

## Article 15. Hydrodynamique de deux cylindres horizontaux tractés en présence d'une surface libre

RAMANAKOTO Toky Nandrasana<sup>1</sup>, RASOLOMANANA Eddy<sup>1</sup>, RAKOTONDRAJAONA Luc<sup>1,2</sup>, ANDRIAMADY Andry<sup>1</sup>,  
RANDRIANANTENAINACyriaque<sup>1</sup>, RANJALAHY Hary<sup>1</sup>, RAJAONA Raphaël Dominique<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Hydrodynamique et Géosciences IST/T – ESPA Ankatso.

<sup>2</sup> Direction de l'Ecole du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo.

<sup>3</sup> Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes, CNRS, Université du Havre.

Correspondant : [luc.rakotondrajaona@gmail.com](mailto:luc.rakotondrajaona@gmail.com)

**Mots-clés** : Surface libre, zone de recirculation, nombre de Reynolds, sillage, portance, traînée, tourbillons.

### Résumé :

L'interférence est responsable de diverses modifications dans les efforts lorsque plus d'un cylindre sont placés dans l'écoulement. L'étude autour de deux cylindres peut alors donner des indications sur la meilleure compréhension de la dynamique des tourbillons et forces appliquées sur un ensemble plus complexe. Un cylindre principal (diamètre  $D=0,04\text{m}$  ; Longueur de la zone de recirculation  $L/D=16$ ) placé derrière un cylindre secondaire (diamètre :  $\delta = 0,002$ ;  $L/\delta = 340$ ) est remorqué et l'ensemble est partiellement ou totalement immergé. Les cylindres sont entraînés dans un mouvement uniformément accéléré puis décéléré de manière à accentuer les effets des tourbillons et rendre plus aisée l'observation des phénomènes d'interférence. Les nombres de Reynolds basés sur la vitesse maximum varient entre 0 et 1400 pour une valeur de l'accélération de  $0,150\text{ms}^{-2}$ . On mesure les forces de traînée et portance sur le cylindre aval équipé d'un capteur de force de type KISTLER. Une caméra CCD embarquée permet de visualiser le sillage. Les effets de surface libre sont étudiés en faisant varier le paramètre de profondeur  $d/D$  où  $d$  est la distance entre le dessus du cylindre principal et la surface libre. Les efforts de portance sont caractérisés pour une configuration non symétrique et la configuration du sillage proche. La configuration symétrique correspond au cas (totalement ou partiellement immergé). Les effets d'interférence sont analysés en fonction de  $B/D$  où  $B$  désigne la distance entre les cylindres.

### Introduction

Les phénomènes d'interférence entre écoulements ont été largement étudiés. L'interférence est responsable de diverses modifications dans les efforts lorsque plus d'un cylindre sont placés dans l'écoulement. L'étude de l'écoulement autour de deux cylindres peut alors donner des indications sur une meilleure compréhension de la dynamique des tourbillons et forces appliquées sur un ensemble plus complexe [1][2][3] (Bearman 1973, Zdravkovich 1988, Rochwell 1998). De plus l'interaction entre un cylindre et une surface libre concerne beaucoup d'application dans l'ingénierie marine comme le décrivent Malavasi 2007, Oshkai et al. 1999, Price 1976 [4][5][6]. Ce travail présente une étude expérimentale de l'interférence entre deux cylindres rigides tractés sous la surface libre (SL) ou coupant cette dernière. Le cylindre aval est équipé d'un capteur de force de type KISTLER. Les cylindres sont entraînés dans un mouvement uniformément accéléré puis décéléré de manière à accentuer les effets des tourbillons et rendre plus aisée l'observation des phénomènes d'interférence ([8] et [9] Rajaona 2005, 2009). Dans le cas d'un cylindre isolé il est bien connu que pour un écoulement uniforme et sur une plage de nombre de Reynolds allant de 150 à 320000 le lâcher de tourbillons est caractérisé par un nombre de Strouhal défini par  $fD/V$  qui est voisin de 0,2 où  $f$  est la fréquence de lâcher,  $D$  le diamètre et  $V$  la vitesse de l'écoulement. Le lâcher de tourbillon provoque une fluctuation des forces de pression et une oscillation des forces de portances à la fréquence  $f$  [7]. Cependant lorsque la structure est proche de la surface libre la fréquence des oscillations augmente de telle sorte que le nombre de Strouhal peut atteindre 0,3 ou 0,4 comme cela est montré Rajaona 2008 [9]. Cela est la conséquence de l'interaction avec la surface libre, le transfert de vorticités du sillage avec SL. Les vagues d'accompagnement peuvent déferler comme cela a été montré par Duncan 1981 [10] sur un hydrofoil tracté sous la surface libre. Les nombres de Reynolds pour cette étude se situent dans la plage de 0 à 14000. La force de portance dépend très largement de l'immersion du cylindre aval. Notre analyse est centrée sur les effets du petit cylindre. On utilise les images issues de la visualisation et de l'évolution des forces appliquées sur le cylindre au même instant. Le sillage du cylindre amont impacte le cylindre aval et modifie les efforts appliqués. Une caméra CCD embarquée permet d'enregistrer quand cela est possible une séquence vidéo de l'évolution du sillage proche. On fait varier ainsi la profondeur d'immersion  $d/D$  de 5 à 0 pour le cas totalement immergé et  $d/D$  de -1 à 0 pour le cas partiellement immergé. Nous discuterons plus particulièrement des résultats concernant la longueur de la zone de recirculation  $L/D$  et les coefficients de portance sur deux configurations particulières : « non symétriques – complètement immergé » et « symétrique complètement ou partiellement immergé ».

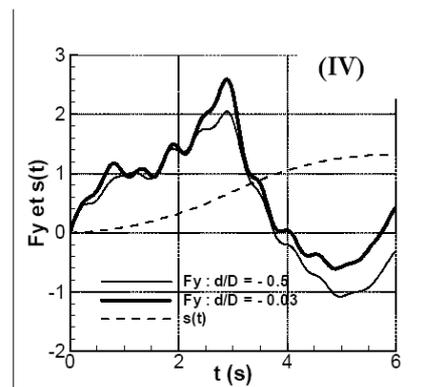
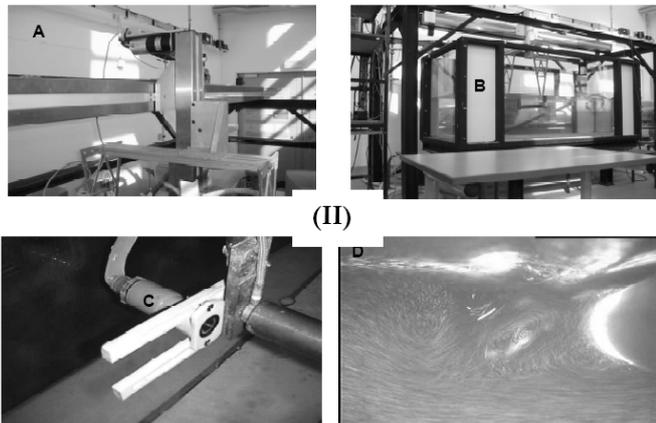
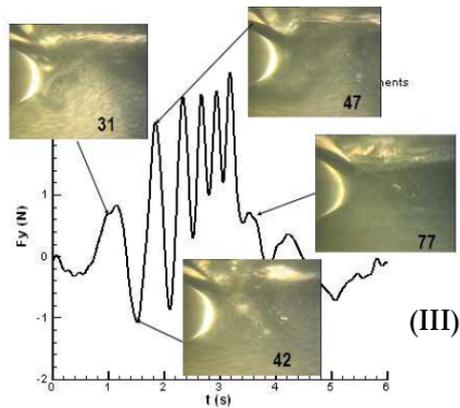
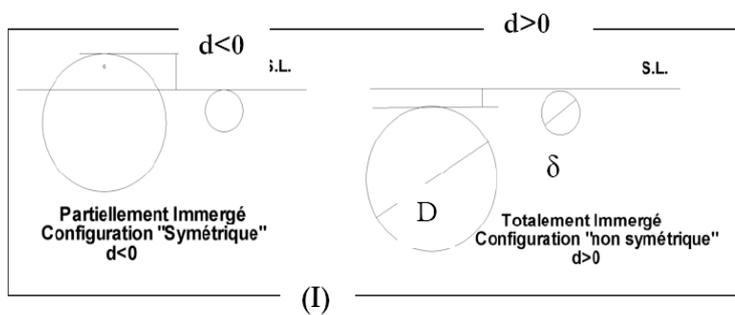


Fig 1 : (I) Configurations étudiées ; (II) Montage expérimental A : Robot ; B : Cuve ; C : Caméra embarquée et (III) Sillages à divers instants correspondants aux numéros des images. La configuration du sillage proche lors d'un maximum ou d'un minimum de  $F_y$  est observable. (IV) Allure de la force de portance en configuration partiellement immergée.

### I. Configuration non symétrique et complètement immergée

Les effets instationnaires sur le cylindre dépendent des mouvements propres du cylindre et de la configuration du sillage proche. Le paramètre  $B$  représentant la distance qui sépare les deux cylindres permet l'étude de l'interférence  $B$  varie de  $1D$  à  $3D$ . Nous définissons les coefficients de portance et de traînée par les formules (1).  $B$  permet d'étudier les effets d'interférence pour différentes profondeurs d'immersion :

$$C_{L_{max}} = F_{y_{max}} / (1/2) \cdot \rho L D \cdot V_0^2 \quad \text{et} \quad C_{d_{max}} = F_{x_{max}} / (1/2) \cdot \rho L D \cdot V_0^2 \quad (1)$$

#### 1.1 Caractérisation de la force de portance

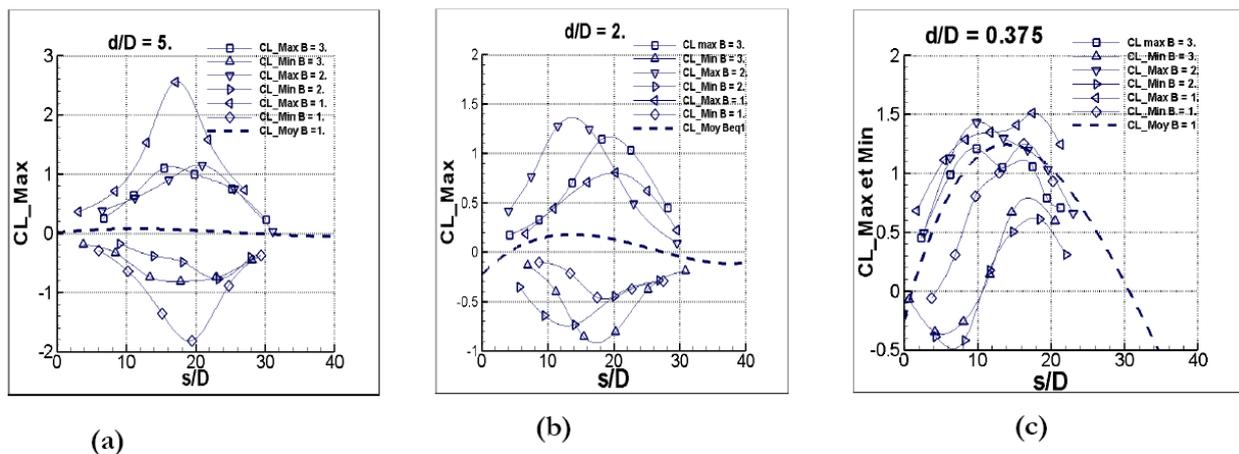


Fig 2 - Maxima et Minima de la force de portance en fonction de  $s/D$  pour trois valeurs de  $d/D$  : 5(a), 2(b), 0.375(c) et pour trois valeurs de  $B/D$  : 3 (symbole carré et triangle haut) ; 2 (triangles bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange).

Une allure typique de la force transverse est représentée en figure 1 (III) lorsque le ou les cylindres sont totalement immergés. On observe des maxima et des minima ainsi qu'une moyenne « mobile », c'est-à-dire évoluant au cours du mouvement. On se propose de caractériser l'amplitude et les « fréquences » de la force de portance. Nous avons

représenté sur la figure 2 les enveloppes des maxima et minima des courbes pour trois profondeurs d'immersion  $d/D=5, 2, 0.375$ . De même la moyenne mobile des efforts de portance est représentée en fonction de  $s/D$  pour ces trois profondeurs par les courbes en pointillés. Pour analyser la « fréquence » des oscillations nous représentons la force de portance en fonction du déplacement relatif, nous mesurons l'écart entre deux rapports  $D/s$  successifs où  $s$  est la position du cylindre à un maximum de la force transversale. Ces écarts sont notés  $CL\_Max$  entre deux maxima successifs, puis  $CL\_Min$  entre deux minima successifs. Il convient de remarquer que dans le cas d'un mouvement uniforme du cylindre les valeurs prise par ces deux écarts sont égales au nombre de Strouhal, comme cela a été montré dans Rajaona 2008. Les résultats sont représentés sur les courbes figure 3 pour trois profondeurs d'immersion et 3 positions du cylindre amont. On constate que ce « Strouhal » est en moyenne voisin de 0.2 pour  $d/D=5$ . Lorsque  $d/D=0.375$  l'interférence se rajoute à l'effet de SL ; ce qui se traduit par une dispersion et une augmentation de ce Strouhal autour de 0,3.

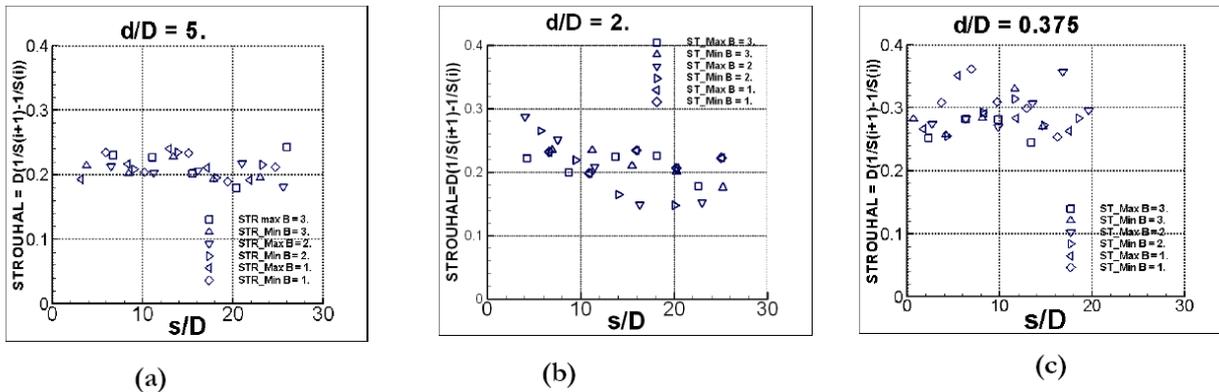


Fig 3 – Nombres de « Strouhal » en fonction de  $s/D$  pour trois valeurs de  $d/D$  : 5(a), 2(b), 0.375 (c) et pour trois valeurs de  $B/D$  : 3 (symbole carré, et triangle haut) ; 2 (triangle bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange). Notons que les valeurs de  $s/D$  des mesures correspondent à une position du cylindre pour un maximum ou un minimum de la force de portance.

### I.2. Effets combinés de proximité et de SL sur la longueur de la zone de recirculation

Nous avons montré que le sillage proche du cylindre principal est constitué par la combinaison des tourbillons issus du petit cylindre et des tourbillons du cylindre principal [9]. C'est pourquoi, les effets d'interférence sont étudiées aussi par l'évolution de la longueur de la zone de recirculation  $L/D$  pour trois valeurs de  $B/D$  (1, 2, 3) et pour cinq profondeurs d'immersion  $d/D=1, 2, 3, 4$  et 5 sur la figure 4.  $L/D$  est ici représentée en fonction du nombre de Reynolds instantanée. On observe que le caractère instationnaire du mouvement a tendance à maintenir la stabilité des deux tourbillons contrarotatifs principaux pour des Reynolds pouvant atteindre 9000. Ce phénomène a été observé aussi dans le cas du cylindre seul.

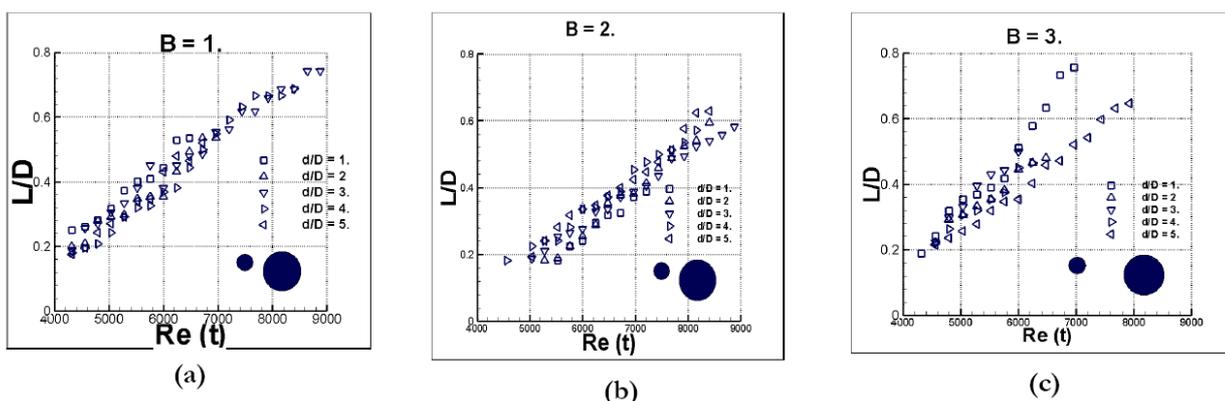


Fig 4 –  $L/D$  en fonction du nombre de Reynolds instantané pour cinq valeurs de  $d/D$  : 3 (symbole carré et triangle haut) ; 2 (triangle bas et triangle droite) ; 1 (triangle gauche et losange)

### 3. configuration symétrique : cas du cylindre et du tandem coupant la surface libre

Un « zoom » sur les effets de surface libre a été réalisé lors de l'expériences à très faible profondeur d'immersion et en faisant émerger le cylindre seul ou le tandem. Il n'a pas été possible d'utiliser la technique de visualisation pour ces configurations en raison des très fortes perturbations de la SL. Nous avons mesuré les efforts de traînée et de portance. Les résultats sont reportés sur la figure 5. L'évolution de la longueur de la zone de recirculation à très faible profondeur est illustrée par la figure 5(l), il apparaît que cette longueur est fortement réduite par la proximité de la surface libre. voir les symboles « A ».

Cas du cylindre seul émergent. Lorsque le cylindre est tracté à une très faible émergence,  $d/D$  de l'ordre de 0.04, un film d'eau passe par-dessus le cylindre. Ce qui tend à rapprocher son fonctionnement hydrodynamique d'un comportement

à très faible profondeur d'immersion. Lorsque cette valeur est dépassée, il apparaît un comportement du type « barrage », ce qui veut dire que pendant la phase d'accélération le niveau d'eau à l'avant du cylindre est supérieur à celui de l'arrière et inversement pendant la phase de décélération. La protance moyenne augmente et le comportement est de « type profil portant », il n'y a plus d'oscillations de la force transversale.

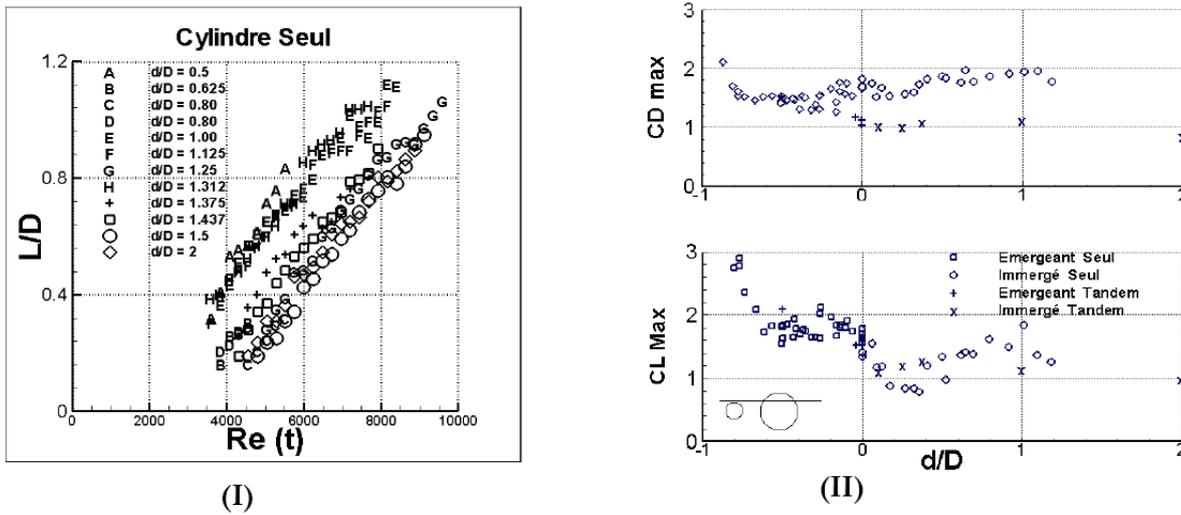


Fig 5 – (I) Evolution de  $L/D$  pour un cylindre seul et pour les très faibles profondeurs d'immersion en fonction du nombre de Reynolds instantané. (II) Evolution des coefficients de traînée max et de portance max pour un tandem coupant la surface libre ; les valeurs négatives de  $d/D$  correspondent au cas où le cylindre principal coupe la surface libre. La distance entre les deux cylindres est  $B/D=1$ . Les valeurs négatives de  $d/D$  correspondent au cas où le grand cylindre est partiellement immergé.

Cas du tandem émergent : rappelons que la configuration retenue est symétrique, les axes du cylindre principal et du petit cylindre sont situés dans un même plan horizontal. Les résultats reportés sur la figure 6 (II) montrent que l'interférence des deux cylindres confère au tandem un comportement de type profil symétrique qui se traduit par une diminution de la force de traînée à très faible profondeur, mais dès que l'émergence critique est atteinte, c'est le phénomène de type « barrage » qui prend le pas et le coefficient de l'émergence critique atteint le niveau « cylindre seul ». La présence du cylindre amont a tendance à diminuer la valeur du  $CL_{max}$  pour  $d/S$  positifs. Pas de changement notable attribué à l'interférence si  $d/D$  est négatif.

## II. Discussions des résultats et conclusions

Nous avons présenté une étude expérimentale des efforts hydrodynamiques agissant sur un cylindre principal tracté en mouvement accéléré/décéléré. Les effets d'un cylindre amont de petit diamètre est présenté pour deux configurations.

La configuration symétrique est retenue pour caractériser le coefficient de portance en amplitude et en fréquence en fonction de la profondeur d'immersion et de la configuration du tandem. On utilise pour cela les valeurs extrémales de  $F_y$  ainsi que les positions du tandem correspondantes. On montre la pertinence du paramètre « écart entre deux maxima ou minima successifs » pour caractériser les effets instationnaires dus au mouvement accéléré/décéléré et les oscillations non linéaires de  $Cl(t)$  qui en résultent. les effets d'interférence mis en évidence pour une profondeur d'immersion de  $d/D=5$ , figure 2a augmentent la valeur du  $CL_{max}$ . Ce qui veut dire que les tourbillons issus du cylindre amont provoquent une anticipation du lâcher et raccourcissent ainsi la longueur de la zone de recirculation figure 4a. la forte non linéarité du profil de surface libre ainsi que la présence du jet se traduisent par une augmentation du nombre de Strouhal et les effets de SL prennent le pas sur l'effet d'interférence à très faible profondeur.

La configuration symétrique a permis d'étudier les efforts lorsque le cylindre principal est partiellement immergé. On montre que lorsque le tandem est immergé, l'évolution de la traînée permet de penser que le comportement est celui d'un profil portant symétrique qui conduit à des valeurs de  $Cd_{max}$  faibles, résultats observables aussi mais à une moindre mesure sur le  $CL_{max}$ , figure 5 (II). Par ailleurs, lorsque le cylindre principal coupe la surface libre, le comportement des efforts hydrodynamiques est dicté par la dissymétrie de la répartition des niveaux d'eau devant et derrière du cylindre principal. Dans ce cas les effets d'interférence ne sont plus perceptibles.

La suite de ce travail sera consacrée à mesurer le champ de vitesse derrière le cylindre principal de manière à mesurer les vorticité dans le sillage proche en utilisant une technique de type PIV.

## Références

- [1] Bearman, P.W. & Wadcock, A.J. 1973. The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream, *Journal of Fluid Mechanics* 61, pages 499-511.
- [2] Zdravkovich, M.M. 1988. Review of Interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 28, Issues 1-3, Pages 183-199.
- [3] Rockwell, D. 1998. Vortex-body interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume 30, pages: 199-229
- [4] Malavasi, S. & Guadagnini A., 2007, Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow, *Journal of Fluids and Structures*, 23, 1137-1148.
- [5] Oshkai, P. & Rockwell, D., 1999, Free surface wave interaction with a horizontal cylinder, *Journal of Fluids and Structure*, 13, 935-954.
- [6] Price, S.J., 1976, The origin and nature of the lift force on leeward of two bluff bodies, *Journal of Aeronautics Quarterly*.
- [7] Rajaona, R.D. & Rakotondrajaona, L., 2005, Etude expérimentale du déferlement derrière un cylindre en mouvement accéléré/décéléré en dessous d'une surface libre. 10èmes Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, 10, 203-216.
- [8] Rajaona, R.D., Rakotondrajaona, L. & Rasolomanana E. 2008. On the lift forces acting on a cylinder accelerating and decelerating beneath a free surface, *Proceedings, IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering*, Hamburg University of Technology, Hamburg: Springer Verlag.
- [9] Rajaona, R.D., Rakotondrajaona, L. & Rasolomanana E. 2009. Interaction entre deux cylindres tractés sous une surface libre, *CFM 2009*, Marseille, 24 – 28 Août.
- [10] Duncan, J.H., 1981, An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil, *Proceedings R. Soc. London*, 126, 331-348.

## Article 16. Évaluation du rayonnement solaire direct appliqué à l'utilisation d'un four à concentrateur solaire dans la zone Nord de Madagascar

M. H. Andrianirina<sup>1,2</sup>, L. F. Rafanotsimiva<sup>1,2</sup>, C. B. Andrianirina<sup>1,3</sup>, G. Micolau<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ecole Doctorale Thématique Énergie Renouvelable et Environnement de l'Université d'Antsiranana

<sup>2</sup>Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diego-Suarez de l'Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana

<sup>3</sup>Institut Supérieur des Sciences et Techniques de l'Université de Mahajanga

<sup>4</sup>Laboratoire EMMAH UMR INRA, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse

Correspondant : mamy.andrianirina@ist-antsiranana.mg

**Mots clés** : Traqueur solaire, Four solaire, Solaire thermique, Rayonnement solaire, Modèle de Capderou.

### Résumé

Le contexte scientifique de ce travail de recherche réside en la conception puis la réalisation d'un système intégré de four à concentrateur solaire pour l'éco-extraction d'huiles essentielles, basée sur de la technologie libre de droits, dite « open-source ». Un des nœuds scientifiques est le dimensionnement des différents dispositifs devant être intégrés. Un des premiers aspects concerne la puissance solaire exploitable par le système. Cette communication présente une estimation de l'irradiation directe par des modèles de rayonnement solaire. Le calcul est assuré par intégration numérique de l'éclairement en utilisant le modèle de Capderou sous le logiciel libre Octave. Le programme réalisé utilise les coordonnées géographiques du lieu d'emplacement ainsi que l'horloge solaire pour calculer la trajectoire apparente du soleil en utilisant l'algorithme de Jean Meeus. Ce dernier permet de déterminer l'heure du lever et du coucher du soleil ainsi que la hauteur de l'astre à un moment précis. Notre évaluation a été effectuée pour le site de Latitude 12,32°Sud et de Longitude 49,31°Est. Pour la zone Nord de Madagascar, le rayonnement direct atteint 1388,729W/m<sup>2</sup> dans le jour le plus ensoleillé en été, pour être réduit d'environ 3/4 (1084,42W/m<sup>2</sup>), en hiver.

### Nomenclature

$\alpha$	Azimut
$A_{ne}$	Alternance hiver-été
CS	Coucher du soleil
Dec	Déclinaison
DJ	Durée de la journée
H	Hauteur solaire
$I_0$	Constante solaire
$I_d$	Rayonnement direct
Jour	Numéro du jour dans le calendrier grégorien
JourS	Numéro du jour solaire
L	Latitude
LS	Lever du soleil
$m_A$	Masse atmosphérique
$T_0$	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau
$T_1$	Trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh
$T_2$	Trouble relatif a la diffusion par aérosols
$T_L$	Facteur de trouble atmosphérique
$\omega$	Heure Horaire
z	Altitude
$\delta_R$	Épaisseur optique de Rayleigh
$\varepsilon$	Correction de la distance terre-soleil

### I. Introduction

L'opération d'extraction est très coûteuse en termes d'énergie puisqu'il s'agit de chauffer à des températures assez élevées le mélange contenant les huiles essentielles. Depuis quelques années, des chercheurs s'intéressent à l'exploitation de l'énergie solaire pour respecter le principe de développement durable et l'empreinte écologique globale de la production. Puisque dans une grande majorité de cas, les huiles essentielles sont extraites à partir de plantes poussant dans des régions du monde où le soleil est abondant, il serait intéressant de profiter de cette énergie gratuite pour extraire les substances localement, contribuant ainsi à fortement réduire les transports de matières premières. Dans ce papier,

nous allons trouver trois grandes lignes, la première est un état l'art des travaux existant sur l'extraction solaire suivie de la présentation sommaire du projet "Calo-Masoandro", la deuxième consiste à présenter les méthodes que nous avons mis en œuvre pour évaluer la trajectoire solaire et la radiation solaire direct, et la dernière énumère les résultats de l'évaluation de ces deux paramètres obtenu par un programme que nous avons écrit sur le logiciel GNU-Octave.

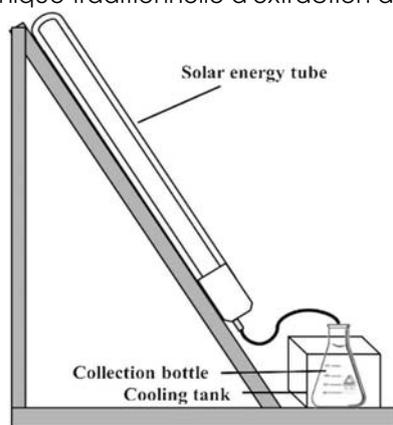
## II. État de l'art sur l'extraction solaire

Le développement des extracteurs d'huile essentielle par énergie solaire intéresse beaucoup de chercheurs. Des projets voient le jour en produisant des systèmes plus écologiques. Néanmoins, la maîtrise des paramètres essentiels tels que la gestion de l'énergie et la gestion des températures pose encore des soucis de mise œuvre de ces procédés. La figure 1 montre une distillerie solaire réalisée à l'Université de Tokat en Turquie en 2016. Pour un ciel clair, 78 à 80% des besoins énergétiques totaux liés à la distillation des huiles essentielles provenaient de l'énergie solaire. Cependant, la formation de nuages pendant la journée nécessitait une chauffe électrique partielle pour compléter le processus de distillation. Lorsque le rayonnement solaire n'était pas concentré, l'eau de distillation ne pouvait pas bouillir sans radiateur électrique. [1]



Figure 1 : Distillerie solaire pour huile essentielle avec CPCs [1]

L'Université de Kao Yuan de Taiwan a étudié l'extraction de l'huile essentielle de Cymbopogon citrus par énergie solaire et par hydro-distillation. Les résultats montrent que les rendements de l'extraction de l'énergie solaire et de l'hydro-distillation sont presque les mêmes, avec respectivement 1,28% et 1,30%. Du point de vue de la consommation d'énergie, l'hydro-distillation dépense 858kWh d'électricité par kg d'huile essentielle, alors que l'extraction par énergie solaire ne nécessite aucun apport énergétique. La figure 2 montre une méthode d'extraction entièrement écologique par l'énergie solaire est une alternative viable à la technique traditionnelle d'extraction de l'huile essentielle. [2]



(a) Schematic diagram



(b) Actual set-up

Figure 2 : Méthode d'extraction entièrement écologique par l'énergie solaire [2]

Un concentrateur de Scheffler de 8m<sup>2</sup> comme montre la figure 3 a été conçu pour une distillation des plantes médicinales et aromatiques par des chercheurs de l'Université de l'Agriculture, Faisalabad au Pakistan. Le réflecteur est installé sur le site requis en plaçant son axe de rotation selon un angle égal à la latitude du site. Pour la surveillance quotidienne, ces concentrateurs tournent selon un axe parallèle à l'axe polaire de la Terre à une vitesse angulaire de un tour par jour en utilisant des dispositifs d'auto-surveillance plus simples et moins coûteux. Pour la surveillance saisonnière, le réflecteur tourne de moitié l'angle de déclinaison solaire à l'aide d'un mécanisme de serrage télescopique. La procédure de conception est simple, flexible et ne nécessite aucune configuration informatique spéciale, offrant ainsi la perspective d'une application potentielle dans les configurations domestiques et industrielles. [3]



Figure 3 : Distillation des plantes médicinales et aromatiques avec un concentrateur de Scheffler

En collaboration avec des chercheurs du laboratoire EMMAH, des apprentis ingénieurs de l'EICNAM, ont réalisé un prototype de four solaire tel que représente la figure 4 pour une extraction des substances chimiques des plantes. Ainsi, le projet "Calo-Masoandro" a vu le jour afin d'améliorer ou de concevoir un four solaire plus adapté à l'extraction. Le prototype réalisé comporte un système de suivi solaire à deux axes. De point de vue autonomie, le système nécessite un apport d'énergie extérieur pour alimenter le système automatique.

Figure 4 : Prototype de four solaire développé à l'IECNAM

### Projet "Calo-Masoandro"



Le projet "Calo-Masoandro" consiste à développer un prototype de four solaire permettant l'extraction d'huiles essentielles par phénomène de distillation au plus proche des lieux de production des espèces végétales. L'utilisation du soleil comme source d'énergie primaire permet de répondre à deux enjeux importants. Le premier concerne le principe de développement durable et l'empreinte écologique globale de la production. Puisque dans une grande majorité de cas, les huiles essentielles sont extraites à partir de plantes poussant dans des régions du monde où le soleil est abondant, il serait intéressant de l'utiliser pour extraire les substances localement, contribuant ainsi à fortement réduire les transports de matières premières. Le second enjeu, plus technique est celui de la simplicité conceptuelle du dispositif envisagé : utiliser ce que la nature met à disposition permet la limitation d'utilisation d'énergies fossiles et la dépendance à des réseaux de distribution d'eau ou d'électricité, parfois éloignés des zones de production. Ainsi, le choix de la zone Nord de Madagascar est justifié par l'abondance en ensoleillement, et sa richesse en matière de plantes aromatiques telles que l'ylang ylang, la vanille et autres.

Le choix technologique pour la réalisation de notre prototype repose sur le choix des différents composants à intégrer dans notre système, étant données que nous envisageons un système autonome en énergie, et un minimum de maintenance. Il existe plusieurs modèles de four solaire. Cependant, peu d'entre eux sont dédiés à l'extraction demandant une bonne précision dans la régulation de la température ou de la puissance électrique produite. Avant de pouvoir généraliser un tel procédé, il est nécessaire de comprendre les difficultés précises rencontrées sur un tel appareillage. C'est le but de la réalisation d'un prototype intégrant une approche de système conçu dans sa globalité : production d'énergie et maîtrise de son utilisation à partir des contraintes du processus chimique d'extraction.

### III. Méthodes et matériels

#### III. 1. Algorithme de Jean Meuss

La première approche consiste à étudier le mouvement du soleil pour maîtriser son exploitation dans le projet. Pour évaluer la trajectoire solaire, l'algorithme de Jean Meuss a été utilisé. L'algorithme a besoin en entrée la latitude du lieu où on envisage de poser le système. Dans ce projet, un système GPS a été utilisé pour la localisation, ainsi que les paramètres temps Jours de l'année et Heure de la journée, l'horloge interne du microprocesseur permet d'avoir directement ce paramètre.

Les étapes de l'algorithme sont décrites comme suit :

Variables : Entrées : Latitude (L), Jours, Heures

Sorties : Hauteur solaire (H), Azimut (a)

1. Calcul du Jour Solaire (JourS)
2. Calcul de la déclinaison (Dec)
3. Calcul de la Durée du Jours (DJ)
4. Calcul de l'Heure du Lever du soleil (LS)
5. Calcul de l'Heure du Coucher du soleil (CS)
6. Calcul de l'Angle Horaire ( $\omega$ )
7. Calcul de la Hauteur solaire (H),
8. Calcul de l'Azimut (a)

##### • Jour solaire

Le Jour solaire est l'unité fondamentale du temps solaire, il est défini par l'intervalle de temps de passage du soleil au méridien. L'équation (1) donne la valeur du jour solaire par rapport au jour du calendrier grégorienne.

$$JourS = \frac{Jour \times 360}{360,25} \quad (1)$$

##### • Déclinaison

La déclinaison est l'angle formé entre la direction du pôle Nord géographique et le Nord magnétique. L'équation (2) permet de calculer cette déclinaison et elle varie entre  $-23,45^\circ$  à  $+23,45^\circ$ .

$$Dec = 23,45 \times \sin\left(\frac{2 \times Pi \times 284 + JourS}{365,25}\right) \quad (2)$$

##### • Angle horaire

Du à la rotation de la terre sur son axe, angle entre la longitude et le méridien parallèle aux rayons solaires, elle correspond à  $\omega = 0^\circ$  à midi solaires et comprise entre  $-180^\circ$  à  $180^\circ$ , il est donnée par la relation (3)

$$\omega = 15 \times (Heures - 12) \quad (3)$$

##### • Latitude

Angle entre la verticale du lieu et le plan de l'équateur, négative dans hémisphère sud ( $-90^\circ < L < 90^\circ$ ). Pour la détecter, nous avons utilisé un système GPS.

##### • Durée de la Journée

La durée de la journée varie selon la latitude du lieu géographique et la déclinaison, la relation (4) donne la valeur de la durée de la journée.

$$DJ = asccos(-\tan(Dec) \times \tan(L)) \quad (4)$$

A partir de la durée de la journée, nous pouvons tirer l'heure du lever (5) et du coucher du soleil (6)

$$LS = 12 - \frac{DJ}{15} \quad (5)$$

$$CS = 12 + \frac{DJ}{15} \quad (6)$$

### • Trajectoire solaire

Le trajectoire solaire est défini par deux grandeurs, sur un point fixe O face Nord pour viser le soleil, tourner d'un angle permet de trouver l'Azimut et puis lever la tête d'un angle pour la hauteur solaire.

La hauteur solaire est donnée par la relation (7) :

$$H = \arcsin(\sin(L) \times \sin(Dec) + \cos(L) \times \cos(Dec) \times \cos(\omega)) \quad (7)$$

L'Azimut solaire est donné par la relation (8) :

$$a = \arcsin\left(\frac{\cos(Dec) \times \sin(\omega)}{\cos(H)}\right) \quad (8)$$

### III. 2. Modèle de Capderou pour le Rayonnement solaire direct

Le modèle de Capderou permet le calcul du rayonnement direct [4], en fonction de la masse d'air  $m_A$ , de l'épaisseur de l'atmosphère  $\delta_R$ , du facteur de trouble  $T_L$  et de la hauteur solaire calculée précédemment. Il est décrit par l'équation (9) :

$$I_d = I_0 \times \varepsilon \times \sin(H) \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (9)$$

Dans ce modèle, les facteurs environnementaux influencent l'évaluation du rayonnement reçu sur un surface donnée.

Le constante solaire  $I_0$  exprime la quantité d'énergie reçu par  $m^2$ . Pour l'application numérique,  $I_0 = 1353 \text{ Wm}^{-2}$ .

$\varepsilon$  est un paramètre permettant de corriger la distance terre-soleil, il est exprimé par la relation (10) :

$$\varepsilon = 1 + 0,034 \times \cos(0,986 \times \text{jour} - 2) \quad (10)$$

Selon [5], le facteur de trouble atmosphérique par ciel clair est représenté par la relation (11). Il est décomposé en trois coefficients auxiliaires dont le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$ , le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$ , et le trouble relatif à la diffusion par aérosols  $T_2$ . Ces trois coefficients sont donnés respectivement par les relations (12), (13) et (14).

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (11)$$

$$T_0 = (2,4 - 0,9 \times \sin(L)) + 0,1 \times (2 + \sin(L)) - 0,2 \times z - (1,22 + 0,14 \times A_{he}) \times (1 - \sin(H)) \quad (12)$$

$$T_1 = 0,89^z \quad (13)$$

$$T_2 = [0,9 + (0,4 \times A_{he})] \times (0,63)^z \quad (14)$$

Avec  $A_{he}$  l'alternance hiver-été donnée par :

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360 \times (\text{jour} - 121)}{365}\right) \quad (15)$$

Toujours dans le modèle de Capderou, la variation de la masse d'air atmosphérique dépend de la hauteur solaire. Elle est donnée par l'expression (16) :

$$m_A = \frac{(0,89)^z}{\sin(H)} \quad (16)$$

Le dernier paramètre du modèle est l'épaisseur de Rayleigh qui est lui aussi fonction de la masse d'air  $m_A$ .

$$\delta_R = (9,4 + (0,9 \times m_A))^{-1} \quad (17)$$

## IV. Résultats et Discussions

### Trajectoire Solaire

L'application que nous avons conçu permet de prédire la trajectoire solaire d'une journée donnée dans une zone géographique définie en entrant les coordonnées géographiques du lieu étudié. Nous avons choisi la zone Nord de Madagascar pour le projet, sur le site (Latitude : 12.32°S, Longitude: 49,31°E et Altitude: 50m). La figure 5 représente les résultats de simulation après l'exécution de notre programme écrit avec le logiciel Octave. A gauche une courbe montre l'évolution de la hauteur du soleil par rapport au temps, à droite la représentation de la trajectoire solaire en fonction du temps.

Sur ces deux courbes, nous pouvons constater que la durée de la journée est définie par l'intersection des courbes par l'axe du temps, la première intersection détermine l'heure du lever du soleil et la seconde intersection détermine l'heure du coucher du soleil. Le 21 juin (Solstice d'hiver), c'est la journée la plus courte comme montre les deux courbes. Sur la courbe à droite, nous pouvons déduire l'angle du lever et du coucher du soleil, et au zénith (Azimut = 0), le soleil est le plus haut dans la journée.

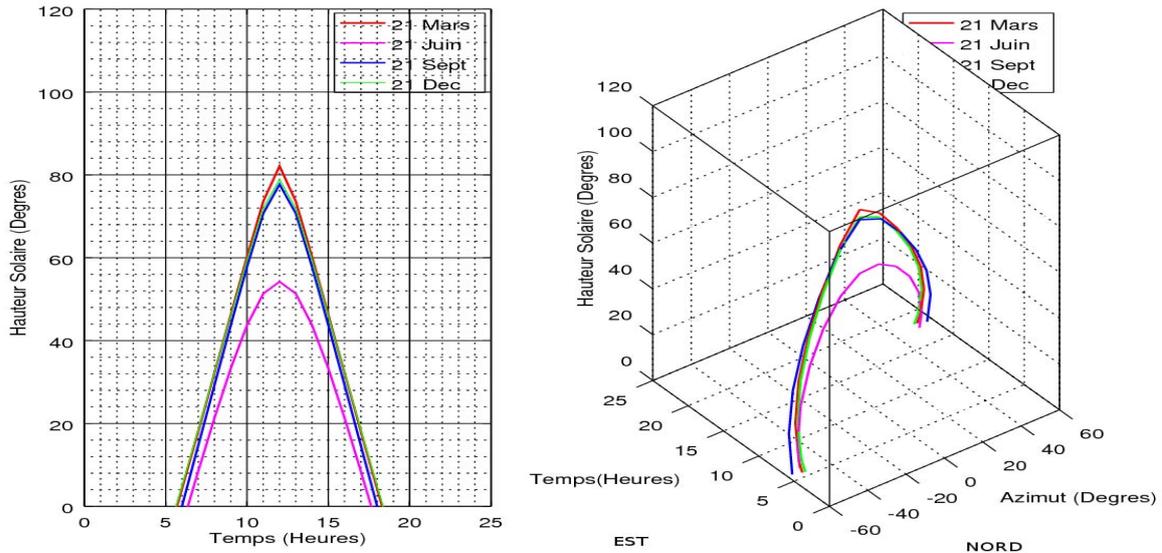


Figure 5 : Trajectoire Solaire par l'Algorithme de Jean Meeus

### Rayonnement Solaire : Influence du changement de lieu géographique sur le Rayonnement direct

Le rayonnement direct dépend de l'emplacement géographique du système, la variation journalière pendant une année du rayonnement direct est représentée sur la figure 6. Sur la courbe, la valeur maximale du rayonnement direct atteint tourne autour de 960W/m<sup>2</sup> au milieu de la journée au mois de Décembre sur deux localités voisines. En juin, cette valeur maximale au milieu de la journée varie de 630 à 730W/m<sup>2</sup>.

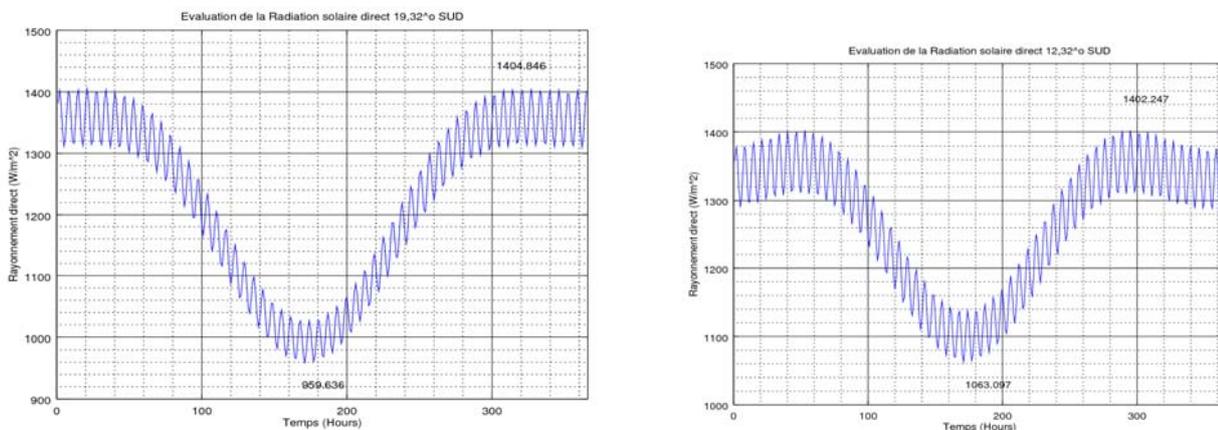


Figure 6 : Variation journalière du rayonnement direct pendant une année : influence de l'altitude sur le Rayonnement direct

La figure 7 montre trois courbes qui représentent les différentes valeurs du rayonnement direct à la latitude 12,32° Sud, la variation de l'altitude modifie l'estimation du rayonnement direct à cause de l'influence des paramètres environnementaux comme la masse d'air atmosphérique et l'épaisseur de Rayleigh qui entrent dans le modèle de

Capderou. Quelque soit l'altitude du lieu en juin, le rayonnement solaire est toujours inférieur aux autres périodes de l'année. A l'altitude 50m où nous allons implanter notre système, le Rayonnement maximale reçu le jour du 21 Juin est de  $1084,52\text{Wm}^{-2}$ . Cette valeur est la plus basse pendant toute l'année.

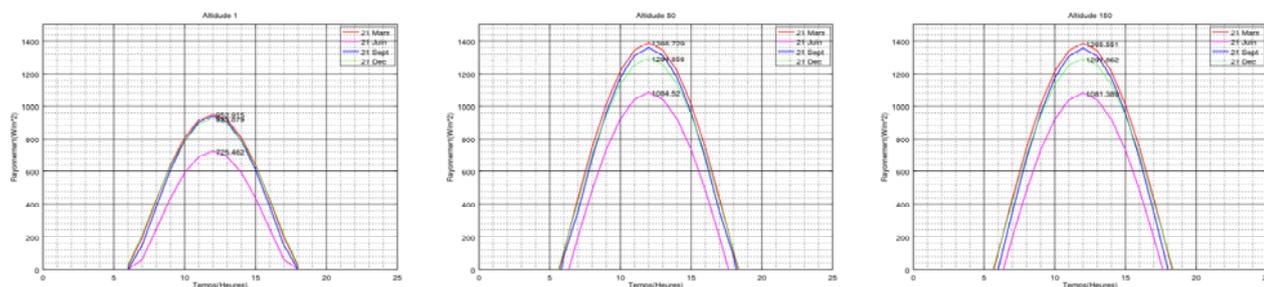


Figure 7 : Rayonnement direct à la latitude  $12,32^\circ$  Sud

## V. Conclusion

Dans cet article, une application sous le logiciel Octave pour estimer la trajectoire solaire journalière ainsi que pour évaluer le Rayonnement solaire direct destiné aux fours solaires pour extraction de l'huile essentiel a été conçue. L'application peut faire les calculs de ces deux paramètres sur un lieu géographique choisi, en lui donnant en entrée comme paramètres la latitude et l'altitude du lieu et le jour de l'évaluation. Dans notre cas, nous avons évalué la zone Nord de Madagascar et en entrée, nous avons choisi deux Latitudes  $12,32^\circ\text{S}$  et  $19,32^\circ\text{S}$  pour notre estimation. Pour l'altitude, nous avons utilisé 1m, 50m et 150m. Comme paramètre temps, nous avons évalué l'évolution de ces paramètres pour les quatre jours les plus marquants de l'année (21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre). Les résultats obtenus nous permettent de prédire la trajectoire solaire pour un jour donné, le 21 Juin est la journée la plus courte. En été, la valeur maximale du rayonnement solaire direct tourne autour de  $950\text{Wm}^{-2}$  déjà à 1m d'altitude. Au-delà de 50m, elle peut atteindre  $1400\text{Wm}^{-2}$ . En hiver, cette valeur est réduite à  $3/4$  quelque soit l'altitude du lieu :  $725,46\text{Wm}^{-2}$  à 1m et  $1084,52\text{Wm}^{-2}$  à 50m.

## Bibliographie

- [1] Y. Kulturel et S. Tarhan, « Performance of a Solar Distillery of Essential Oils with Compound Parabolic Solar Collectors », vol. 75, p. 6, 2016.
- [2] H. Y. Yen et Y. C. Lin, « Green extraction of Cymbopogon citrus essential oil by solar energy », *Ind. Crops Prod.*, vol. 108, p. 716-721, déc. 2017.
- [3] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, H. Hoedt, W. Amjad et A. Ghafoor, « Design, development and experimental results of a solar distillery for the essential oils extraction from medicinal and aromatic plants », *Sol. Energy*, vol. 108, p. 548-559, oct. 2014.
- [4] F. Yettou, A. Gama, M. Ali, B. Azoui et C. Larbes, « Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires », vol. 14, p. 27-46, avr. 2011.
- [5] F. Yettou, A. Malek et M. Haddadi, « Étude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie », p. 16.