

Les équations générales de conservation simplifiées sont données comme suite et ce, pour les deux fluides :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_0 \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho_0 \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \rho_0 \frac{k_p}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

x et y sont les coordonnées horizontale et verticale ; u et v sont les composantes horizontale et verticale de la vitesse ; p* étant la pression motrice ; T représente la température.

Afin de boucler ce système d'équations, des conditions aux limites et à l'interface sont adoptées. Il s'agit de :

$$x = 0 \quad 0 < y < H \quad u = 0 \quad v = 0 \quad T = T_c \quad \text{CL.01}$$

$$x = L \quad 0 < y < H \quad u = 0 \quad v = 0 \quad T = T_f \quad \text{CL.02}$$

$$0 < x < L \quad y = 0 \quad u = 0 \quad v = 0 \quad \left. \frac{dT}{dy} \right|_{x,y=0} = 0 \quad \text{CL.03}$$

$$0 < x < L \quad y = H \quad u = 0 \quad v = 0 \quad \left. \frac{dT}{dy} \right|_{x,y=H} = 0 \quad \text{CL.04}$$

$$0 < x < L \quad y = y_i \quad \mu_1 \left. \frac{\partial \mu_1}{\partial y} \right|_{x,y=y_i} = \mu_2 \left. \frac{\partial \mu_2}{\partial y} \right|_{x,y=y_i} \quad u_1 = u_2 \quad \text{CL.05}$$

$$0 < x < L \quad y = y_i \quad k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{x,y=y_i} = k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{x,y=y_i} \quad T_1 = T_2 \quad \text{CL.06}$$

Afin d'analyser l'effet des forces de poussée, à travers le nombre de Rayleigh Ra , sur l'écoulement et le transfert thermique au sein de la cavité, les équations générales de conservation (équation de continuité, les équations de la conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie) sont résolues numériquement, par le biais de la méthode Ligne par ligne-TDMA et ce, en utilisant la méthode des volumes finis pour la discrétisation des équations ainsi que l'algorithme SIMPLER [6].

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Le code de calcul maison a permis d'obtenir, entre autres, les résultats illustrés sur la figure ci-dessous où la zone $0 \leq Y < 0,50$ est occupée par l'eau et la zone supérieure $0,50 < Y \leq 1$ par le pétrole brut algérien.

Les lignes de courant de la Figure 2 montrent une structure monocellulaire principale horaire dans chaque couche, séparée par une cellule secondaire appartenant à la couche inférieure et tournante dans le sens antihoraire. Elle est mise en mouvement par les précédentes. Nous remarquons que les cellules principales s'allongent et la cellule secondaire se rétrécit au-fur-et-à-mesure que le nombre de Rayleigh augmente.

Quant aux isothermes, présentées sur la même figure, l'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie l'échange thermique en passant d'un mode conductif pour $Ra = 10^3$ caractérisé par des isothermes presque parallèles, vers un mode convectif lorsque le nombre de Rayleigh augmente.

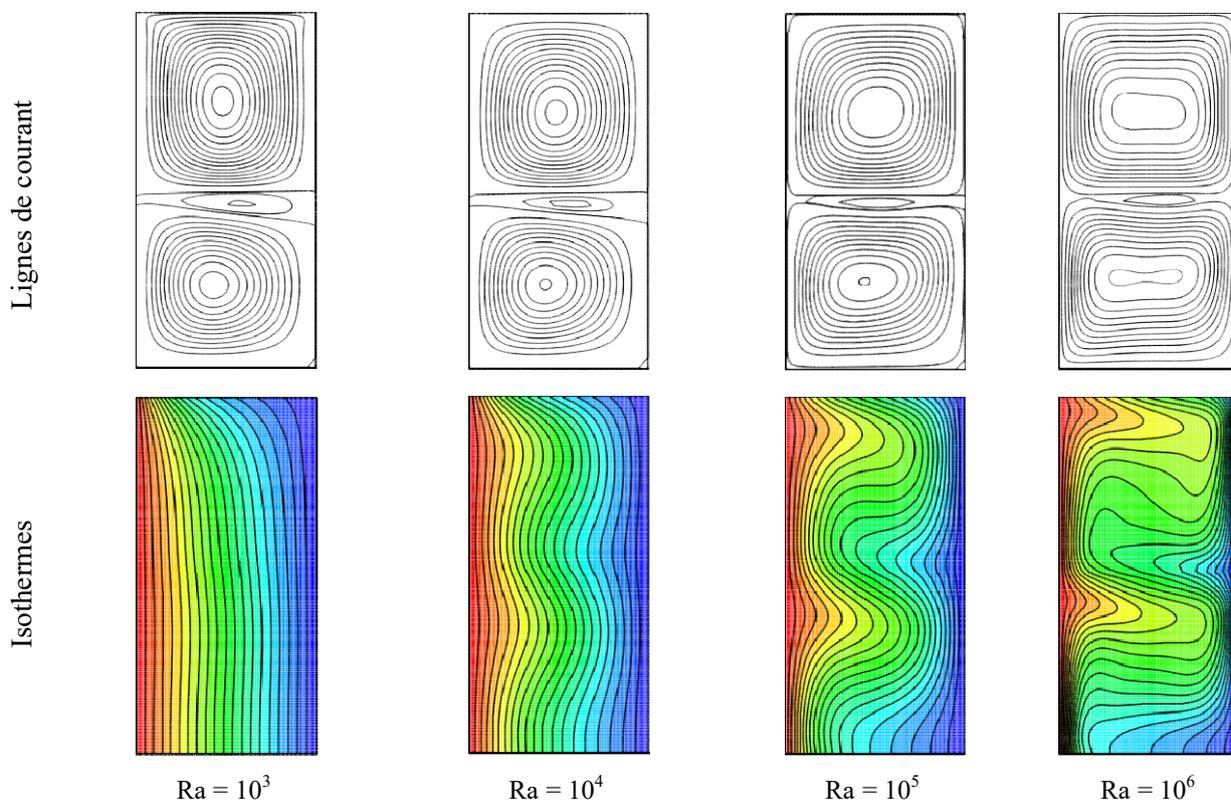


Fig. 2 Structures des lignes de courant et des isothermes pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh. Rapport de forme $A = 2$

La Figure 3 illustre l'évolution du nombre de Nusselt local au sein de la cavité pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

Dans le *Compartiment inférieur*, l'augmentation de ce dernier favorise l'échange thermique, excepté pour la zone $0,30 \leq Y < 0,45$ où sa variation entre 10^3 et 10^4 n'influe pas sur le nombre de Nusselt. Les courbes passent par un maximum qui est d'autant plus important que le nombre de Rayleigh est grand, puis par un minimum qui correspond à la migration du fluide chaud depuis la paroi gauche chaude vers la paroi droite froide.

Les mêmes interprétations peuvent être reprises pour le *Compartiment supérieur*, avec néanmoins quelques différences notables. En effet, tant que $Y \leq 0,70$, l'augmentation du nombre de Rayleigh favorise les échanges thermiques pariétaux. Tel n'est pas le cas au sommet de la cavité, où les échanges thermiques sont les plus importants pour les plus faibles valeurs de ce nombre.

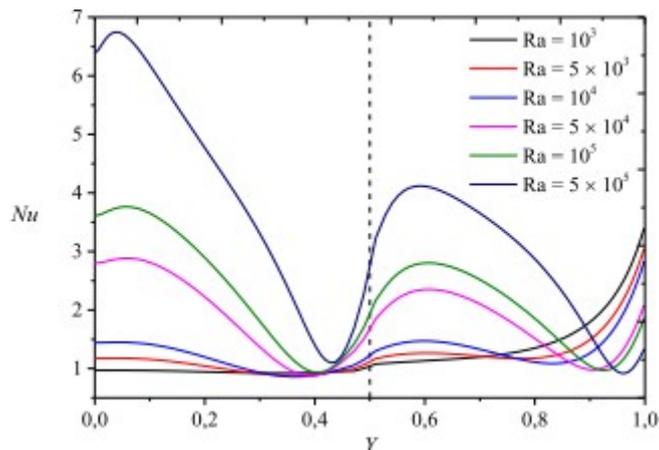


Fig. 3 Evolution du nombre de Nusselt local pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh. Rapport de forme A = 2

IV. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh favorise le transfert thermique, avec une augmentation de l'intensité de l'écoulement. Le taux d'échange thermique est plus important pour $Ra = 5 \times 10^5$. En outre, le transfert thermique est important au niveau des interfaces.

REFERENCES

- [1] D. Villers, and J.K. Platten, "Thermal convection in superposed immiscible liquid layers," *Appl. Sci. Res.*, vol. 45(2), pp. 145-152, 1988).
- [2] Z. Haddad, H.F.Oztop, E. Abu-Nada, and A. Mataoui, "A review on natural convective heat transfer of nanofluids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16(7), pp. 5363-5378, 2012.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.003>
- [3] J.N. Kostert, and K.Y. Nguyen, "Steady natural convection in a double layer of immiscible liquids with density inversion," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 39(3), pp. 467-78, 1996.
- [4] B. Li, Y. Ding, L. Zheng, X. Liu, and X. Zhang, "Mixed convection heat transfer of double immiscible fluids in functional gradient material preparation," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 121, pp. 812-818, 2018.
DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.043](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.043)
- [5] A. Ouahouah, N. Labsi, X. Chesneau, and Y.K Benkahla, "Natural convection within a non-uniformly heated cavity partly filled with a shear-thinning nanofluid and partly with air," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, vol 289, 104490, 2021.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104490>
- [6] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co., New York, NY, 1980.

