
CHAPITRE 4 :

Résultats et discussions

Introduction :

L'étude dans le cadre de ce projet a portée sur le comportement énergétique et en vieillissement d'un polymère thermodurcissable (le polyéthylène) utilisé comme matériau absorbant dans les capteurs solaires à eau et à air. L'étude comporte deux parties, une investigation en laboratoire qui nous a permis de caractériser le matériau d'étude du point de vue physico-chimique : Emissivité, conductivité thermique, masse volumique, diffusivité thermique, et du point de vue de sa caractérisation en vieillissement. L'exposition solaire, en utilisant le polyéthylène dans les systèmes de captation, nous a permis de relever les différentes valeurs de température au niveau de l'absorbeur, du vitrage et de la température ambiante. La deuxième partie de cette étude est une modélisation et une simulation des échanges thermiques en utilisant deux systèmes solaires de captation : Distillateur rempli d'eau et capteur solaire à air et en utilisant les paramètres trouvés dans la simulation expérimentale. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et échangent de ce fait entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

I. Propriétés du matériau d'étude :

Le PE, utilisée dans cette étude, est fabriqué au complexe pétrochimique de Skikda (Algérie). Le film commercial de polyéthylène basse densité (PEBD) a 117 μm environ. Nous avons mesuré quelques propriétés de notre matériau le PE (voir chapitre 2), et nous résumons les résultats obtenus comme suit :

1.1 Emissivité :

On présente les résultats obtenus pour le matériau étudié, le film en PE, dans le **tableau 4.1**.

Tableau 4.1 : Les résultats de mesure de l'émissivité du matériau d'étude

Valeur de l'émissivité		Incertitude type composée	Incertitude élargie
8 - 14 μm	1-20 μm		
0,980	0,970	0,004	0,007

Les valeurs ont été obtenues après étalonnage sur une feuille d'aluminium rugueux, en considérant la même valeur d'émissivité dans les deux bandes de mesure. Les mesures ont été réalisées à température ambiante ($21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$). On note que la valeur d'émissivité est légèrement plus élevée dans la bande 8-14 μm que dans la bande 1-20 μm .

1.2 Masse volumique :

La masse volumique du film polymère en PE a été caractérisée en utilisant un pycnomètre (voir chapitre 2). La valeur de la masse volumique retrouvée par la mesure $\rho_{PE} = (0,929 \pm 0,01) \text{ g.cm}^{-3}$.

1.3 Conductivité thermique, Diffusivité thermique et Capacité thermique massique :

Nous présentons les résultats obtenues sur un film polymère en PE utilisé comme absorbeur de chaleur dans les dispositifs à effet de serre. Les valeurs de la conductivité et la diffusivité thermique du film polymère en PE sont caractérisées par la méthode périodique présentée au chapitre 2. La valeur de la conductivité thermique obtenue est $k_{PE} = (0,48 \pm 0,01)$ et la valeur de la diffusivité thermique est $a_{PE} = (0,314 \pm 0,02)$. La valeur de la capacité thermique massique du film polymère en PE est donnée par le calcul de la valeur de C_{pPE} à partir des valeurs de la masse volumique mesurée, de la conductivité et de la diffusivité thermique en utilisant la relation suivante :

$$C_p = \frac{k}{a \cdot \rho} \quad (1)$$

On obtient la valeur de la capacité thermique massique suivante : $C_{pPE} = (1,645 \pm 0,012)$.

1.4 Autres propriétés :

Nous récapitulons quelques propriétés intrinsèques au film en PE dans le **tableau 4.2**.

Tableau 4.2 : Quelques propriétés du matériau d'étude

Propriétés	Unité	Valeur
Densité		$0,943 \pm 0,001$
Température de fusion	°C	$127,6 \pm 0,1$
Taux de cristallinité	%	40 ± 2
Masse molaire moyenne en poids	Kg / mol	220
Module d'élasticité	Mpa	345 ± 50
Température de transition vitreuse	°C	✓ 110
Coefficient de dilatation	K ⁻¹	$2 \cdot 10^{-4}$

II. Comportement énergétique du polyéthylène sous exposition solaire :

2.1 Distillateur solaire :

Nous présenterons deux études sur le même distillateur solaire. Dans la première, nous utiliserons un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur et, dans la deuxième étude, nous mettons un bac en fer galvanisé peint en noir et recouvert d'un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur. Nous présenterons les résultats expérimentaux dans les deux cas.

2.1.1 Distillateur avec film PE seul :

Nous représentons uniquement les courbes d'évolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps respectivement en trait noir pour la saumure et en trait rouge pour la vitre. Les données de quantité d'eau distillée produite présentent une certaine dispersion. Pour chaque nuage de points nous avons déterminé une courbe de tendance polynomiale d'ordre 4. Nous résumons notre interprétation sous forme d'observation des tendances du système que nous avons pu constater lors des différentes journées de tests [1].

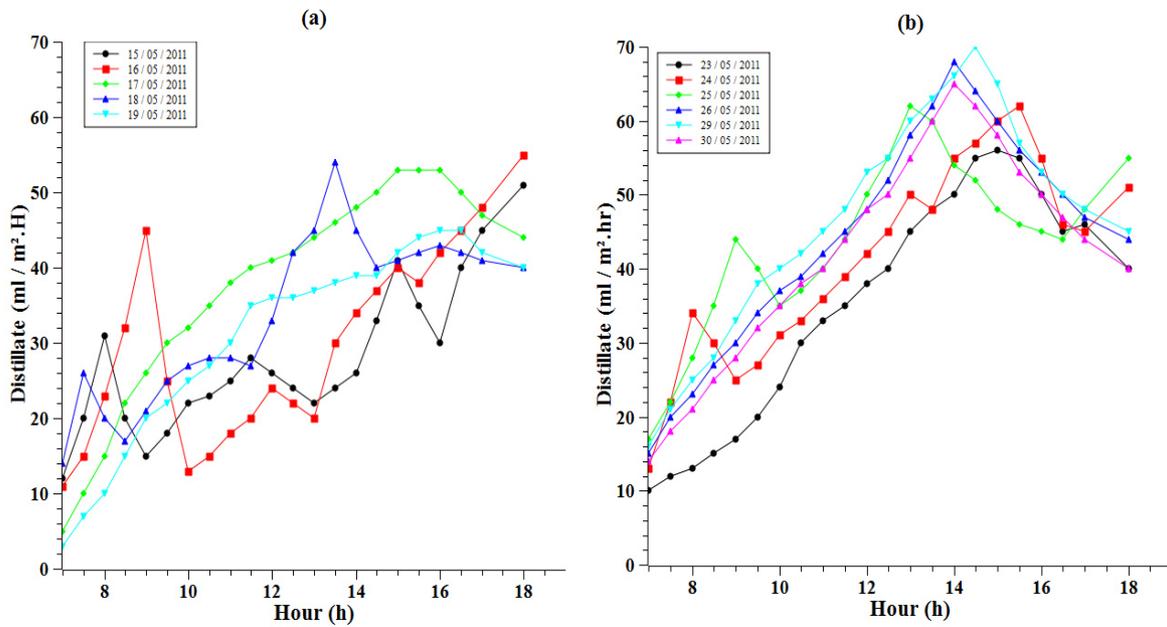


Figure 1 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps pour Différentes journées

- Journée du 15 mai 2011** : Au début la température de la vitre est nettement au-dessus de celle de l'eau saumâtre, cela est dû au fait que la solution nouvellement préparée est au début presque à la température nocturne de la salle et la vitre à la température du milieu ambiant extérieure. Le phénomène ne s'inverse qu'après environ 02 heures de marche. Cette évolution marginalise la production du système qui ne reste nulle après une mise en marche d'environ 05 heures. L'évolution de température entre la vitre et l'eau saumâtre illustre le phénomène par la faible différence entre les deux courbes. On ne constate une production qu'au environ de 14h30min où la différence de température atteint 10°C.

$h = 5\text{cm}$; $C = 7,85\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

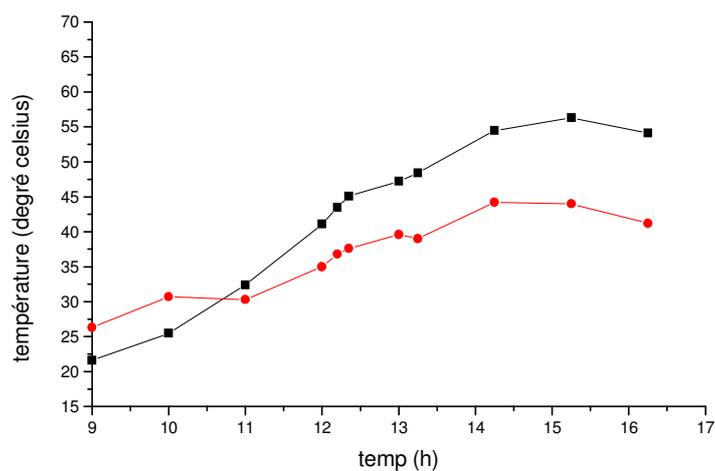


Figure 2 : Courbes d'évolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Journée 16 mai 2011** : La différence de température est presque nulle au début. La solution n'ayant pas été renouvelée conserve une légère hausse de température par rapport à

celle de la salle ; car le dispositif étant isolé perd très lentement la chaleur emmagasinée pendant la journée. Pour cette journée la température de l'eau saumâtre reste sensiblement inférieure à celle de l'eau saumâtre de la journée du 15 mai 2011, mais par ailleurs la différence de température entre l'eau saumâtre et la vitre est nettement élevée et conduisant à une production plus grande. La différence de température nettement élevée s'explique par l'état de vent fort pour cette journée qui contribue à la chute de température de la vitre, donc on peut dire que le vent influe positivement sur la production du système.

$h = 4,114 \text{ cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

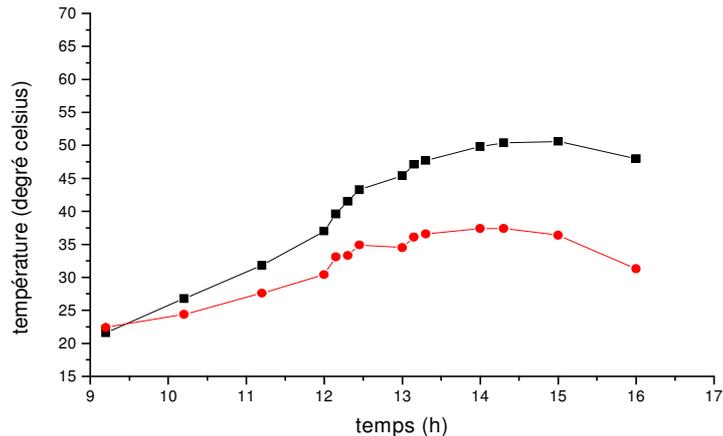


Figure 3 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 17 mai 2011 :** Les conditions météorologiques (ciel clair et vent fort) sont similaires à celles du 16 mai 2011. On remarque que les écarts de températures pour les deux journées suivent la même évolution. La légère hausse de production est due à la température initiale de l'eau saumâtre qui est un peu élevée permettant ainsi au système d'atteindre le régime de fonctionnement relativement plus vite.

$h = 4.114 \text{ cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

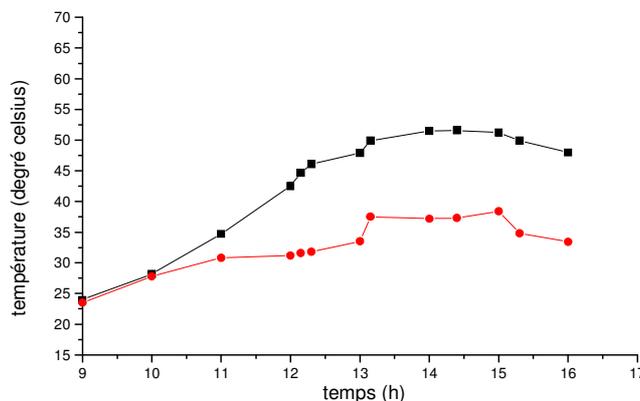


Figure 4 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 18 mai 2011 :** La hauteur de l'eau saumâtre est égale à 1 cm. Les conditions météorologiques sont comparables à celles des journées précédentes. Dans ces conditions, on constate que les températures augmentent très vite atteignant des valeurs très élevées et de

même les écarts de températures entre l'eau saumâtre et la vitre sont appréciables, mais on constate aussi une décroissance très rapide des températures du système avec une diminution de l'écart. Ceci montre que la diminution de l'épaisseur de la nappe d'eau saumâtre à une influence favorable sur la production du système, mais pendant une période de fonctionnement trop pointue. Par ailleurs la courbe de la quantité d'eau produite présente des points trop dispersés. Cela parce que la faible épaisseur de la nappe d'eau saumâtre provoque des fluctuations au niveau des écarts de températures ressenties sur la quantité d'eau produite.

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

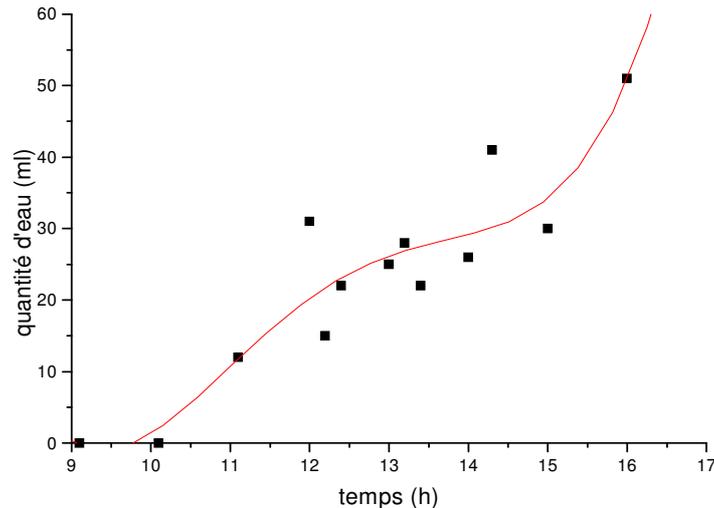


Figure 5 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

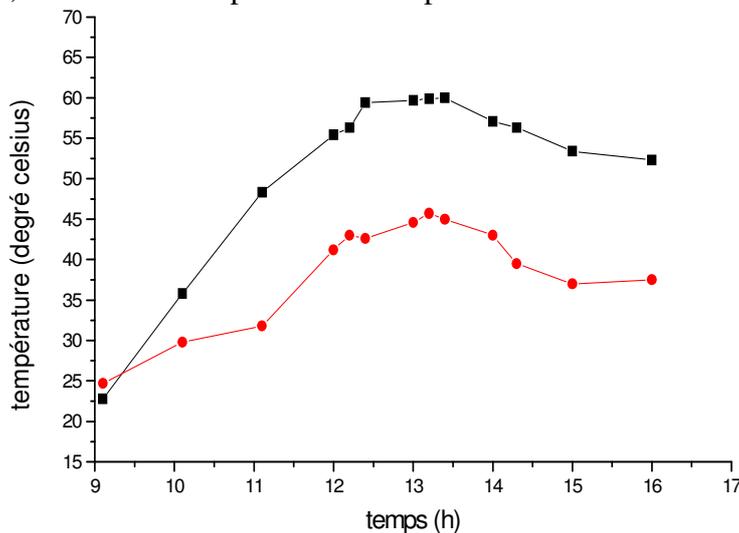


Figure 6 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 19 mai 2011 :** Les observations de la journée du 23 mai 2011 sont valables pour ces courbes aussi. Le changement brutal des conditions climatiques confirme bien la sensibilité du système pour les faibles épaisseurs de nappe.

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

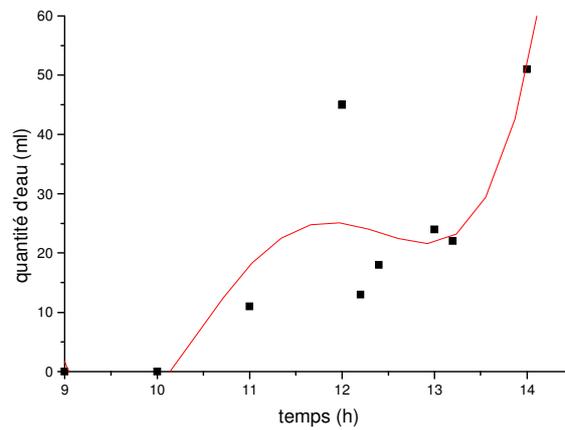


Figure 7 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

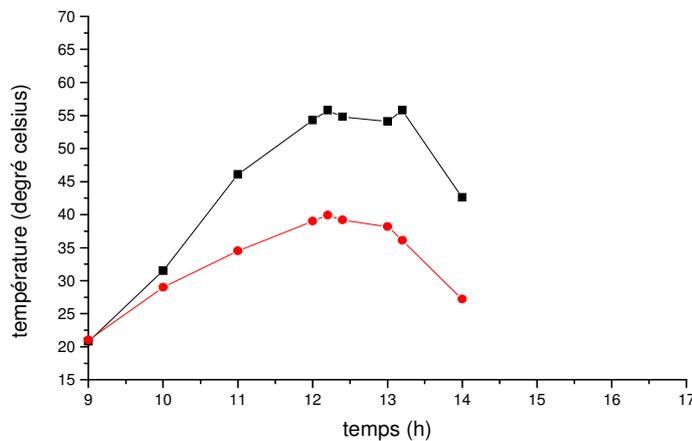


Figure 8 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Journée du 28 mai 2011 :** Avec une épaisseur égale à trois fois celle utilisée pour les journées du 18 et 19 mai 2011 et des conditions météorologiques plus mauvaises. Ayant modifié le paramètre isolation (boîtier peint avec peinture blanche+ feuille d'aluminium), on constate que les températures du système augmentent très vite dépassant celles atteintes pour l'épaisseur de 1cm pour atteindre le maximum suivi d'une diminution par contre très lente ; ceci montre l'importance de l'isolation pour un bon fonctionnement du système. Dans ce cas on constate une évolution bien polynomiale de la production du système. Cette évolution est expliquée par le faite, que suite à la bonne isolation du système les pertes de chaleur sont faibles et ayant une nappe d'eau saumâtre d'épaisseur relativement grande, la chaleur emportée par la vapeur d'eau évaporée est faible par rapport à la chaleur sensible emmagasinée par la nappe d'eau. On constate aussi une production nocturne, phénomène non observé avec l'épaisseur de 1cm. La production nocturne est due à la grande chaleur sensible emmagasinée par le système pendant la journée qui permet au système de fonctionner pendant un bon moment même après le coucher du soleil lorsqu'on a une bonne isolation.

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

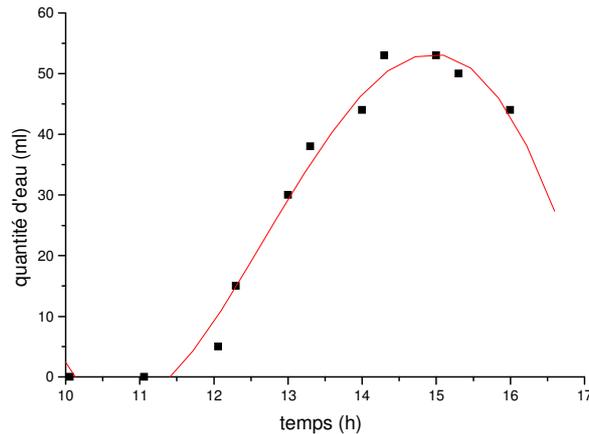


Figure 9 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche+ feuille d'aluminium.

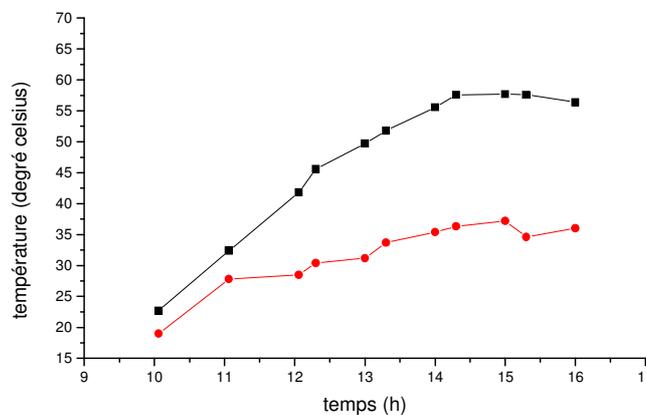


Figure 10 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journées du 29 et 30 mai 2011** : Les observations sont les mêmes que pour la journée du 28 mai 2011. La légère hausse de la production pour le 29 mai 2011 est due à l'amélioration des conditions météorologique (ciel clair et vent un peu fort). La baisse de production pour la journée du 30 mai 2011 est due à un état de ciel clair et un vent calme provoquant une légère augmentation de la température de la vitre.

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

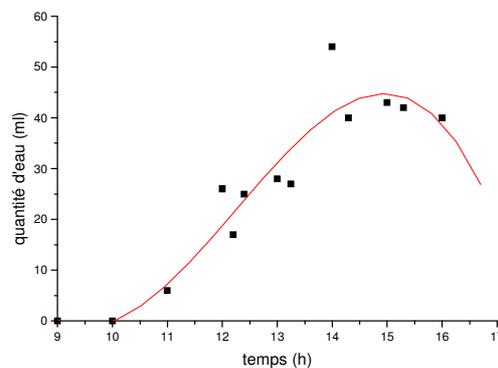


Figure 11 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

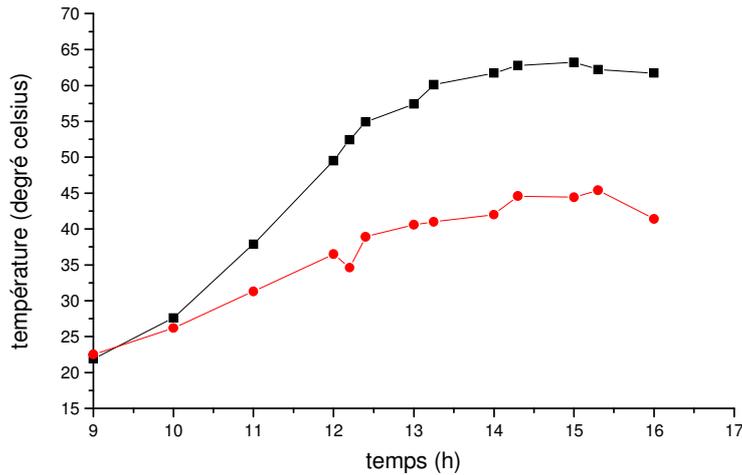


Figure 12 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

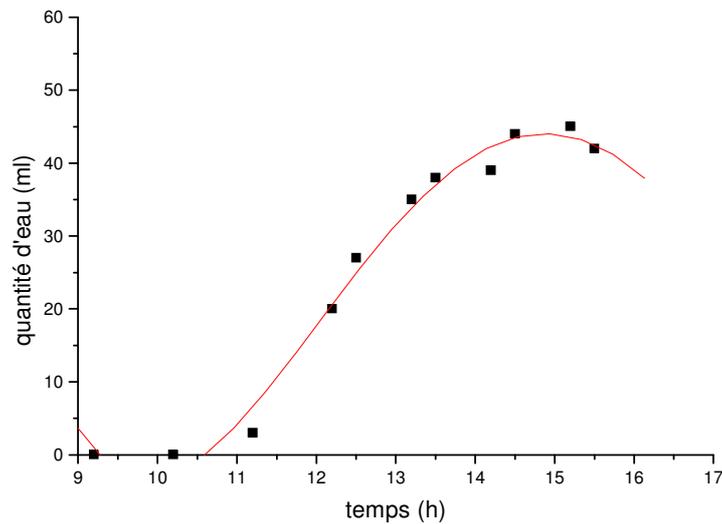


Figure 13 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

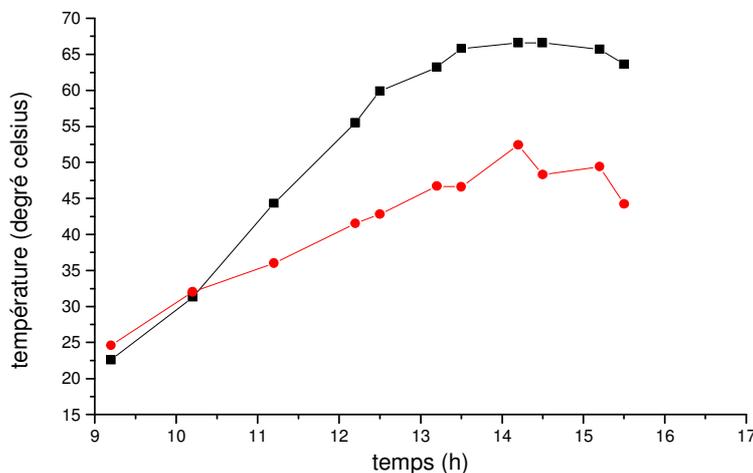


Figure 14 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Influence de quelques paramètres :
 - **Épaisseur de la nappe d'eau saumâtre** : Pour les autres paramètres géométriques fixes, les épaisseurs de 4,114 et 5 cm arrivent à peine à donner une production en fonction du temps sur l'intervalle de temps d'exposition considéré et pour une épaisseur de 1cm, on constate une production d'eau après seulement 02 heures du début de la mise en marche, d'où l'influence de l'épaisseur favorable à la production lorsqu'elle diminue. Le phénomène de dispersion des points de la quantité d'eau distillée produite pousse dans le sens du choix d'une épaisseur optimale.
 - **Isolation** : Une bonne isolation a pour conséquence l'augmentation de la production par l'obtention de températures très élevées au niveau de l'eau saumâtre. Elle permet ainsi, d'assurer pendant un intervalle variable selon l'épaisseur de la nappe le fonctionnement du système après la disparition de l'éclairement solaire. Son effet est bien illustré par les tests du 28 allant au 30 mai 2011.
 - **La salinité de l'eau saumâtre** : Ce paramètre a une influence négligeable sur le fonctionnement du système dans le cas des eaux saumâtres qui ont une limite de salinité fixée à 10g/l.

Maintenant, on va donner les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps, l'ensoleillement, la production journalière, l'efficacité interne et globale et enfin le facteur de performance pour les deux systèmes (sans et avec préchauffage), l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur. Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte des considérations suivantes:

- ✓ Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial "t" pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure,
- ✓ L'étude est effectuée sur un distillateur plan d'une surface absorbante $A_b = 1\text{m}^2$ et d'une épaisseur $\delta_b = 4\text{mm}$, une surface d'eau saumâtre $\delta_e = 2\text{cm}$, un vitrage d'aire $A_v = 5\text{mm}$ et d'un isolant d'épaisseur $\delta_{iso} = 5\text{cm}$ et une surface $A = 1.5\text{cm}$. Le distillateur plan est incliné de 30° par rapport à l'horizontal et orienté vers le sud,
- ✓ La vitesse du vent est constante et égale à 4m/s .

- **Variation des puissances solaires absorbées** : Le choix du distillateur dépend principalement de ses caractéristiques de fonctionnement. L'irradiation solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système, Il serait intéressant d'étudier son effet sur ces caractéristiques. La **figure 15** montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global (I), reçue par mètre carré de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la saumure (P_e), par la vitre (P_v) et par l'absorbeur (P_a) pour un distillateur

simple. On peut remarquer que la puissance atteint son maximum entre 12h et 13h. La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et par l'absorbeur. Ceci est dû à ses caractéristiques géométriques (épaisseur faible $E_v = 4\text{mm}$) et optiques (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevé). La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante, elle (prendre la grande partie de la puissance global absorbée (I_g)), et supérieure à celle absorbée par la nappe d'eau. Ceci est dû aux caractéristiques géométriques de la nappe d'eau (épaisseur faible $E_e = 2\text{cm}$) et optiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption important).

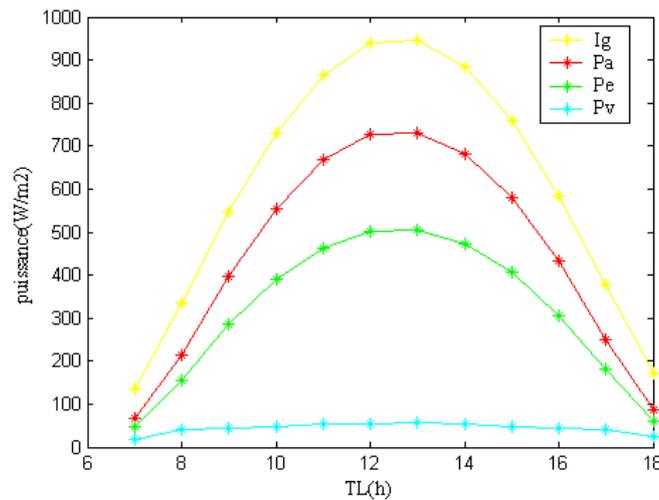


Figure 15: Variations temporelles du rayonnement global et les puissances absorbées par l'absorbeur, la nappe d'eau et la vitre

- **La variation de la température ambiante et la température du ciel :** La figure 16 présente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps. La température du ciel varie en fonction de la température ambiante, et qui ont la même allure (figure 16). Ceci peut être expliqué par le comportement de T_c par rapport T_a . Elles atteignent leurs valeurs maximales à 14h.

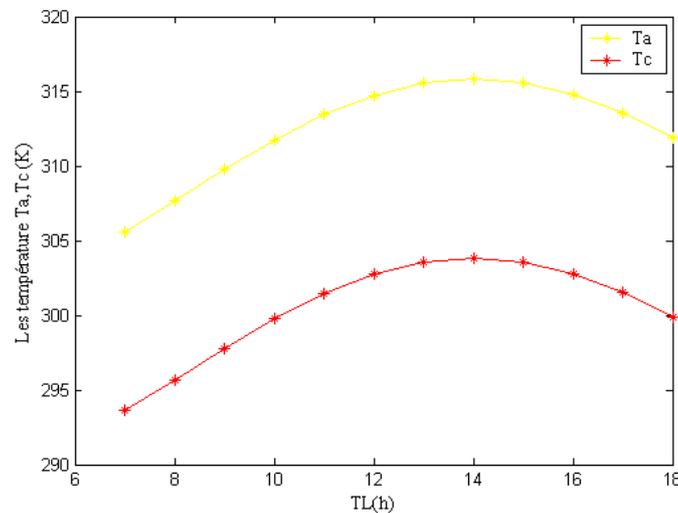


Figure 16 : Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel

La variation des températures en fonction du temps de chaque composant des deux systèmes étudiés, avec et sans aluminium est illustrée par les **figures 17 a** et **17 b**.

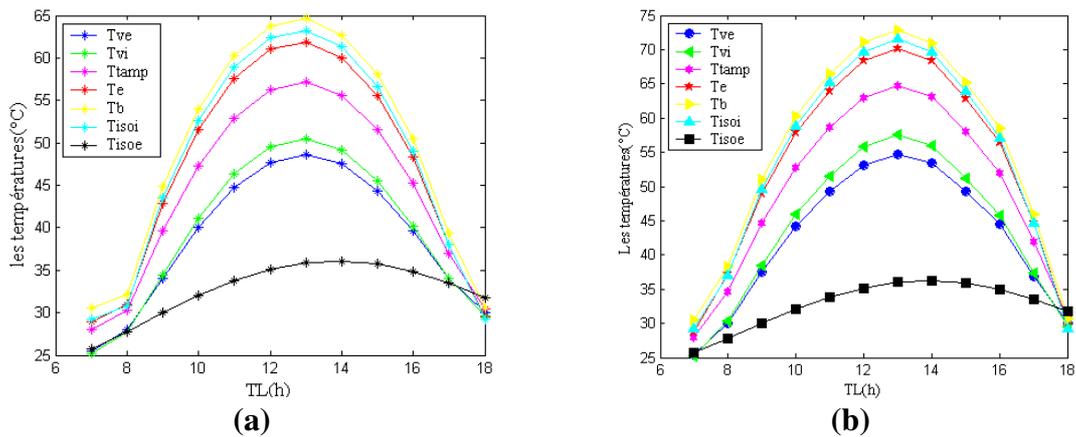


Figure 17 : Variation des températures de différents éléments du distillateur (a) sans aluminium et (b) avec aluminium

Dans la **Figure 17 a**, relative au distillateur solaire sans aluminium, nous constatons que le film absorbant et la face intérieure de l'isolant ont les températures les plus élevées : la température du film atteint une valeur maximale de 65°C, résultant de la puissance absorbée par l'absorbeur qui est importante et supérieure à celle absorbée par la saumure et la vitre. Par ailleurs l'isolant étant placé au-dessous de l'absorbant d'une conductivité thermique élevée, où la température de la face intérieure de l'isolant est importante. L'élévation des températures du vitrage intérieur et extérieur est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation et convection naturelle. La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est soumise à l'action du vent. Par absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entraînent ainsi l'élévation de sa température. La température du bac absorbant est légèrement supérieure à celle de la saumure à cause des caractéristiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption élevé). La zone tampon est le domaine de la vapeur saturée, où la température est assez élevée. On a une variation classique en forme de cloche du rayonnement solaire. L'allure de la variation temporelle de la température de chaque composant du distillateur est similaire à celle résultats qui présentés par Bilal, Mohsen, Nayfeh, concernant son étude expérimentale [2]. Qui ont trouvé une augmentation de la température de l'eau jusqu'à atteindre une valeur 63°C, même que le travail expérimental de Badran, et Tahaineh [3], qui ont constaté à des résultats similaire pour un système sans aluminium.

On observe à travers la **figure 17 b** que la variation des températures de chaque composant du distillateur à la même allure que dans le cas du système sans aluminium, sauf que les valeurs

des températures sont plus élevées. Cette augmentation montre que le rajout du réflecteur en aluminium provoque un pré échauffement de la face intérieur de l'isolant, du film absorbeur, de l'eau et la face intérieure de la vitre. Des travaux de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [4], ainsi que ceux de Badran, et Tahaineh [3], ont abouti à des résultats similaires.

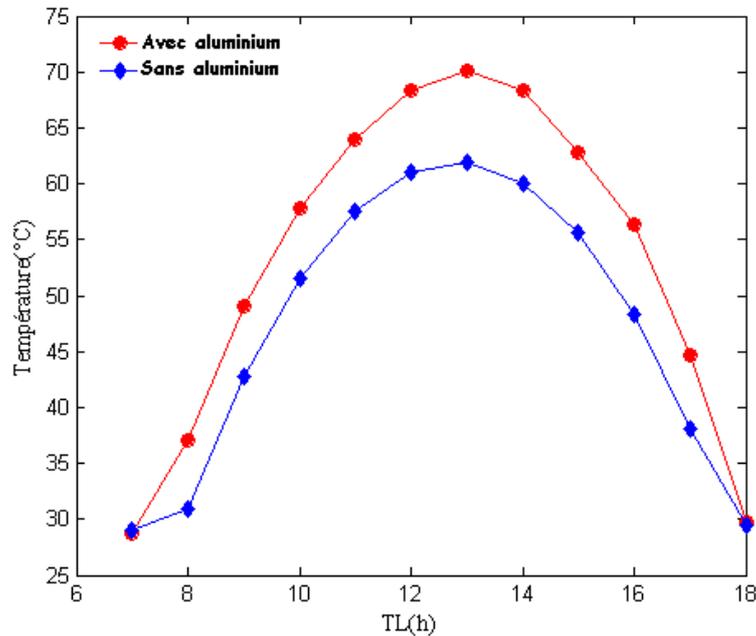


Figure 18 : Variation temporelle des températures de l'eau avec et sans aluminium

La **figure 18**, montre la variation temporelle de la température de l'eau saumâtre sans et avec aluminium. Les valeurs maximales sont 70.14°C pour le distillateur avec aluminium et de 61.84°C pour le distillateur sans aluminium. Ces résultats sont en bon accord avec le travail de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [4].

- La variation de La production du distillateur sans et avec Aluminium :

✓ En fonction du temps local : La production horaire dans les deux systèmes (distillateur plan, avec et sans aluminium) est quasi nulle pendant les premières heures de la journée (avant 8h du matin) pendant la quelles le système doit, partant de la température ambiante, atteindre sa température de fonctionnement. A partir de ce moment il apparaît une différence de la production entre le distillateur et le système couplé, qui augmente avec la croissance du rayonnement solaire pour atteindre une valeur maximale à 13h, où la production horaire du distillateur plan est de $0,57 \text{ l/m}^2.\text{h}$, alors que celle du système couplé atteint $0,86 \text{ l/m}^2.\text{h}$. par la suite cette différence décroît avec le temps solaire, qui explique que le rajout de l'aluminium augmente la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre intérieure dans le distillateur, qui a un effet direct sur l'augmentation du taux d'évaporation. Il en résulte une amélioration de la production totale de distillat. L'allure de la variation temporelle de la production avec et sans aluminium est similaire à celle résultats qui présentés par Badran, et Tahaineh [3], qui en trouve une augmentation 36%.

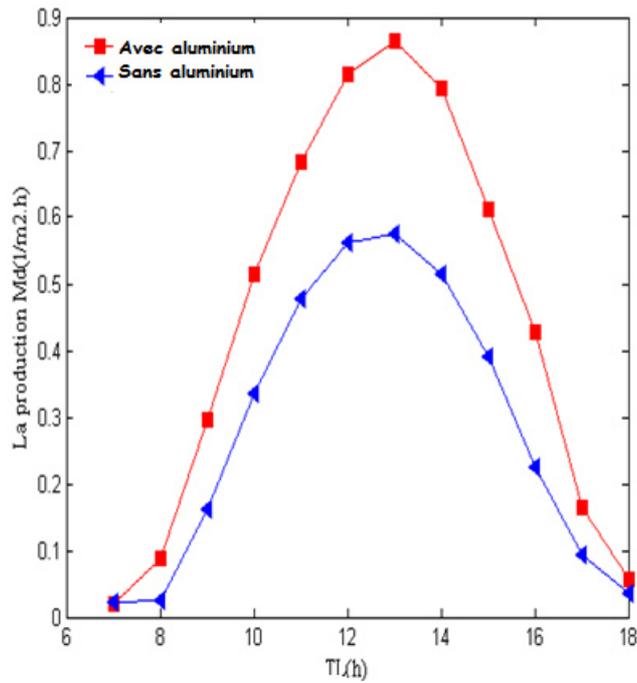


Figure 19 : la variation temporelle de la production pour un distillateur plan sans et avec aluminium

✓ L'effet de la température de l'eau sur la Production : La **Figure 20**, montre que la production augmente progressivement avec la température de l'eau. En effet cette augmentation de la température de l'eau provoque le réchauffement de l'eau à l'intérieur du distillateur solaire (surface d'évaporation), ce qui entraîne une élévation de la température de cette dernière, et par conséquent une augmentation de la condensation. Ces résultats concordent avec les résultats qui ont été obtenus par Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [5], qui ont constaté que la production augmente progressivement avec la température du préchauffage, au-delà d'une valeur approximativement égale à 85 °C, la production chute.

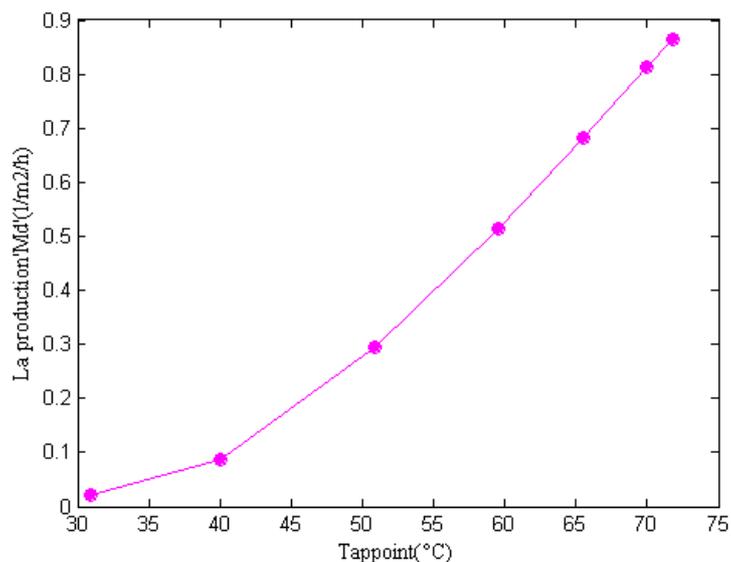


Figure 20 : La variation production en fonction de la température de l'eau

2.1.2 Distillateur solaire avec Bac + PE :

Les tests expérimentaux du distillateur solaire avec Bac + PE ont été réalisés durant le mois de Mai 2012. Pour bien expliquer ses tests, on donne tout d’abord la production journalière d’eau distillée par le distillateur solaire, puis on prendra chaque jour à part et on présentera plus d’interprétations sur les tests.

La production journalière d’eau distillée durant sept jours d’expérimentation (les jours sont numérotés de 1 à 7) est donnée par la **figure 21**.

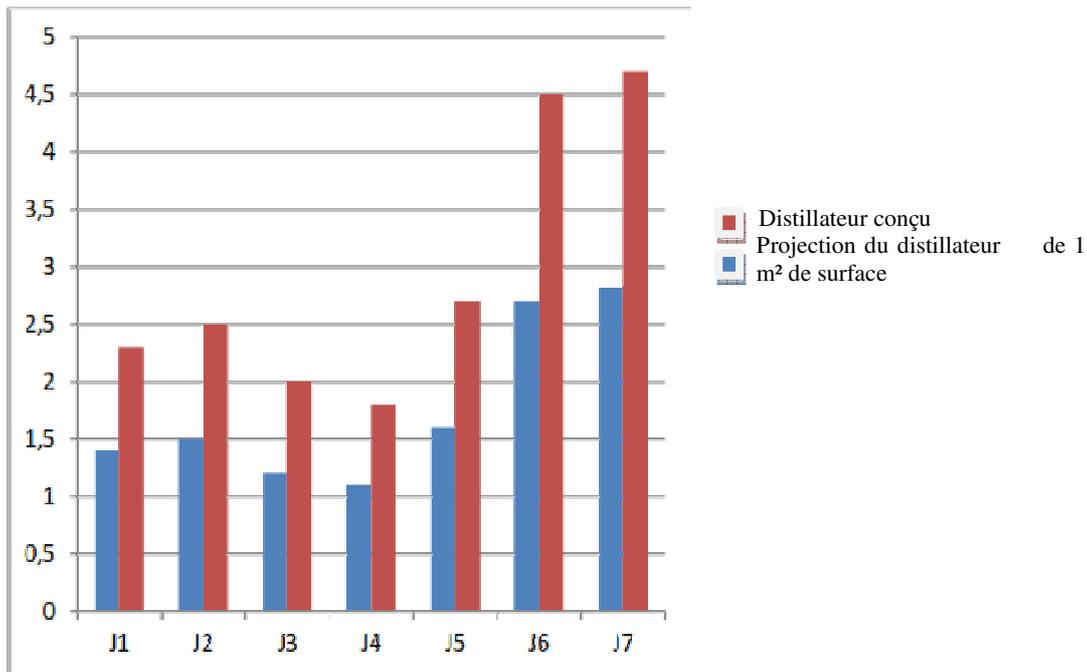


Figure 21 : Production d’eau distillée (en litre) du distillateur solaire à canaux en fonction du nombre de jours testés

L’histogramme de la **figure 21** représente la production journalière réelle d’eau distillée du distillateur solaire conçu et sa projection si la surface était de 1 m² pour pouvoir comparer avec la production d’autres distillateurs solaires dans le monde. On constate que la quantité d’eau distillée est assez importante pour ce qui est de la distillation solaire, surtout durant le 6^{ème} et 7^{ème} jour. En effet 2,82 litres (4,7 litres/m²) est une bonne production comparativement à d’autres distillateurs solaires conçus dans le monde, et surtout avec les premiers tests faits en 2011. On fait remarquer que durant tous les tests, le distillateur solaire étudié avait toujours la même position presque horizontale pour qu’on puisse l’utiliser comme Distillateur plan (stagnation de la solution dans l’absorbeur). Pour avoir plus d’interprétations sur les expériences réalisées, chaque jour va être traité à part.

- **Test du jour 1 (19/05/2012) :** On constate que la production d’eau distillée de la journée change avec le temps (**figures 22 et 23**) et qu’elle augmente d’une façon significative entre 12h 00 et 16h 00.