

Etude, modélisation et mise en œuvre des propriétés de refroidissement radiatif appliquées à la condensation de vapeur d'eau atmosphérique comme ressource complémentaire en eau potable en milieux arides et / ou insulaire

Contacts : ORTEGA Pascal\* (responsable projet U.P.F.) ; [ortega@upf.pf](mailto:ortega@upf.pf)  
Université de la Polynésie Française, B.P.6570, 98702 Faaa  
Tél. (689) 803 817  
Fax (689) 803 961

CLUS Owen\* (doctorant) ; [clus@univ-corse.fr](mailto:clus@univ-corse.fr)  
MUSELLI Marc\* (responsable projet U. Corse) ; [marc.muselli@univ-corse.fr](mailto:marc.muselli@univ-corse.fr)  
Université de Corse, UMR CNRS 6134 – Equipe Energie Renouvelables  
Vignola, Rte des Sanguinaires, 20000 Ajaccio, France  
Tél. [+33 \(0\)4 95 52 41](tel:+33(0)4955241)  
[fax : +33 \(0\)4 95 52 41 42](tel:+33(0)495524142)

BEYSENS Daniel\* (Dir. équipe CEA/CNRS ESEME) ; [dbeysens@cea.fr](mailto:dbeysens@cea.fr)  
CEA-ESEME, ESPCI-PMMH, 10, rue Vauquelin  
75231 PARIS Cedex 05  
ph: +33-(0)-1 4079 5806  
fax: +33-(0)-1 4079 4523

(\*) Membres de l' « International Organisation for Dew Utilization » (association loi 1901) pour la coordination internationale des recherches sur l'utilisation de la rosée comme ressource en eau ; contacts suivants :

Association OPUR ; 60, rue Emériau, 75015 PARIS (France)  
Mail : [opur@icmcb.u-bordeaux.fr](mailto:opur@icmcb.u-bordeaux.fr)  
ph/fax:+33-(0)1-4577-4266  
Web site : <http://www.opur.u-bordeaux.fr>

---

I. Introduction

II. Matériaux OPUR

III. Applications en Polynésie

III.1. condensation de rosée artificielle

III.2. Climatisation passive des logements

IV. Projets de développements

---

## I. INTRODUCTION

Dans les îles dites « hautes » de la Polynésie Française, c'est-à-dire montagneuses, la source d'eau potable provient principalement des nappes phréatiques qui sont alimentées par les précipitations. Malgré l'alternance d'une saison humide (de novembre à avril) et d'une saison sèche (de mai à octobre) la quantité d'eau stockée pendant la saison des pluies permet pendant toute l'année de subvenir aisément aux besoins vitaux des habitants. En revanche, dans les atolls ou « îles basses » les réserves d'eau sont faibles et souvent saumâtres et l'eau de pluie recueillie par les toits en acier galvanisé et stockée dans des citernes représente alors un complément indispensable. En période sèche, rationalisée, l'eau des citernes procure une autonomie d'environ 4 mois (en eau potable). La moyenne annuelle des précipitations cumulées est de 1571 mm pour une moyenne de 183 jours de pluie par an. Pendant la saison sèche, 341 mm sont enregistrés. Lors d'une années dite « normale », c'est-à-dire dont les précipitations sont proches de ces moyennes, les citernes suffisent à satisfaire les besoins en eau potable. Cependant, des années de sécheresse touchent la Polynésie périodiquement et la situation peut devenir critique. Il ajouter le fait que le tourisme se développe considérablement et particulièrement pendant la saison sèche. L'objet de cette étude, faite en partenariat avec l'Université de Cors et le CEA, était donc de proposer une ressource alternative d'eau potable en cas de période sèche particulièrement prononcée dans les atolls coralliens du Pacifique.

La rosée provient de l'humidité de l'air qui se transforme en eau liquide par refroidissement passif. La quantité d'eau maximale qui peut être ainsi produite est de l'ordre de  $0.7 \text{ l/m}^3$ . Les recherches sur le refroidissement radiatif appliqué à la condensation artificielle de vapeur d'eau atmosphérique ont débuté en 1995 sous l'impulsion d'un physicien du CEA, M. Beysens. Son équipe a mené plusieurs campagnes d'évaluation des ressources de rosée par la mise en place de condenseurs de mesure accompagnée d'analyses chimiques dans différents pays (France, Croatie, Polynésie Française, Australie, Inde, Brésil, Israël, Ethiopie, Arabie Saoudite). Le meilleur rendement obtenu à ce jour, une nuit à  $600 \text{ ml/m}^2$ , a été obtenu dans le désert du Néguev (Israël, précipitations annuelles cumulées de 30 à 250 mm). Le condenseur est un plan légèrement incliné et recouvert d'un film plastique. Le film plastique ou « foil » possède une aptitude à se refroidir de manière passive en émettant une forte puissance de rayonnement aux longueurs d'ondes thermiques (Infra Rouge). Le plan doit être suffisamment incliné pour écouler la rosée condensée mais pas trop pour se refroidir de façon optimal. Une orientation de  $30^\circ$  représente le meilleur compromis (Figure1).

Deux sites d'étude ont été choisis. Le premier à Tahiti (île haute) sur le site de l'Université de la Polynésie Française (dénomé « Tahiti », Fig 2a) et le second sur l'île de Tikehau (île basse ou atoll) sur l'aérodrome (Tikehau #1, Fig 2b) puis déplacé dans une zone d'habitation en bordure de l'aérodrome (Tikehau #2, Fig 2c). Tahiti représente un lieu de mesure plus « commode » car proche du laboratoire. Tikehau représente un lieu plus « réel ». Bien que situés à 310 km l'un de l'autre, les deux sites correspondent à des climats relativement différents. En effet, le relief de Tahiti modifie remarquablement le climat océanique que connaissent les atolls. Sur les deux sites des condenseurs. Le principe de notre étude repose sur la récolte quotidienne d'eau de rosée condensée sur un plan incliné de  $30^\circ$  et recouvert d'un matériau aux propriétés radiatives particulières. Les quantités d'eau récoltées sont corrélées à des mesures de température, de pression, d'hygrométrie et de vitesse et d'orientation de vent. A Tahiti, une balance électronique enregistre automatiquement la masse d'eau formée et un radiomètre permettait d'établir des bilans radiatifs entre ciel et terre.



(a) Condenseur Tahiti (1m<sup>2</sup>) et instruments de mesure

(b) Condenseur Tikehau #1 (aérodrome)

(c) Condenseur de Tikehau #2 (habitation en construction)

Figure 1 : Prototypes de mesures

Le matériel de Tahiti fut installé suite à la venue de M. Daniel Beysens et I. Milimouk en avril 2004 et les expériences de Tikehau furent montées en juin 2005 au cours d'un stage de 6 mois d'un étudiant doctorant inscrit à l'Université de Corte. Les données prises en compte pour l'analyse présentée dans ce rapport correspondent à une période s'étalant de la date d'installation des matériels jusqu'à novembre 2005.

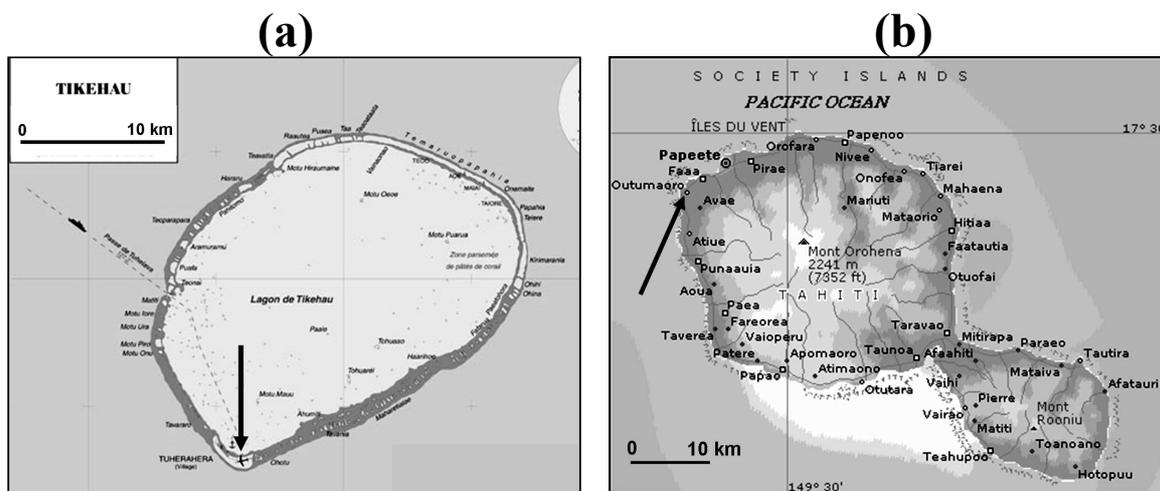
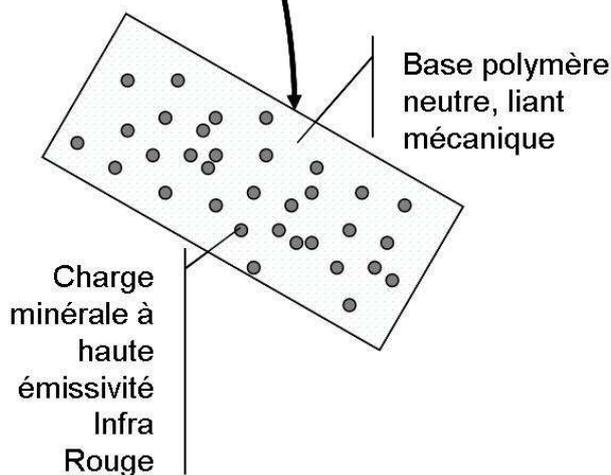
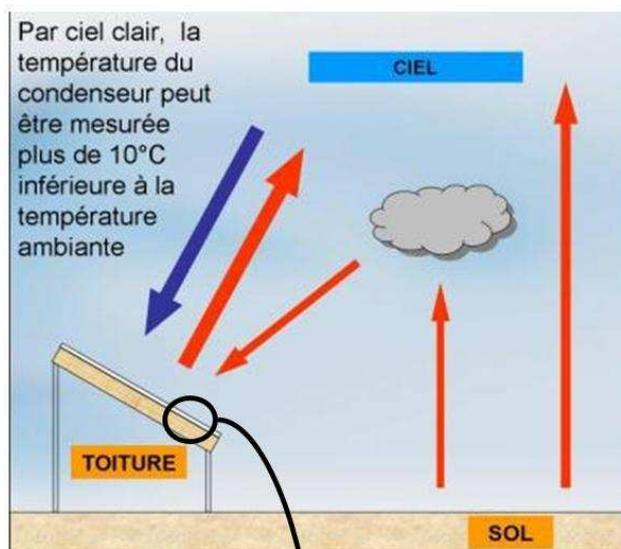


Figure 2 : localisation des sites de mesures

## II. MATERIAUX RADIATIFS OPUR

### • principe du refroidissement radiatif.

Les films et peintures développées par l'organisation OPUR (association loi 1901, coordonnées plus haut) ont pour principales caractéristiques leur faible coût et leur aptitude à se refroidir de manière passive en émettant une forte puissance de rayonnement aux longueurs d'ondes thermiques (Infra Rouge). Le refroidissement s'explique par une puissance IR émise par la toiture (source chaude) supérieure au rayonnement reçu de l'environnement (donc du ciel, source froide pour une toiture ou le sol terrestre). Il en résulte par ciel clair une perte d'énergie de la source chaude (toiture) vers la source froide (ciel). Une couverture nuageuse est donc défavorable au refroidissement radiatif.



### • matériaux développés par OPUR

Les matériaux radiatifs sont composés d'une base polymère choisie en fonction de l'application et des propriétés mécaniques souhaitées. Des charges minérales à forte émissivité en IR y sont incorporées afin de lui conférer ses propriétés radiatives.

Les matériaux doivent être mis en œuvre sur de grandes surfaces par des populations à faibles revenus et aux moyens technologiques limités. Pour les condenseurs au sol, les films produits par OPUR sont en LDPE (le plastique le moins cher du marché, utilisé entre autre pour les films agricoles). Pour l'équipement des toitures déjà existantes, une base de peinture commerciale sert de liant. Les charges minérales de formulation OPUR sont incorporées à l'aide d'un malaxeur monté sur perceuse, ce qui peut être fait sur le site même.

Toutes les charges utilisées dans les matériaux OPUR sont autorisées pour un usage alimentaire, ce qui est aussi le cas du LDPE. Pour ce qui est de la peinture commerciale, chaque description MSDS est à étudier au cas par cas en fonction du fabricant.

### III. PROCEDURE EXPERIMENTALE

#### 1. Sites expérimentaux

##### Tahiti

Tahiti est une île quasiment carrée de 30 km de côté et son centre culmine à 2200m. Le site de mesure de Tahiti est situé à Outoumaoro, sur le campus de l'Université sur la côte ouest de Tahiti, à environ 100 m d'altitude et à flanc de montagne. Le climat de Tahiti est tropical, c'est-à-dire humide et chaud et les saisons sèche et humide sont assez bien contrastées. La côte ouest de Tahiti est protégée des vents dominants que sont les Alyzées (ENE) mais reste exposée au vent saisonnier d'hivers (SE) appelé le "Mara amu".

##### Tikehau

L'île de Tikehau (Fig.1a) est un atoll, c'est-à-dire un anneau de corail qui renferme un lagon et dont le point culminant ne dépasse pas quelques mètres. Il est principalement recouvert de cocotiers. Deux sites ont été utilisés. Le premier (labellé #1) est l'aéroport de l'île choisi en accord avec le ??? qui nous avait autorisé à utiliser les services d'un agent de la sécurité du site pour faire les relevés quotidiens. L'aéroport est fortement exposé aux Alizées ce qui a considérablement atténué la production de rosée comme nous allons le détailler plus loin. Un second site, situé à 300 m du précédent, abrité du vent par une cocoteraie a été utilisé grâce au concours bénévole d'habitants de l'île. Les deux sites sont à une altitude de 0.5 m. Ici aussi, les vents dominants sont les Alizées orientés ENE aussi bien de jour que de nuit. La vitesse moyenne des vents (à 10 m du sol) est comprise entre 5 et 8 m/s pendant la nuit (Laurent et al, 2204). Ce vent est relativement constant et plus intense pendant la saison sèche.

#### 2. Les mesures

Le condenseur est un plan de 1x1m, incliné de 30°. Il est isolé thermiquement du sol par une plaque de styrofoam de 20 mm d'épaisseur et recouvert d'un film de 0.35 mm d'épaisseur fait de TiO<sub>2</sub> et de microsphères de BaSO<sub>4</sub> emprisonnées dans du polyéthylène de faible densité (identique à Nilsson, 1996; fait par OPUR, France, [www.opur.u-bordeaux.fr](http://www.opur.u-bordeaux.fr)). Le condenseur est incliné vers le nord, direction la plus "ouverte" vers le ciel. En effet, les arbres, les bâtiments sont des sources chaudes pour le condenseur. Le design d'un tel condenseur est très important et influe sur la récolte d'eau de rosée (Beysens *et al.*, 2003). L'eau de rosée est récupérée par gravité par l'intermédiaire d'une gouttière. Nous avons procédé à une mesure quotidienne de la

quantité d'eau récoltée, tôt le matin, au lever du soleil. Deux condenseurs identiques ont été installés à Tahiti et Tikehau.

### Tahiti

La masse de rosée condensée (et inévitablement de pluie) sur une plaque de référence, fixée sur une balance électronique, a aussi été mesurée. La plaque est un carré de 400x400mm de PolyTetraFluororoEthylene (PTFE ou Teflon). La balance est une balance de précision (Mettler Toledo) connectée à un PC.

Toutes les 15 minutes, à l'aide d'une station météo automatique connectée à un PC, les paramètres suivants ont été enregistrés : température de surface de la plaque de PTFE ( $T_c$ ), masse d'eau condensée ( $m$ ), température du foil ( $T_f$ ), la température de l'air ( $T_a$ ), la température du point de rosée ( $T_d$ ), l'humidité relative, la vitesse de vent ( $V$ ). Les températures sont mesurées en degrés Celsius grâce à des thermocouples et la vitesse de vent en m/s à l'aide d'un anémomètre. Enfin, la couverture nuageuse (en octa), la direction du vent et les hauteurs de précipitations ont été obtenues à la station de météoFrance de l'aéroport de Faaa situé à environ 2 km de notre site d'expérimentation.

Un exemple typique d'enregistrement est montré Figure 3. Par exemple, sur ce graphe, on peut voir que dès que la température du condenseur  $T_c$  devient inférieure à la température de rosée  $T_d$ , la balance détecte les premiers grammes d'eau condensée avec une pente de  $5 \cdot 10^{-2}$  mm/h. Au matin, quand  $T_c$  devient supérieur à  $T_d$ , on observe alors une pente négative de la courbe des masses. Les nuits de pluie sont détectées par une croissance de la courbe  $m$  trop importante. Les données exploitées correspondent à la période allant du 8/6/2005 au 14/9/2005.

### *Tikehau*

Chaque jour, à 7h30 si possible, les données suivantes étaient enregistrées: Température de l'air, vitesse de vent, direction du vent, couverture nuageuse. Ces paramètres ont été relevés par des personnes volontaires de l'île. Précipitations, humidité et vitesse de vent sont fournies par MétéoFrance qui possède une station météo dans un atoll voisin situé à 63 km. Compte tenu de la platitude des atolls, on peut considérer que les paramètres atmosphériques sont sensiblement les mêmes dans les deux atolls. Les données ont été recueillies entre le 21/6/2005 et le 07/10/2005.

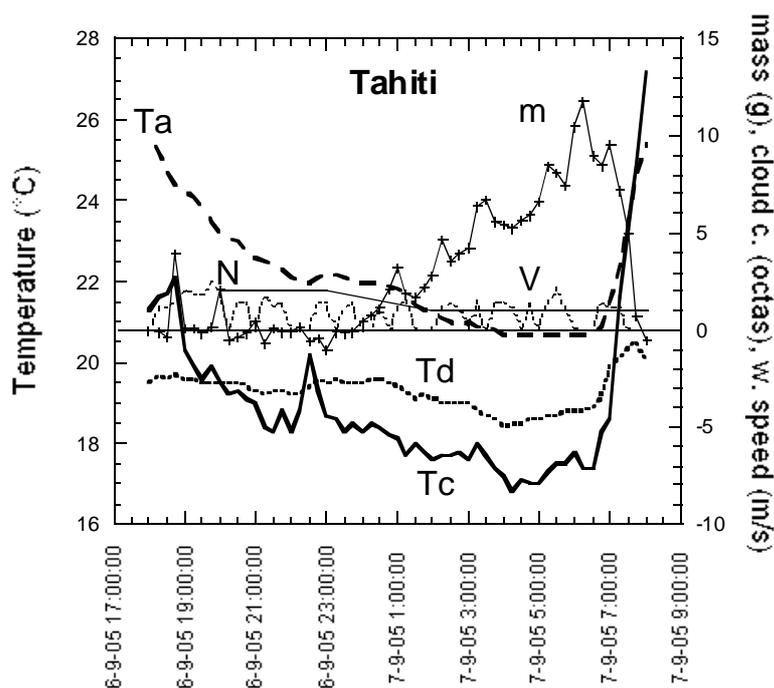


Figure 3 : Exemple d'enregistrement:

Axe gauche : — Temp.e de la plaque Tc; . . . Temp. ambiante; - - - Temp. De rosée  
 Axe droite: + masse de rosée (g); — couverture nuageuse (octas); - - - vitesse de vent (m/s)

#### IV. Résultats expérimentaux

La figure 4 montre les enregistrements de rosée et de précipitation sur la période d'étude à Tahiti et Tikehau. Quelques statistiques sont données Table 1. Tout d'abord il faut constater que nous avons vécu une saison particulièrement humide (pour une saison sèche) en nombre de jour et en quantité d'eau. Les récoltes d'eau de rosée supérieures à 0.2 mm/nuit (1 mm d'eau sur une surface de 1m<sup>2</sup> représente 1 litre) sont rares aussi bien à Tikehau qu'à Tahiti. C'est bien inférieur aux autres sites. Par exemple : 0.42mm/nuit en Corse, 0.6mm/nuit in Jerusalem (Mileta et al, 2004). En revanche, les mesures de Tahiti montrent une fréquence importante de jour de rosée : 53.5% de jour de rosée contre 33% en Corse (Beysens et al, 2005) mais avec une récolte moyenne par nuit de seulement 0.068mm. Ainsi, à Tahiti, les évènements de rosée sont fréquents, réguliers mais moins productifs qu'en Corse par exemple. En données cumulées, la quantité d'eau est plus importante à Tahiti : 5.58mm à Tahiti contre 3.5mm en Corse pendant une période et saison comparables (8.43mm sur l'année en Corse).

A tikehau, sur le site #1, la récolte d'eau de rosée est pauvre (Juin-Juillet). En revanche, sur le site #2, utilisé d'août à novembre, la récolte est nettement meilleurs et plus fréquente.

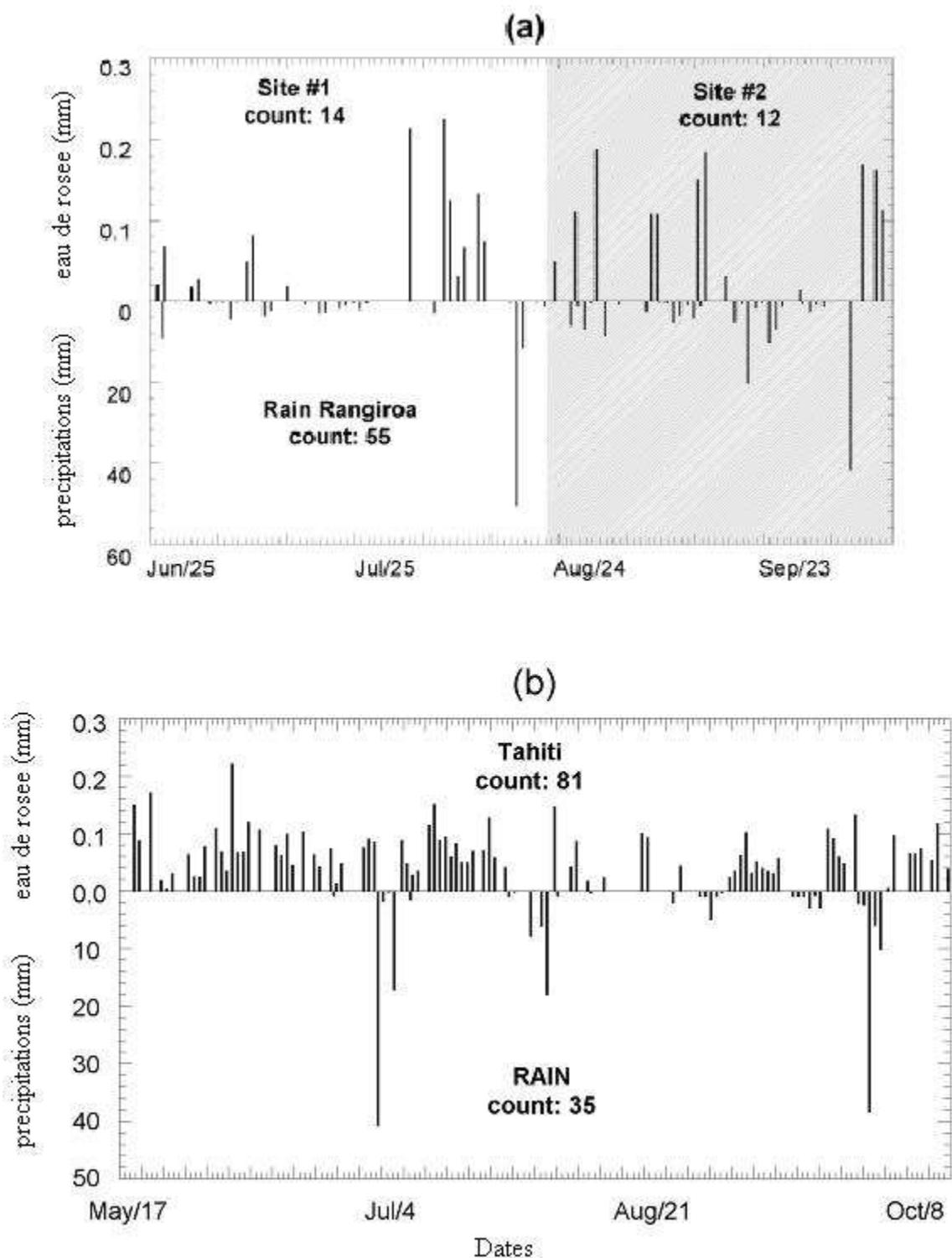


Figure 4 : évolution des récoltes de rosée et d'eau de pluie  
 Ordonnées positives : eau de rosée; Ordonnées négatives : précipitations  
 (a) Tikehau sites # 1 et # 2. (b) Tahiti

	Tikehau 1 & 2 21/6/2005–7/10/2005 109 days	Tahiti 16/5/2005 – 14/10/2005 151 days
Précipitations (cumulées, mm)	247.8	176.2
Rosée (cumulée, mm)	2.64	5.58
Rosée / pluie (%)	1.09	3.17
Minimum de rosée (mm)	0.013	0.004
Maximum de rosée (mm)	0.23	0.22
Moyenne de rosée par évènement (mm/nbre d'évènements)	0.102	0.068
% d'évènement rosée (tous les jours)	23.9	53.5
% d'évènement rosée (sans jours de pluie)	38.8	69.8

Table 1 : Statistiques sur le potentiel en récolte d'eau de rosée à Tahiti et Tikehau

La figure 5 montre l'histogramme du nombre d'évènements pour une récolte donnée. On peut voir que les évènements les plus fréquents ne sont pas les plus importants.

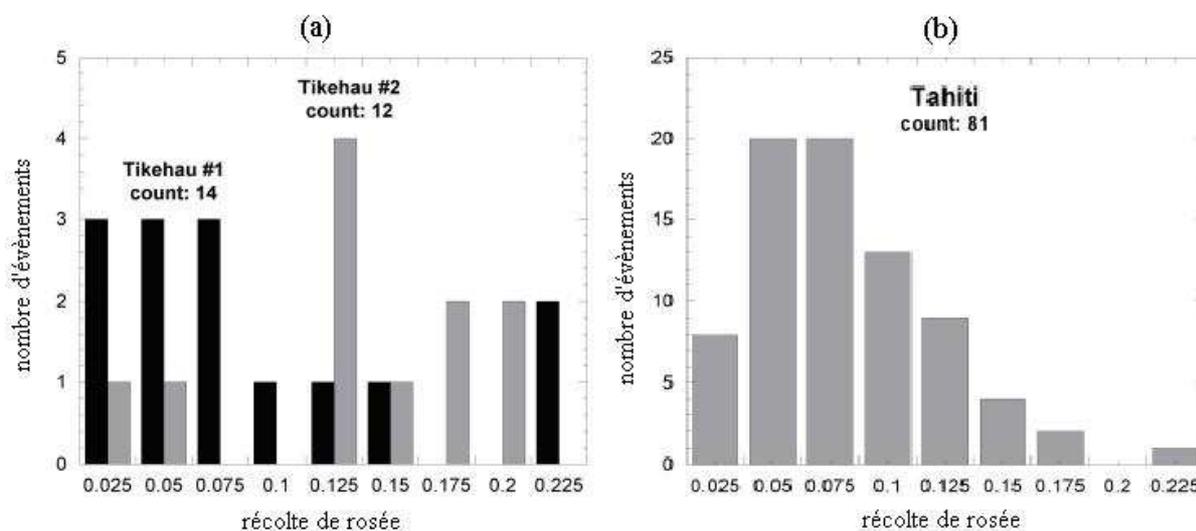


Figure 5 : Distribution du nombre d'évènements en fonction de la rosée récoltée

## V. ANALYSES DES DONNEES DE TIKEHAU

### 1. Bilan radiatif et position du condenseur

Le site #1 de l'aéroport a été choisi pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit d'un site ouvert, offrant donc un transfert radiatif optimal vers le ciel. D'autre part, les mesures nécessitent une intervention humaine quotidienne. Ce travail a pu être correctement fait grâce à la collaboration du service de ?? qui a mis à notre disposition un agent de sécurité de l'aéroport. Cependant, la piste d'atterrissage est très fortement exposée aux alyées qui soufflent régulièrement. Nous nous sommes alors rendu compte que ces vents étaient très défavorables à la production de rosée. La figure 4a fait clairement apparaître que durant cette période (26/6/2005 – 8/8/2005) seulement 4 évènements supérieurs à 0.1 mm ont été enregistrés. Ils correspondent à des journées avec faible vent (vitesse inférieure à 2.5 m/s) ce qui est rare dans cette saison comme le montre la Figure 6. Cette figure concerne un atoll voisin, dont les conditions météorologiques sont très proches. De 20:00 à 7h00, les moyennes de vitesse de vent s'élèvent à 5.48 m/s avec un écart type de 3.2 m/s et le pourcentage de vitesse de vent inférieure à 2.0 m/s est de 9.8%. Muselli et al (2002) ont montré qu'une vitesse de vent supérieure à 3.0 m/s nuisait de façon significative à la production de rosée.

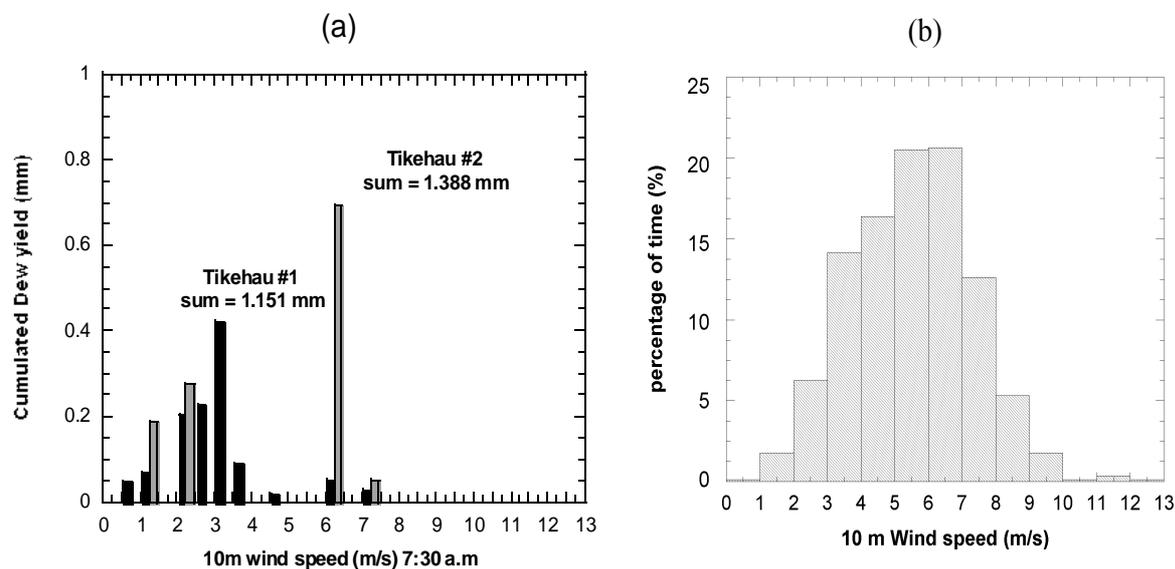


Fig.6. (a) Récolte de rosée cumulée à Tikehau en fonction des vitesses de vent

Site #1: barres noires; site #2: barres grises

(b) Distribution des vitesses de vent de nuit, sur 5 ans, en période sèche à l'aéroport de Rangiroa are reported. (20:00 - 07:00, May -October, 2001-2005).

En conséquence, il a été décidé de déplacer le condenseur vers un endroit plus abrité du vent. Nous avons profité de l'intérêt que portait certains habitants de l'île à notre étude pour les mettre à contribution. Le jardin d'une propriété proche de l'aéroport, grande de 44m sur 43m, entouré de cocotiers donc abrité du vent nous a été généreusement proposé. C'est une situation très représentative des propriétés courantes des « Paumotu » (habitants de l'archipel des Tuamotu). Au sein de la propriété, l'emplacement fut soigneusement choisi. En effet, en ayant toujours le souci d'offrir une exposition la plus dégagée possible du condenseur, les cocotiers d'un côté et la maison de l'autre pouvaient par leur taille réduire le refroidissement radiatif du condenseur. Pour optimiser le refroidissement radiatif nous avons évalué le bilan radiatif à l'aide d'un modèle développé par O. Clus (Clus et al, 2006). On procède à l'intégration sur une hémisphère du bilan radiatif calculé sur un angle solide élémentaire par pas de 1 degré et pour la configuration de la figure 7. L'intensité élémentaire du rayonnement du ciel pour un angle solide  $d\Omega$  est donné par les Equations 1 et 2 (Berger et al., 2001):

$$dIR_{\Omega} = \varepsilon_{\theta} \cdot \sigma \cdot T_a^4 \cdot d\Omega / \pi \quad (1)$$

avec

$$\varepsilon_{\theta} = 1 - (1 - \varepsilon_{total})^{1/(b \cos\theta)} \quad (2)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_a$  la température ambiante mesurée au sol (fixée à 88 K pour la simulation) et  $\varepsilon_{total}$  est l'émissivité relative du ciel estimée ici à 0.8 pour une humidité relative de 80% RH (Nikolayev et al., 2001). L'émissivité angulaire  $\varepsilon_{\theta}$  est donnée par l'Equation 2 où  $\theta$  est l'angle par rapport à la verticale et  $b = 1.66$  (Berger et al., 2001). L'émissivité angulaire est supposée égale à 1 si un obstacle (arbre ou maison) intercepte l'angle solide élémentaire  $d\Omega$  entre condenseur et ciel. Le condenseur est considéré comme un corps noir d'émissivité 0.94 (Nikolayev et al., 2001) pour le calcul de la radiation dans l'angle solide  $d\Omega$ . Pour le calcul des puissances reçues et dissipées par la surface du condenseur une correction est appliquée pour chaque angle solide  $d\Omega$  pour tenir compte de l'inclinaison de 30° du condenseur.

La figure 6a schématise l'aire considérée. La rangée de cocotiers au Sud, à l'ouest et au nord font approximativement 6m de haut. A l'est, ils atteignent 8 m de haut. La maison peut être négligée devant les arbres qui sont dans sa direction. Le bilan radiatif est calculé pour plusieurs positions du condenseur (C) le long de l'axe des X situé à 22 m du côté sud. La position X = 13.5m correspond au refroidissement maximum, -77.75 W/m<sup>2</sup>. On peut voir sur la figure 6b que cette valeur varie peu pour X variant de 10 à 30m.

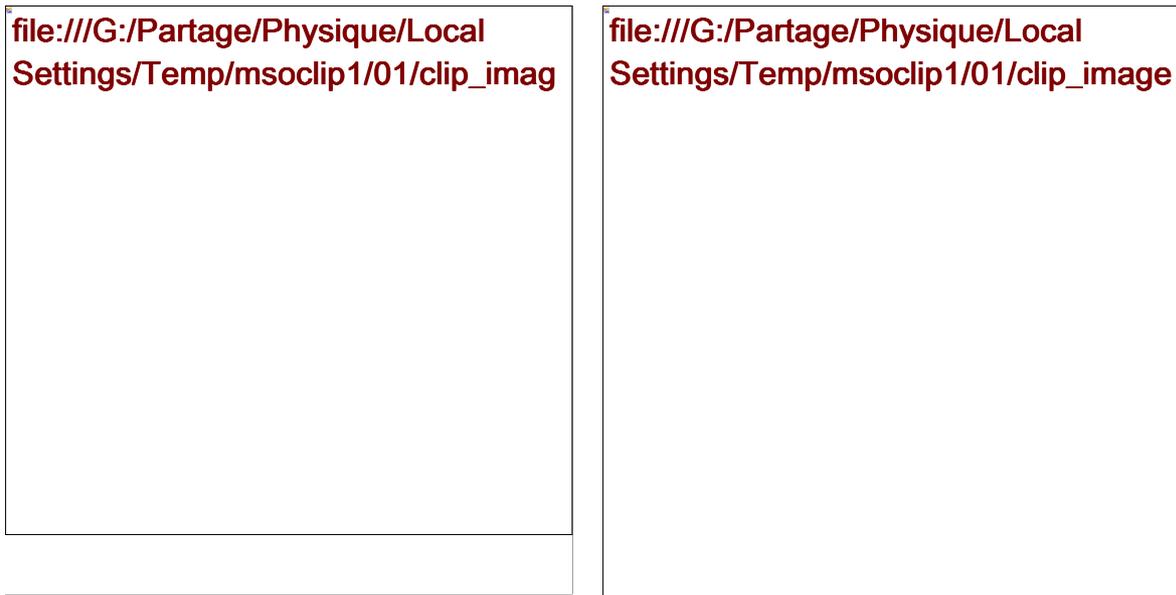


Fig. 7 : (a) schéma de l'emplacement du condenseur de Tikehau site #2  
cercles : cocotiers de 8 m; ellipses : cocotiers de 6 m; C : condenseur  
(b) : Simulation du bilan radiatif en fonction de la position du condenseur

## V.2. Vitesse de vent

### Vitesse de vent

La figure 6 montre la rosée récoltée dans les 2 sites en fonction de la vitesse du vent. L'influence du vent a déjà été discuté puisqu'elle nous a conduit à déplacer le condenseur. On peut maintenant observer qu'à l'abrit du vent le condenseur sur le ste #2 peut fournir une quantité importante de rosée malgré des vents dont la vitesse peut atteindre 7 m/s. Alors que sans protection, aucune récolte de rosée n'est envisageable pour des vent de vitesses supérieures à 4 m/s.

## V.3. Couverture nuageuse

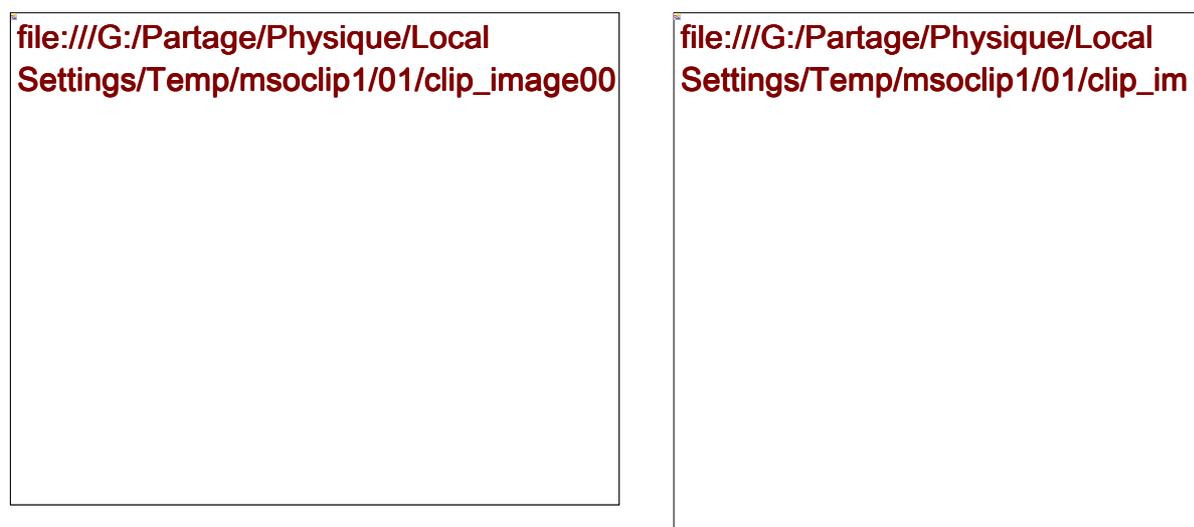


Fig.8 (a) rosée cumulée récoltée en fonction de la nébulosité à Tikehau

barres noires : site #1; barres grises : site #2

(b) distribution de la couverture nuageuse

La figure 8b montre la distribution de la couverture nuageuse (à 7:30). Elle est quantifiée de la manière suivante : le ciel est divisé en 8 secteur et on note le nombre d'octas contenant des nuages. On peut voir qu'elle varie entre 1 et 7 (ciel bleu est une configuration très rare). Au site #1, de la rosée n'est récoltée que pour un ciel dégagé (< 3 octas).



Fig.8. (a) rosée récoltée à Tahiti en fonction des vitesses de vents moyennées chaque nuit sur la durée de la condensation.

(b) distribution des vitesses moyennes de vent (moyenne faite entre 20:00 et 8:00)

## VI. ANALYSES DES DONNEES DE TAHITI

### VI.1. Vitesse de vent

La récolte de rosée par nuit sur le foil est montrée Figure 8a en fonction de la vitesse de vent pour la période allant du 08/06/2005 au 14/10/2005. La vitesse de vent est moyennée sur la durée de la phase de condensation de chaque nuit, c'est-à-dire lorsque  $T_c < T_a$ . La situation du site, abritée des alyzées, fait que les valeurs de vitesse de vent sont faibles. (79% des données sont inférieures à 1 m/s).

La meilleur récolte d'eau de rosée se produit pour une vitesse de vent de 0.7 m/s qui est une vitesse courante. La fréquence élevée des événements de rosée (69.8 % des jours sans pluie) comparée à celle de Tikehau (38.8%, voir Table 1) doit être attribuée aux faibles valeurs de vitesses de vent.

### VI.2. Couverture nuageuse

A Tahiti, la meilleur récolte est obtenue pour  $N \leq 2$  octas (Figure 9a). La couverture nuageuse est moyennée chaque nuit sur la période de condensation. Cependant, peu d'évènements sont concernés. La distribution de couverture moyenne est similaire que celle enregistrée à Tikehau (Figure 9b). Le grand nombre de nuit avec un ciel couvert ( $> 2$  octas) explique la quantité relativement faible d'eau de rosée récoltée à Tahiti par rapport aux sites méditerranéens (Mileta *et al.*, 2004). Ceci reflète le fait que les tropiques sont plus humides et produisent fréquemment de la rosée mais en faible quantité à cause de la couverture nuageuse. En revanche la situation des tropiques est comparable aux sites océaniques (Bordeaux, Beysens *et al.*, 2005). Les mesures de radiométrie confirmeront cette conclusion.



Fig 9 : rosée récoltée à Tahiti en fonction de la couverture nuageuse moyennée chaque nuit sur la durée de la condensation (08/06/2005 - 14/10/2005)

(b) distribution de la couverture nuageuse moyenne (moyenne faite entre 20:00 et 8:00)

On peut remarquer que des évènements de rosée sont enregistrés à Tikehau pour des couvertures nuageuses plus grandes qu'à Tahiti. Cette différence ne peut pas être attribuée à une variation d'humidité qui est sensiblement la même sur les 2 îles (moyenne de 81% à Tahiti contre  $\approx 79.5\%$  à Tikehau). La raison ne peut venir que du site lui-même qui semble moins favorable à Tahiti en raison de l'environnement "chargé" du site de l'Université (bâtiments et végétation proche du condenseurs).

### VI.3. Humidité relative et température de rosée

L'humidité relative semble être le paramètre clé pour la formation de rosée. Une grande valeur de RH correspond à une faible différence  $T_d - T_a$  et donc nécessite un faible refroidissement. La Figure 10 montre la corrélation entre formation de rosée et  $T_a - T_d$ . Les quantités de rosée formées sur la plaque de PTFE (sur la balance) et le foil sont reportées. Pour comparaison, le même graphe obtenu en Corse pour un même condenseur est donné. Quasiment toutes les données sont regroupées sous une droite d'équation:

$$h = h' [(T_a - T_d) - \Delta T_0] \quad (3)$$

où  $\Delta T_0$  correspond à une température maximale de refroidissement et  $h'$ , un taux moyen de formation de rosée (mm/K). La position des données sous cette droite exprime que  $T_a - T_d$  (ou RH) est le paramètre dominant qui limite la formation de rosée. Bien sûr, comme nous l'avons vu, d'autres paramètres comme, le vent ou la couverture nuageuse sont importants mais ils modifient la quantité de rosée sans jamais dépasser la limite définie par cette droite.

La valeur de  $\Delta T_0$  reste constante qu'il s'agisse du PTFE (-4.3K) ou du foil (-4.7K). Elle correspond à une valeur d'humidité relative de 75% environ. Le taux de formation  $h'$  est de 0.060 mm/K (PTFE) ou de 0.063 mm/K (foil). En Corse, les résultats sont très différents puisqu'on obtient  $\Delta T_0 = -10.3$  K ( $RH \approx 51\%$ ) and  $h' = 0.035$  mm/K. La puissance de refroidissement et le taux de formation de rosée sont presque 2 fois plus grands en Corse. On peut également noter qu'aucun évènement de rosée n'est enregistré à Tahiti pour  $T_a - T_d < 1.5 - 2$  K alors qu'en Corse, c'est précisément pour ces valeurs que les récoltes sont les meilleurs. La raison de cette différence entre les 2 types de climats provient de l'humidité relative comme nous allons le voir dans la suite.

Figure 10 : récolte de rosée en fonction de  $T_a - T_d$  (abscisse du bas) ou RH (abscisse du haut)

(a) Tahiti, PTFE; (b) Tahiti, foil; (c) Corse, foil;

Les valeurs max de récolte sont reliées par pas de 1K. Le segment représente le meilleur fittage de ces courbes.

## VII. DISCUSSION

Le climat tropical de la Polynésie française a donc révélé des aspects particuliers concernant la collection de rosée : effet important des alizées et forte humidité absolue.

### VII.1. Vitesse de vent et humidité relative

La comparaison des récoltes de rosée dans les 2 sites de Tikehau ont confirmé que le vent était néfaste à la production d'eau à partir de la rosée. Le vent a 2 effets sur la condensation.

Le premier est de favoriser les échanges thermiques avec l'air ce qui entraîne un réchauffement du foil. Ainsi, la vitesse moyenne de vent de 5,46 m/s enregistrée à l'aéroport était trop importante pour permettre un refroidissement suffisant pour une bonne condensation (Fig.6). En revanche, le second site abrité du vent par des cocotiers a permis une meilleure condensation sur le foil. Les cocotiers protecteurs (dans la direction du vent) sont au nombre de 12, hauts de 5 à 8 mètres et sont espacés d'environ 4-5 mètres. Cette structure est comparable aux paravents perméables utilisés en agriculture (Guyot, 1972, 1987, 1999). D'après cet auteur, ce type de paravent perméable avec une porosité supérieure à 25% est efficace dans la mesure où il protège du vent sans créer de perturbation, c'est-à-dire en laissant à l'écoulement du vent une structure laminaire.

Le deuxième effet du vent est son influence sur l'humidité des basses couches atmosphériques. L'atmosphère tropicale est très humide en valeur absolue, bien plus que dans le pourtour méditerranéen (colonne de vapeur d'eau de 50 mm contre 16 mm dans le bassin méditerranéen). A cette humidité absolue correspond une forte humidité relative et une variation diurne assez faible. Par exemple, mesurée sur 5 ans à Rangiroa (atoll voisin de Tikehau) pendant la saison sèche l'hygrométrie moyenne est de 77.4% pendant la journée contre 70.39% le jour. Les vitesses moyennes de vent enregistrées (5.46 m/s) font que la couche atmosphérique au niveau du sol (jusqu'à 15 m).

The high wind speed value (5.46 m/s) ensures that the surface atmospheric layer (close to the ground) is well mixed and that the temperature profile close to the ground (in the first 15 m layer) is adiabatic (Guyot, 1999). In such conditions,  $RH$  is quite independent of  $V$ . High  $V$  can thus correspond to high  $RH$  and significant dew yields can be found even with high wind speed if the condenser is correctly protected. In Fig. 11a is plotted the mean relative humidity  $\langle RH \rangle$  with respect to mean windspeed  $\langle V \rangle$  during the clear nights only (mean cloud cover  $\langle N \rangle \leq 2$ ) at the Faaa (Tahiti) meteorological station (2001 - 2005). Selecting the clear nights excludes in

a simple way rain and storms events. It shows that significant  $\langle RH \rangle$  ( $> 70\%$ ) can be maintained for  $\langle V \rangle$  up to 7.5 m/s (10 m elevation).

## VIII. APPLICATIONS

De tels matériaux mettent donc en jeu un phénomène naturel pour limiter leur échauffement de jour et de se refroidir de manière importante la nuit (cela s'observe par exemple à une échelle moindre sur les pare-brise de voiture). Deux applications peuvent tirer profit de ces propriétés, la condensation de vapeur d'eau atmosphérique et la climatisation passive de bâtiments.

### 1. Condensation de rosée artificielle

Le plus souvent dans les Tuamotu, l'humidité relative de nuit est supérieure à 80% (Atlas de Météo France). Dans ces conditions, toute surface inférieure de 3,2°C à la température ambiante se couvre de condensation. Sur un condenseur radiatif, ce refroidissement s'obtient souvent dès que le rayonnement ne frappe plus directement la surface, ce qui permet d'amorcer la condensation de rosée artificielle vers 18 ou 19h avant même la tombée du jour. Pour l'étude en Polynésie Française, deux sites ont été instrumentés de mai à novembre 2005 :

- le premier à l'UPF (dénomé Tahiti) comprenant un condenseur (1m<sup>2</sup>), des capteurs météo locaux ainsi qu'un double radiomètre Visible – Infra Rouge pour la compréhension des bilans radiatifs diurnes et nocturnes en atmosphère tropicale.
- Le deuxième sur l'atoll de Tikehau (dénomé Tikehau) où un condenseur de 1m<sup>2</sup> a été installé sur l'aérodrome (site #1) puis déplacé dans une zone d'habitation en bordure de l'aérodrome (site #2).



*Condenseur Tahiti (1m<sup>2</sup>) et instruments de mesure*



*Condenseur Tikehau #1 (aérodrome)*



*Condenseur de Tikehau #2 (habitation en construction)*

- **Estimations chiffrées**

La saison sèche 2005 s'étant montrée très pluvieuse, nous exprimerons les résultats obtenus pour les jours « secs », sous entendu sans événement de pluie. Les valeurs obtenues en Polynésie montrent une fréquence élevée en jours de rosée (68% et 59% des jours « secs » pour L'UPF et Tikehau 2 respectivement). Les maxima observés à Tikehau sont en revanche plutôt faibles, en raison certainement d'une couverture nuageuse importante sur la courte période de mesures dans la zone d'habitation (du 18/08 au 11/09). Ces estimations tiennent compte des propriétés de surface hydrophiles de la peinture OPUR qui permettent un recouvrement par gravité (donc en sortie de gouttière) de 92% du volume total condensé. L'usage d'un matériau hydrophobe peut réduire cette quantité à 10 - 20 % ce qui rendrait le système inopérant.

- **Validité des estimations pour une application réelle**

L'emplacement de l'aérodrome, totalement dégagé, ne s'étant pas avéré suffisamment représentatif des conditions rencontrées au village (planté de cocotiers), un deuxième emplacement a été instrumenté. La période considérée pour faire l'estimation s'est avérée pluvieuse (50% de jours avec précipitations), présentant une nébulosité moyenne au matin (4.8



*condenseur de Biševo (15 m<sup>2</sup>)*

bien supérieure aux données moyennes de Takaroa (<3.0). Il est donc probable que pour une année de sécheresse (par exemple l'année 2004), des événements de rosée aient une intensité largement supérieure (plus du double observé en Croatie). Les données météorologiques des quatre dernières années à Rangiroa vont être prochainement analysées afin d'évaluer cette déviation attendue. De même, une saison de grande sécheresse devrait se rapprocher des conditions observées du 15 mai au 25 juillet sur le site de l'UPF avec plus de 80% de jours de rosée.

Ensuite, l'équipement d'un toit de tôle peut entraîner un abaissement des rendements car contrairement aux condenseurs réalisés jusqu'à présent, il n'est pas isolé thermiquement sur sa face inférieure. Il est difficile de chiffrer le préjudice en terme de volume, mais la valeur haute du point de rosée en Polynésie (humidité souvent supérieure de nuit à 85%) devrait stabiliser la toiture en phase de condensation aux environs de 3°C en dessous de la température ambiante. L'écart étant faible, l'apport de chaleur par la face inférieure (conduction) doit être relativement limité, d'autant plus que la tôle nue réfléchira une part importante (près de 80%) du rayonnement Infra-Rouge qu'elle reçoit du sol. Nous pouvons donc raisonnablement proposer une appréciation suivante de volumes pour un mois de grande sécheresse:

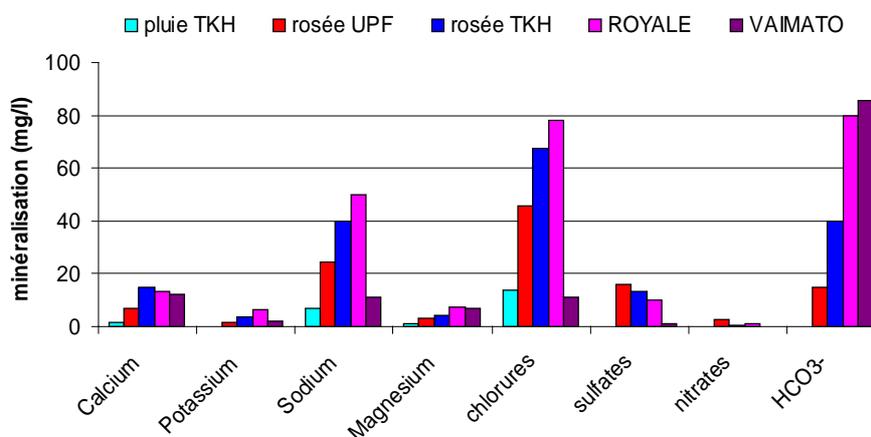
paramètre	Estimation fare MTR 54m <sup>2</sup> à Tikehau avec peinture OPUR	données expérimentales toiture Croatie (14/04-10/08)
surface développée en toiture	92 m <sup>2</sup>	15,36 m <sup>2</sup>
<Vol rosée> moyen par nuit de rosée pour 92 m <sup>2</sup>	10,90 litres	11,82 litres
Vol rosée maximal pour 92 m <sup>2</sup>	15,71 litres	36,05 litres
<Vol rosée> moyen pour 30 jours secs pour 92 m <sup>2</sup>	191 litres (6,40 l/jour)	279 litres (9,30 l/jour)

*Estimation des volumes attendus sur un fare MTR de 54m<sup>2</sup> équipé, comparé avec une toiture expérimentale existante (Croatie)*

- un minimum incompressible de **150 l/mois**, hypothèse pessimiste mais qu'il ne faut pas exclure si l'on veut équiper une habitation polynésienne en l'état et se contenter de la peindre.
- Une valeur comprise entre **250 et 300 l/mois** serait plus probable dans le cas de conditions météorologiques de sécheresse avérée (analyse des données météorologiques à faire prochainement).
- Des valeurs supérieures peuvent être envisagées en raison de la fréquence importante des événements de rosée observée en Polynésie. D'autant que les données d'insolation diurne observées à Takaroa ces trente dernières années laissent supposer une nébulosité nocturne bien inférieure à celles rencontrées à Tikehau lors de ces mesures.

### • Analyse des eaux de rosée

Des analyses chimiques et biologiques ont été effectuées sur des eaux de pluies et de rosée de l'UPF et de Tikehau (plus de vingt échantillons de rosée considérés dans chaque cas). L'eau de rosée, d'origine atmosphérique s'enrichit des matières minérales déposées sur



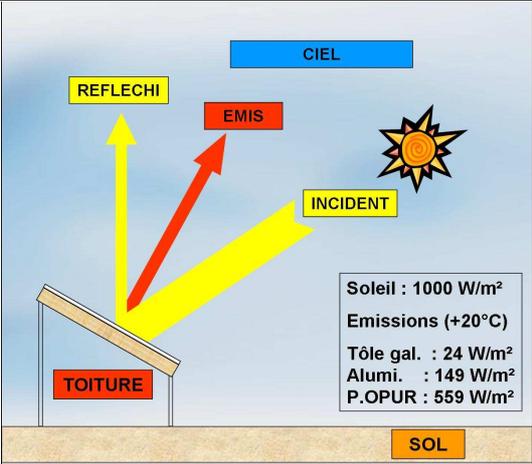
le condenseur qu'elle dissout. Ceci lui donne une minéralisation qui se rapproche de celle des eaux de source de Tahiti. Le graphique suivant montre que pour les ions majeurs, Calcium, Potassium, Sodium Magnésium, Chlorures et Sulfates, la minéralisation des eaux de rosée est du même ordre de grandeur que celle des eaux largement consommées sur le territoire. Bien souvent, les concentrations se trouvent même comprises entre celles de l'eau Royale (plus minéralisée) et celle de l'eau Vaimato (moins minéralisée), si l'on en croit les valeurs annoncées. La rosée de Tikehau est légèrement plus minéralisée (dépôts d'aérosols marins et de  $\text{CaCO}_3$  issu des dépôts de résidus calcaires coralliens). Bien que concentrée en nitrates, la rosée de l'UPF reste cependant bien en deçà des 25mg/l autorisés (long terme). Des comptages de la flore biologique totale revivifiable à 22 et 36°C montre qu'il est préférable de chlorer ou faire bouillir l'eau avant consommation. L'analyse de l'eau de pluie montre bien une très faible minéralisation des eaux consommées actuellement dans les Tuamotu, phénomène qui a dû s'accroître avec l'avènement des citernes plastiques.

### III.2. Climatisation passive des logements

Si la nuit un matériau radiatif abaisse sa température, de jour, le même matériau va fortement limiter son échauffement. La figure ci-contre montre que l'échauffement d'un matériau est proportionnel au bilan des puissances reçues et évacuées par la toiture. Par exemple, la peinture OPUR chauffée à 47,1°C (soit 20°C de plus que la température moyenne mesurée à Rangiroa sur trente années), émettra 559 W/m<sup>2</sup> en rayonnement infrarouge. A comparer à un ordre de grandeur de 1000 W/m<sup>2</sup> reçus du soleil en rayonnement visible. Dans les mêmes conditions, une tôle galvanisée neuve n'émettra que 24 W/m<sup>2</sup>.

Une méthode simplifiée est proposée par une équipe de recherche américaine le « Heat Island Group » afin d'estimer et de comparer les températures maximales obtenues par différents types de toiture pour une énergie solaire reçue de 1000 W/m<sup>2</sup>. Nous prendrons une température ambiante de 27°C, proche de celle de Rangiroa.

*Estimation des températures maximales atteintes par différents matériaux (Les valeurs données*



Description			
Acier galvanisé neuf			
Peint. rouge brique, 2 couches			
ciment brut, fibrociment			
Peint. blanche commer.2cou.			
Peint. OPUR blanche 2cou.	0,82	0,96	28,7
Peint. OPUR Incolore/acier galv.	0,6	0,96	31,8
Film OPUR Polyéthylène	0,85	0,94	28,3

*pour les matériaux OPUR sont indicatives).*

Le coût des charges minérales utilisées dans les produits développés (films et peintures) est théoriquement inférieur au coût du liant polymère. Donc à terme, le prix ne dépassera pas celui de la peinture base. En Polynésie, un ordre de grandeur de 20000 xpf les 20 kg semble correct, de quoi couvrir approximativement 45m<sup>2</sup>.

#### IV. PROJETS DE DEVELOPPEMENTS

Finalement, les matériaux développés pour la condensation de rosée offrent trois avantages connexes intéressants :

- Les matières premières utilisées doivent satisfaire au contact alimentaire ou avec les eaux de consommation. C'est une propriété qui intéresse tous les modes de collecte d'eaux atmosphériques. En effet, quand la peinture vieillit et s'écaille faute d'entretien, elle est emportée dans les citernes où son contact avec l'eau de consommation va être prolongé.
- Les propriétés radiatives des matériaux leur permettent de limiter considérablement leur échauffement diurne, augmentant le confort des occupants et rationalisant la consommation énergétique pour les lieux équipés de climatiseurs.
- Les coûts de ces matériaux ont été souhaités minimaux. Les objectifs à terme étant de produire des films LDPE à moins de 100xpf le m<sup>2</sup> et de ne pas dépasser le prix d'une peinture classique pour ce qui est des peintures radiatives.

En ce qui concerne l'application principale, à savoir la production de rosée artificielle, elle n'a pas vocation à devenir une source principale d'approvisionnement dans les îles du Pacifique. Le climat tropical y est assez humide et les populations disposent en général de réserves suffisantes pour faire face aux besoins pour des conditions météorologiques habituelles. Au moins trois types de situations imposent cette ressource comme intéressante à exploiter.

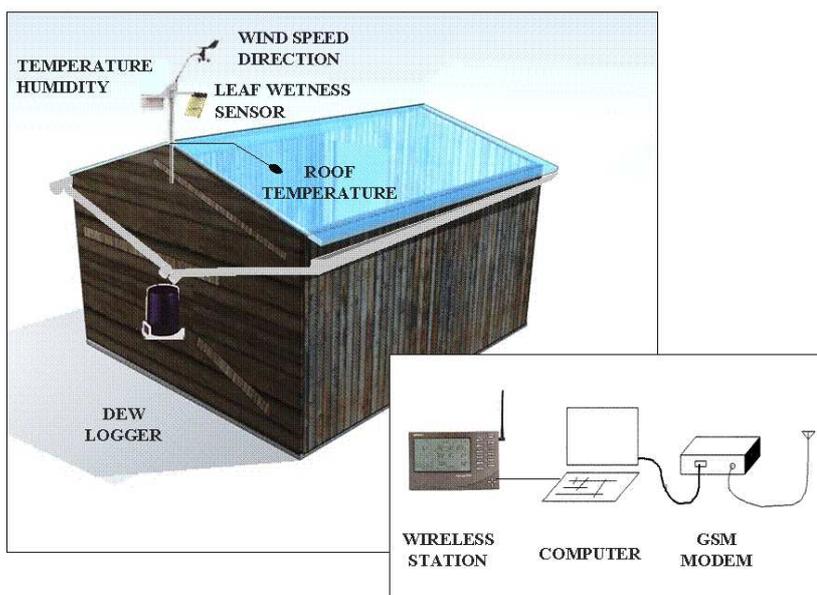
- En zone semi désertique, elle peut être considérée comme une ressource principale. C'est par exemple le cas en Inde, où le gouvernement fédéral de l'état du Goujarat finance l'achat de gouttières pour la population.

- En cas de sécheresse intense, la rosée collectée sur la surface d'une toiture peut permettre de fournir en moyenne la quantité d'eau nécessaire à la stricte consommation des habitants. Dans le cas des Tuamotu, les insulaires disposent dans ces conditions de puits variablement saumâtres fournissant l'eau nécessaire aux autres tâches, hors boisson.
- En cas d'atteinte majeure à la qualité des eaux accessibles ou stockées (contamination bactérienne) ou de mise hors d'usages d'infrastructures (catastrophes naturelles...) interdisant la consommation des ressources habituelles, elle peut fournir un apport aérien d'une relative qualité. En effet, cette eau se forme sur un support (toiture) sec le jour et soumis au rayonnement Ultra Violet diurne, donc peu propice au développement de microorganismes. Elle peut être collectée séparément chaque jour comme ressource « propre » et être consommée après une filtration sommaire et si possible un passage à ébullition.

En l'état actuel des recherches et dans le but de valider les estimations dans un cas bien réel, il semblerait intéressant d'équiper une habitation sur un atoll avant d'envisager une implication plus large de la population locale. Dans notre cas, équiper signifie d'une part peindre le toit en tôle d'un fare dont la situation correspond à celle d'une habitation type des Tuamotu. D'autre part, y adjoindre les capteurs en temps réel et le système de rapatriement des données pour étude, sur le modèle de la toiture instrumentée sur une petite île en Croatie (figure ci-dessous).

Une telle installation pourrait avantageusement être installée sur une maison MTR, ce qui serait un objectif cohérent avec les objectifs du système.

- la reproductibilité en raison de la très large diffusion sur le Territoire de ce type d'habitat en kit.
- La facilité de mise en œuvre avec la possibilité d'intervenir sur la toiture avant livraison, voir même auprès du fabricant.



---

*Montage d'un fare MTR (Tikehau, 2005)**Fare et citerne de stockage des pluies***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. voir [www.opur.u-bordeaux.fr](http://www.opur.u-bordeaux.fr)
2. *Beysens Daniel, Irina Milimouk, Vadim Nikolayev, Marc Muselli and Jacques Marcillat* "Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield", *Journal of Hydrology, Volume 276, Issues 1-4, Pages 1-11 , 15 May 2003*
3. *Beysens D., M. Muselli, V. Nikolayev, R. Narhe, I. Milimouk*, "Measurement and modelling of Dew in Island, coastal and alpine areas", *Atmospheric Research, in Press, 2004*
4. *Muselli Marc, Daniel Beysens, Jacques Marcillat, Irina Milimouk, Torbjörn Nilsson and Alain Louche*, " Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France)", *Atmospheric Research, Volume 64, Issues 1-4, Pages 297-312, September-October 2002*
5. *Beysens, D., Clus, O., Mileta, M., Milimouk, I., Muselli, M., Nikolayev V.*; Collecting dew to improve water resources: the D.E.W. project in Biševo (Croatia), *Proceedings: 3rd Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik,*

Pascal Ortega

Owen Clus