



HAL
open science

Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce

Owen Clus

► **To cite this version:**

Owen Clus. Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce. Physique [physics]. Université Pascal Paoli, 2007. Français. NNT: . tel-00320450

HAL Id: tel-00320450

<https://theses.hal.science/tel-00320450>

Submitted on 11 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

THESE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CORSE

DISCIPLINE : PHYSIQUE, ENERGETIQUE GENIE DES PROCEDES

**CONDENSEURS RADIATIFS DE LA VAPEUR D'EAU
ATMOSPHERIQUE (ROSEE) COMME SOURCE
ALTERNATIVE D'EAU DOUCE**

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

OWEN CLUS

LE

10-04-2007

DIRECTEUR DE THESE : **DANIEL BEYSENS**

CO-ENCADRANT : **MARC MUSELLI**

JURY

M. PRUD'HOMME ROGER	DR, LAB. DE MODELISATION EN MECANIQUE, U. PARIS 6
M. GARRABOS YVES	DR, INST. CHIMIE DE LA MATIERE CONDENSEE DE BORDEAUX
M. AIELLO ANTOINE	PR, UNIVERSITE DE CORSE
M. BALBI JACQUES-HENRI	PR, UNIVERSITE DE CORSE
M. ORTEGA PASCAL	DR, UNIVERSITE DE POLYNESIE FRANÇAISE
M. BEYSENS DANIEL	DR, ESPCI CEA-ESEME (DIRECTEUR DE THESE)
M. MUSELLI MARC	DR, U. DE CORSE (CO-ENCADRANT DE THESE)

THESE DE DOCTORAT : Owen CLUS ; Physique, Energétique, Génie Des Procédés

« CONDENSEURS RADIATIFS DE LA VAPEUR D'EAU ATMOSPHERIQUE (ROSEE)
COMME SOURCE ALTERNATIVE D'EAU DOUCE »

Résumé :

La vapeur d'eau atmosphérique est une ressource en eau sous exploitée. Les matériaux à forte émissivité infrarouge (rayonnement thermique) sont utilisés en climatisation passive de jour. De nuit, ils se refroidissent et sont une technologie bon marché, robuste et efficace pour condenser cette ressource renouvelable avec des rendements mesurés supérieurs à 0,6 L m⁻² par nuit. L'enjeu de ces travaux de recherches était d'avancer la compréhension de ces systèmes, de mettre au point les outils et de développer les techniques permettant la réalisation de condenseurs de grandes dimensions.

Des matériaux (films polymères et peintures) originaux et innovants ont été développés pour ces applications : ils conjuguent une grande émissivité IR et un état de surface optimisé pour un coût inférieur à 1 € m². Des simulations numériques CFD (Phoenics) ont été programmées dans le but d'optimiser la mise en œuvre des condenseurs de rosée sur des systèmes réels complexes et de grande superficie. De nouvelles méthodes d'estimation (mesure de volume ou estimation indirecte) de la ressource potentielle en eau de rosée sont discutées en fonction de l'influence des paramètres météorologiques pour les îles de Biševo (Croatie), Tahiti et Tikehau (P. Française) et les sites de Panandhro et Yellagiri Hills (Inde).

Enfin, deux systèmes réels novateurs ont été réalisés : une toiture pérenne de démonstration de 15,1 m² installée à Biševo (rendements moyens de 0,181 mm pour un maximum de 0,526 mm). Le second est la première usine à rosée, réalisée avec l'IIMA, dans l'état du Gujarat (Inde). La surface actuelle est de 850 m² et sera étendue à 15 000 m² pour produire jusqu'à 5 m³ d'eau pure par nuit.

PHD: Owen CLUS; Physic, Energy, Chemical Engineering

« RADIATIVE CONDENSERS OF ATMOSPHERIC WATER VAPOUR (DEW) AS AN
ALTERNATIVE FRESH WATER SOURCE »

Abstract:

Atmospheric water vapor is an alternative water resource that could be more exploited. Highly infrared emissive materials are already used for diurnal passive cooling and air-conditioning. During the night, they have proved to cool their surface and to be an efficient and cheap technology for condensing artificial dew with common rates reaching 0.6 L m⁻² per night. The aim of this work was to enhance the knowledge and to develop the tools and the technology for transposing this application from experiment to complex and large scale real systems. New cheap polymeric materials (films and paints) presenting high IR emissivity and selected surface wetting properties have been formulated for dew harvesting.

CFD numerical simulations have been programmed as tools for enhancing the efficiency of new implemented condensers if built with complex shapes and on large surfaces. New methods (volume measurements or roundabout estimation) are discussed for evaluating dew potential on the islands of Biševo (Croatia), Tahiti and Tikehau (French Polynesia) and both Indian sites Panandhro and Yellagiri Hills.

Two real systems have been implemented: The first is a 15.1 m² perennial show roof on Biševo Island (Croatia). Average dew yield was 0,181 mm for a maximum record of 0.526 mm. The second implementation (with IIMA, in Gujarat State, India), is the first dew plant, that already develops 850 m² and will soon be extended to 15 000 m² to produce maximum 5 m³ of water a night.

Mots clefs / Keywords : Refroidissement radiatif ; simulations numériques CFD ; film thermoplastique ; peinture ; condenseur de rosée ; eau douce / radiative cooling ; CFD numerical simulations ; thermoplastic film ; paint ; dew condenser ; fresh water

*A ma chance,
Et pour toi qui m'accompagne...*

*Par delà
Mes certitudes
Pourquoi ne pas
Admettre que
Peut être
Est la mesure
De mes envies...*

AVANT PROPOS

Je profite de l'occasion qui m'est donnée dans ces pages pour adresser mes plus sincères remerciements aux différents membres de la commission d'examen qui ont accepté de critiquer ce travail. Je suis tout particulièrement sensible à l'honneur que me font Monsieur Roger PRUD'HOMME (Dir. Rech. Lab. Modélisation en Mécanique, UMR 7607 U. Paris 6) et Monsieur Yves GARRABOS (Dir. Rech. CNRS - Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux) en acceptant d'être les rapporteurs de ce travail.

Je remercie Monsieur le Professeur Antoine AIELLO, Président de l'Université de Corse et Monsieur le Professeur Jacques-Henri BALBI (Dir. UMR CNRS 6134, U. de Corse) pour cette marque d'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer à cette commission.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Pascal ORTEGA (MCF, Université de Polynésie Française) de franchir un demi-globe terrestre pour venir faire partager ses recommandations et son expérience du Territoire de Polynésie Française qui pourrait être un site d'application intéressant de ces travaux.

Ce travail a été réalisé pour l'essentiel au sein de l'équipe « Energies Renouvelables » du lab. de Sciences Physiques de l'Environnement de l'U. de Corse sous la responsabilité de Monsieur Marc MUSELLI (MCF, U. de Corse). Ces recherches ont été conduites sous la direction de Monsieur Daniel BEYSENS (Dir. équipe mixte CEA-CNRS ESEME, Lab. PMMH, ESPCI Paris), une convention de recherche liant ces deux équipes depuis l'année 2000. Je ne peux qu'exprimer ici ma profonde reconnaissance à MM. M. MUSELLI et D. BEYSENS pour leur constante présence et leurs encouragements, pour leur soutien scientifique et leur patience. C'était un réel plaisir que d'avoir été amené à travailler à leur contact.

Ce travail ne se serait pas accompli sans l'effort financier consenti par la Collectivité Territoriale de Corse et l'octroi d'une bourse de recherche pour la totalité des trois années de thèse. Certains travaux de ce mémoire n'auraient pu être menés à bien sans un soutien financier de l'agence OSEO-ANVAR Corse ou du Ministère de l'Outre Mer. Que tous ces acteurs soient remerciés pour la confiance accordée à notre thématique de recherche.

Mais alors que je m'attelle à la rédaction de ce travail de thèse qui fut pour moi immensément riche et assurément intéressant, de nombreuses personnes me viennent à l'esprit sans qui les pages suivantes seraient certainement restées blanches. Je leur dois pour certains la richesse humaine, le savoir parfois, la rigueur, le soutien... Aux autres les rencontres, la couleur, l'amitié. Certains paraîtront dans ces pages, d'autres en seront absents, mais tous resteront dans mon souvenir, qu'ils en soient remerciés.

A ce propos, je souhaiterais nommer de nombreuses personnes qu'il m'a été donné d'apprécier dans les différentes équipes qui m'ont généreusement accueilli au cours de ces trois années. A commencer par le personnel du site de Vignola dans son ensemble. Les membres de l'équipe, bien sûr, Philippe POGGI, Gilles NOTTON, Antoine FOLACCI, Christian CRISTOFARI, Jean-Louis CANALETTI... ainsi que Jean-Claude ROMANO, MM. les Pr. Joseph CASANONA, Felix TOMI, Ange BIGHELLI et Alain LOUCHE. Merci à Pascale

BRADESI, Vincent CASTOLA, Cathy LUCREZI pour leurs encouragements répétés et leur gentillesse. Mon amitié va à tous les stagiaires et doctorants qui entretiennent une ambiance chaleureuse, internationale et saine.

Je n'oublie pas que mon travail de thèse a débuté au sein d'une équipe amicale à l'ICMCB de Bordeaux. Je n'oublie pas cet accueil chaleureux dans le monde de la recherche scientifique où mes premiers pas ont été guidés par Vadim NIKOLAYEV, Irène MILIMOUK, Jalil OUZZANI, Carole LECOUTRE et Fabien PALENCIA. Merci à eux.

Je n'omettrais pas de remercier MM. les Professeurs Etienne DUGUET et Eric PAPON qui m'ont littéralement « offert » les moyens d'effectuer mes recherches sur les matériaux polymères au sein de l'équipe 10 de l'ICMCB et de l'équipe de la société RESCOLL basée à l'ENSCP. Je remercie également Mr Patrick ECHEGUT du CRMHT Orléans pour la réalisation des tests optique IR.

En différents lieux, des équipes m'ont accueilli en prenant un soin particulier à m'offrir les meilleures conditions de travail possibles. Je remercie la Jeune Equipe Terre et Océan de l'Université de Polynésie Française, je ne nommerais que Guilhem BARRUOL et Elodie MARTINEZ, ce qui me contraint alors à passer sous silence la majorité des personnes exceptionnelles que j'ai eu la chance de côtoyer à l'Université de Polynésie Française et au laboratoire du LESE où je fus accueilli et formé aux analyses chimiques.

J'ai bien entendu une pensée particulière pour le Professeur Girja SHARAN de l'Indian Institute of Management d'Ahmedabad qui m'a reçu et fait découvrir cet extraordinaire sous continent indien à l'occasion d'un projet d'usine de rosée passionnant. Je joins alors une pensée amicale appuyée à l'ingénieur de recherche Shashank SINGH avec qui j'ai partagé l'essentiel de cette expérience, de même que pour Céline EUDIER dont j'ai pu apprécier le regard d'une grande acuité de la vidéaste au cours de ce séjour.

Je ne peux mettre un terme à ces pensées sans une attention particulière pour Marina MILETA de l'Institut d'Hydrologie et de Météorologie de Zagreb qui m'a accueilli sur la côte Dalmate. Comment alors ne pas prolonger cette attention aux chaleureux habitants de l'île de Bisevo et à leur douceur méditerranéenne : Pavao, Ina, Davor, Lilianna, Nives, Zivko...

Les rencontres n'ont pas manqué tout au long de ce projet, extraordinaires souvent, banales rarement. Je me dois d'adresser mes sincères remerciements à Reia MATEHAU et David TEIVA pour le travail accompli pour le projet rosée, ainsi qu'à la famille NATUA pour l'accueil et la petite Tapeha pour les fleurs. Je n'oublie pas Yvon FAAITE et sa famille pour les moments inoubliables qui m'ont été offert si généreusement sur la presque île.

J'ai pu compter sur de nombreuses et sincères amitiés pour m'accompagner et me soutenir tout au long de ce projet et de ses aléas, merci à vous, quel fabuleux équipage!

J'ai pu compter également sur la confiance qu'apporte la présence de deux sœurs exceptionnelles et la patience d'une mère. Je reconnais de même que mon intérêt pour la science ne se serait certainement pas manifesté un jour si mon père ne s'était évertué à encourager en moi la curiosité naturelle mais si distraite que porte chaque enfant à la compréhension du monde.

Merci Aline de m'avoir attendu, toutes ces fois, toujours un peu plus loin...

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
I PREMIERE PARTIE	
Matériaux innovants pour la condensation de rosée par refroidissement radiatif	10
1.1 La condensation de rosée	12
1.1.1 Condensation de buée sur une surface froide	12
1.1.2 Propriétés de mouillage	17
1.1.3 La formation de rosée	19
<i>i. Modèle descriptif prenant en compte les paramètres météorologiques</i>	20
<i>ii. Un exemple d'expérimentation : évolution de la masse condensée</i>	21
<i>iii. Rendement théorique</i>	23
1.2 Rayonnements, modèles de ciel et refroidissement radiatif	23
1.2.1 Rayonnements incidents, modèles de ciel	24
<i>i. Rayonnement solaire</i>	24
<i>ii. Rayonnement thermique IR de grandes longueurs d'onde</i>	25
<i>iii. Mesure expérimentale des rayonnements solaire et IR</i>	25
1.2.2 Refroidissement radiatif nocturne, climatisation passive diurne	26
<i>i. Refroidissement radiatif nocturne</i>	27
<i>ii. Climatisation passive diurne, atténuation de l'effet « îlot de chaleur » urbain</i>	28
1.3 Formulation de matériaux radiatifs dédiés à la climatisation passive et à la condensation de vapeur d'eau atmosphérique	31

1.3.1	Solutions connues à la fabrication de matériaux radiatifs ou aux propriétés optiques sélectives	33
	<i>i. Films polymères</i>	33
	<i>ii. Peintures</i>	35
	<i>iii. Etat de surface, propriétés de mouillage</i>	35
1.3.2	Nouveaux matériaux innovants : cahier des charges et choix des technologies pour les applications aux systèmes réels	36
1.3.3	Procédé industriel : choix des bases et des charges minérales	38
	<i>i. Bases et liants polymères</i>	38
	<i>ii. Additifs fonctionnels</i>	39
	<i>iii. Charges minérales</i>	40
	<i>iv. Taux de charge</i>	42
1.4	Formulation des matériaux	43
1.4.1	Mode opératoire : batch / Film / spectrométrie	43
	<i>i. Incorporation des charges et additifs dans les bases polymères</i>	44
	<i>ii. Réalisation des échantillons sous forme de films</i>	44
	<i>iii. Propriétés optiques en IR thermique et sur le spectre solaire</i>	45
1.4.2	Stratégie et résultats	47
1.5	Conclusion	50

II SECONDE PARTIE :	
Simulations numériques de condenseurs radiatifs,	
comparaison avec les systèmes réels	
	52
II.1 Description de la machine thermique condenseur	54
II.1.1 Description théorique	55
<i>i. Modèles</i>	55
<i>ii. Convection libre et convection forcée</i>	57
II.1.2 Exemples de condenseurs plans	58
II.2 Mise en œuvre des simulations numériques	60
II.2.1 Intérêt de l'expérience numérique par modélisation en CFD	60
II.2.2 Bilan radiatif du condenseur et dissipation d'énergie	62
<i>i. Emittance angulaire du matériau</i>	63
<i>ii. Emittance de l'environnement du système dans $d\Omega$</i>	64
<i>iii. Bilan radiatif du condenseur, énergie dissipée par rayonnement</i>	66
<i>iv. Géométries planes « ouvertes »</i>	66
<i>v. Géométries coniques « fermées »</i>	67
II.2.3 Programmation du logiciel de CFD PHOENICS	71
<i>i. Programmation et conditions aux limites</i>	71
<i>ii. Calcul numérique</i>	75
<i>iii. Accès et traitement des résultats</i>	75
II.3 Applications : optimisation de systèmes, validation du modèle	77

II.3.1	Optimisation d'un condenseur conique innovant	77
II.3.2	Validation des simulations par comparaison avec des mesures physiques enregistrées sur 5 condenseurs	80
II.4	Conclusion	85
III TROISIEME PARTIE :		
	Ressource rosée	88
III.1	Description des méthodes de mesure	89
III.1.1	Condenseur standard, 1 m ² incliné à 30° par rapport à l'horizontale	89
III.1.2	Développement d'une station autonome de mesure des volumes condensés ...	91
	<i>i. Détails des capteurs en place</i>	92
	<i>ii. Aperçu graphique de l'enregistrement des données</i>	93
	<i>iii. Une séquence de sauvegarde multi échelle des données</i>	95
	<i>iv. Intervention de l'opérateur local</i>	96
III.1.3	Installation de capteurs d'arrosage foliaire	97
III.2	Gisements de rosée en Polynésie Française, Croatie et Inde	98
III.2.1	Polynésie Française	99
	<i>i. Sites de mesure</i>	100
	<i>ii. Protocoles de mesure</i>	101
	<i>iii. Rendements de rosée</i>	103
III.2.2	Île de Biševo, mer adriatique, Croatie	106
	<i>i. Site de mesure</i>	106
	<i>ii. Protocoles de mesure</i>	107
	<i>iii. Rendements de rosée</i>	109

III.2.3	Panandhro, région du Kutch, Inde	110
	<i>i. Site de mesure</i>	112
	<i>ii. Protocoles de mesure</i>	113
	<i>iii. Rendements de rosée</i>	114
III.2.4	Yelagiri Hills (Tamil Nadu, Inde)	117
	<i>i. Site de mesure</i>	117
	<i>ii. Protocoles de mesure</i>	118
	<i>iii. Résultats partiels</i>	118
III.2.5	Conclusion tous sites	119
III.3	Paramètres influant sur la production de rosée	121
III.3.1	Facteur de forme	124
III.3.2	Direction du vent <i>Dir</i> (°)	124
III.3.3	Vitesse du vent <i>V</i> (m s ⁻¹) à 10 m	127
	<i>i. Micrométéorologie et coupe-vent</i>	127
	<i>ii. Vitesse de vent et humidité</i>	133
III.3.4	Couverture nuageuse <i>N</i> (Octas)	136
III.3.5	Rayonnement thermique du ciel	137
III.3.6	Brouillard	139
III.4	Estimation quantitative du rendement de rosée sans mesure physique :	
	application à la toiture de Bisevo avec capteur d'arrosage foliaire	141

IV QUATRIEME PARTIE :	
Systèmes innovants pour l'exploitation de la ressource rosée à grande échelle :	
toitures, usine de rosée	146
IV.1 Toiture de démonstration (Biševo, mer Adriatique)	147
IV.1.1 Sélection du matériau commercial	150
<i>i. Tests optiques</i>	150
<i>ii. Tests en conditions réelles</i>	150
IV.1.2 Simulation numérique du condenseur de Biševo	152
IV.1.3 Installation de la toiture	154
IV.1.4 Résultats, volumes condensés et ressource en eau	155
IV.1.5 Conclusion	158
IV.1.6 Projet de démonstrateur « type Biševo » en Polynésie Française	159
<i>i. Qualité des eaux de rosée et pluie</i>	159
<i>ii. Evaluation quantitative de la ressource rosée en Polynésie Française</i>	160
<i>iii. Projet en développement</i>	162
IV.2 Usine à rosée dans la région du Kutch (état du Gujarat, Inde)	163
IV.2.1 Construction de l'usine à rosée	165
<i>i. Site</i>	165
<i>ii. Réalisation</i>	166
IV.2.2 Simulations numériques	168
<i>i. Vitesse de l'air</i>	169
<i>ii. Refroidissement</i>	171

SOMMAIRE

IV.2.3	Mesures partielles de rosée	174
IV.2.4	Conclusion	176
CONCLUSION	178
BIBLIOGRAPHIE	183
NOMENCLATURE	196
A-I.1	Annexe I.1 : Rayonnements et modèles de ciel	203
A-I.2	Annexe I.2 : Lexique du rayonnement	219
A-II.1	Annexe II.1 : Nombre de Nusselt pour des systèmes complexes	221

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les travaux réalisés au cours de ces trois années avaient pour objet d'appréhender et de mettre en œuvre des moyens techniques optimisés scientifiquement pour la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique en milieu naturel (rosée), une ressource en eau jusqu'à présent largement sous-exploitée. Le procédé mis en œuvre est le refroidissement radiatif, phénomène naturel passif (sans apport d'énergie), appliqué aux surfaces de condenseurs - collecteurs de vapeur d'eau atmosphérique. Les avancées importantes accomplies au cours de ces travaux contribuent à l'affirmation des thématiques de condensation de vapeur d'eau et de climatisation passive comme un axe de recherche important au sein de l'équipe Energies Renouvelables de l'université de Corse. Les premières recherches spécifiques aux condenseurs non massifs ont été menées à partir des années 1990 (Nilsson, 1994 ; Nikolayev *et al.*, 1996 ; Muselli *et al.*, 2002). De nombreux sites ont été instrumentés et des rendements jusqu'à près de $0,6 \text{ L m}^{-2}$ par nuit ont été obtenus sur des condenseurs expérimentaux plans de 1 à 30 m^2 de surface.

Bien que s'inscrivant dans la continuité des recherches antérieures, ce travail de thèse s'est déroulé autour d'une constante qui était de développer les connaissances, outils, technologies et matériaux innovants permettant de mettre cette ressource rosée à la disposition des populations, c'est-à-dire d'effectuer avec succès la transition entre le pilote expérimental et les systèmes réels (toitures et condenseurs quantitatifs de grande dimension). Avant de détailler les étapes principales de cette recherche et pour bien cibler à qui s'adressent ces technologies, il convient de placer la ressource rosée dans le contexte actuel de la disponibilité en eau, des besoins et des solutions techniques qui s'offrent à ce jour pour les satisfaire.

L'eau existe sous de multiples formes : eau de source, eau de mer, de rivière, eau de pluie, brouillard ou rosée. Les réserves globales d'eau douce sont évaluées à 35 millions de km^3 (soit 2,5 % de la quantité globale d'eau disponible sur terre = 1 400 millions de km^3) : il s'agit des glaciers et neiges (24 millions de km^3), des eaux souterraines (10,5 millions de km^3), notamment des puits artésiens, des rivières et lacs (0,1 million de km^3). On y inclut aussi les précipitations atmosphériques (13 000 km^3) qui alimentent les sources dont nous venons de parler (Beysens et Milimouk, 2000 ; Muselli, 2006b).

Afin de donner la mesure actuelle de l'enjeu que représente l'accès à l'eau douce, il faut préciser que cette ressource est très inégalement répartie. L'Amérique du Sud détient le quart des réserves mondiales, alors que ce continent n'accueille que 6 % de la population. A l'opposé, 60 % des habitants de la planète vivent en Asie, qui ne détient que le tiers des réserves si bien qu'à l'heure actuelle, 1,5 milliard de personnes vivent dans des pays en état de stress hydrique où la ressource en eau est jugée insuffisante (inférieure à 1 700 m³ par an et par habitant).

D'une part, le stress hydrique est un frein au développement lorsqu'il ne permet pas de satisfaire les besoins de l'agriculture vivrière et du bétail. Ainsi, en janvier 2006, la FAO, l'agence de l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture, estimait qu'en raison de la sécheresse plus de 11 millions de personnes étaient "au bord de la famine" dans plusieurs pays de la Corne de l'Afrique, dont la Somalie, le Kenya, Djibouti et l'Ethiopie. Généralement, le stress hydrique touche également l'eau de consommation et constitue un handicap majeur pour leur développement social et économique. Ainsi, si l'on s'intéresse aux 13 économies mondiales les plus sinistrées (dont 10 sur le continent africain), il apparaît que moins de 50 % de la population a accès à l'eau potable (Diop and Rekecwicz, 2003). Dans l'ensemble, plus de 1,1 milliard d'êtres humains (17 % de la population mondiale) ne disposent pas d'une eau en quantité et en qualité pour leur consommation (WHO and UNICEF, 2005 ; Faujas, 2006). D'un point de vue sanitaire, entre deux et huit millions de personnes (dont 1,8 millions d'enfants) meurent chaque année de diarrhée, dysenterie, choléra, typhoïde, poliomyélite, bilharziose, onchocercose et cécité des rivières, toutes maladies liées à l'eau (ou plus exactement à sa mauvaise qualité) qui continuent de décimer nombre de pays pauvres ou en voie de développement. Ce chiffre place ces maladies au même rang que le sida, voire au-dessus, dans l'échelle des fléaux qui affligent l'humanité.

Le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) préconise la reconnaissance par la communauté internationale du droit fondamental de tout être humain à disposer d'au moins 20 litres d'eau potable par jour, gratuits pour les plus pauvres. Précisons qu'en cas de pénurie extrême, les volumes recommandés par l'OMS sont de 5 L/jour/personne et de 2 L/jour/personne en conditions de survie. L'effort annuel à consentir pour satisfaire aux recommandations des Nations Unies est estimé à 30 milliards US \$ (soit les dépenses annuelles cumulées en produits de parfumerie dans l'Union Européenne). Deux directions principales sont mises en avant à l'heure actuelle pour satisfaire ces besoins.

La première est technologique et consiste à augmenter les aménagements hydrauliques ainsi qu'à développer les usines de production et traitement d'eau douce. De nombreux pays se lancent dans des politiques ambitieuses de grands travaux (barrages, canaux, aqueducs...) à une échelle sans précédent pour l'irrigation et l'alimentation en eau de régions arides en Inde, Brésil, Turquie, Syrie, Irak, Chine, Espagne, Etats-Unis... Dans les régions côtières arides assez riches pour en assurer le coût énergétique, le dessalement de l'eau de mer constitue un recours (osmose inverse, distillation). A ce jour 12 500 sites alimentent 1,5 % de la population mondiale, notamment dans les pays du Golfe persique, la péninsule arabe ou Israël. Les pays d'Afrique du Nord exploitent quant à eux une ressource non renouvelable, « l'eau fossile » des aquifères sahariens ; l'Espagne a recours à la recharge artificielle des nappes phréatiques en régions côtières, tandis que la Chine développe des méthodes de déclenchement artificiel de pluies pour lutter contre la sécheresse (fusées, canons et techniques d'«ensemencement» des nuages à l'iodure d'argent).

La seconde réponse préconisée est la nécessité de repenser les usages de la ressource en eau (Chartzoulakis *et al.*, 2001). Cela passe premièrement par une réorganisation prioritaire des usages industriels, agricoles et ménagers. L'agriculture absorbe 73 % de l'eau douce utilisée dans le monde, devançant largement l'industrie et la production d'énergie (21 %) et les foyers des particuliers (6 %). L'arrosage au goutte-à-goutte ainsi que la réutilisation des eaux usées domestiques (qui couvre déjà 10 % des besoins d'irrigation dans le monde) permettent de limiter les prélèvements agricoles. Une seconde voie est l'importation d'« eau virtuelle » par un recentrage vers une production de variétés agricoles peu consommatrices en eau et à l'importation des produits dont la production nécessite une ressource en eau. Parallèlement, en milieu urbain, les comportements économes ainsi que le recyclage de l'eau sont encouragés. Dans certains pays (Japon, Australie...), l'eau à usage domestique est désinfectée au niveau de chaque immeuble et traitée par ultrafiltration afin d'être réutilisée immédiatement. Enfin, une tendance fortement représentée actuellement auprès des instances économiques mondiales est de tableer sur un effet régulateur de la privatisation de la ressource en eau. La marchandisation de l'eau avec un cours local assurerait un levier suffisant pour inciter les différents acteurs à un comportement économe. Cette régulation marchande qui a gagné le marché de la distribution dans de nombreux pays s'étend désormais à la ressource brute et aux réserves naturelles. Il faut souligner que ce nouveau modèle économique soulève bien souvent l'opposition de la population et de

nombreuses organisations et gouvernements qui tentent d'y opposer des modèles de gestion durables de la ressource, présentant l'eau comme un bien commun et l'accès à la ressource comme un droit humain inaliénable.

Dans ce contexte socio-économique impliquant de nombreux intérêts et acteurs, les objectifs du millénaire (fixés en 2000 par l'ONU afin de diviser par deux le nombre de personne souffrant de stress hydrique à l'horizon 2015) sont loin d'être en voie de réalisation. Si bien qu'en 2025, ce serait désormais 3 milliards d'individus qui pourraient être touchés par la pénurie. Pour cette raison, une tendance à la diversification de l'offre technologique d'accès à la ressource se poursuit, avec un intérêt particulier pour les sources d'eau "alternatives" aux sources classiques.

Idéalement, les systèmes développés doivent être bon marché, robustes et simples à installer dans des zones à faible potentiel de pénétration technologique. Dans ce cas, leur fonction peut être de fournir quotidiennement la quantité d'eau pour couvrir l'ensemble des besoins, de venir en appoint en cas de sécheresse prolongée ou de fournir seulement la quantité nécessaire à la consommation dans des zones où une ressource est disponible mais avec une qualité largement dégradée. L'avantage premier de ces ressources alternatives sera d'être délocalisées auprès des populations les plus pauvres, l'objectif étant de les fixer dans leur environnement de vie traditionnel en dépit de la désertification et moyennant quelques adaptations.

Une ressource alternative est à chercher tout simplement dans l'air où nous possédons de très grandes réserves d'eau que nous ne maîtrisons pas. Notre atmosphère contient 12 900 km³ d'eau douce qui est composée de 98 % d'eau vapeur et de 2 % d'eau condensée (nuages), un chiffre comparable aux ressources en eau liquide renouvelables sur les terres habitées (12 500 km³). Le constat est aisé, mais il faut pouvoir – et savoir – extraire cette eau sous forme liquide et de la façon la plus économique possible. Plusieurs voies sont explorées à ce jour pour exploiter cette ressource.

La première ressource mobilisée est bien sûr pluviale avec l'installation de gouttières et de citernes de stockage en collecte de chaque m² de toiture disponible. Cela se fait dans de nombreux pays arides et se développe même en France, par le biais d'incitations fiscales à l'installation. Une deuxième voie est utilisée dans les régions où les précipitations sont très irrégulières. Des levées de terre sont disposées en travers des écoulements naturels des eaux. Les réserves ainsi formées peuvent fournir une ressource durant un certain laps de temps ; surtout, ces

eaux stagnantes rechargent les nappes par infiltration, ce qui augmente la réserve d'eau disponible à l'abri de l'évaporation.

Dans les déserts côtiers situés dans les parties ouest de l'Afrique (Namibie) et de l'Amérique du Sud (Chili, Pérou), l'humidité venant de l'océan se condense sous forme de brouillard sur les montagnes de moyenne altitude. L'eau du brouillard, déjà formé de gouttelettes d'eau liquide en suspension, est collectée sur des filets disposés verticalement perpendiculairement au vent dominant. Contrairement à la formation des brouillards qui ne s'effectue que dans des régions très humides et en altitude, la rosée peut être importante même en atmosphère relativement sèche, comme dans les déserts continentaux. En abaissant la température d'un volume d'air d'une dizaine de degrés, on peut communément obtenir une dizaine de grammes d'eau à partir de chaque mètre cube d'air. Des systèmes à refroidissement actif (compresseurs, effet Peltier) sont disponibles et commercialisés à ce jour.

La vapeur d'eau atmosphérique peut être condensée en eau liquide par l'utilisation de condenseurs passifs de rosée refroidis par dissipation radiative d'énergie. L'objectif de nos travaux est ainsi de créer une source d'eau d'appoint (voire principale durant la saison sèche et toute l'année dans certaines régions du globe) pour l'alimentation en eau potable d'une population isolée. Dans le contexte de pénurie décrit précédemment, il est manifeste que les technologies innovantes permettant la condensation de vapeur d'eau atmosphérique sans apport d'énergie comme ressource alternative en eau sont promises à un développement certain.

Depuis de nombreuses années, des tentatives ont été menées pour parvenir à cet objectif ambitieux qui est de mettre au point des systèmes efficaces pour avoir accès à cette ressource. Déjà Aristote (384-322 av.J.C.) dans son travail « *Meteorologica* » tentait de comprendre la formation de rosée par une approche scientifique, écrivant : "n'importe quelle humidité évaporée pendant le jour qui ne monte pas loin ...chute encore quand elle est refroidie pendant la nuit et s'appelle la rosée ...La rosée se forme quand la vapeur se condense en forme d'eau ...La rosée se forme par un temps clair ...et aucune condensation n'est possible quand il y a du vent".

La première tentative documentée de construction d'un condenseur de rosée est attribuée à un ingénieur Russe, F.I. Zibold. En 1912 en Crimée (Ukraine), Zibold fit construire une sorte de coupe d'environ 20 m de diamètre qui fut ensuite chargée de galets de 15 à 40 cm de diamètre. Les galets étaient entassés suivant une forme de cône tronqué présentant une dépression conique

au sommet. La hauteur du cône était d'environ 6 m pour un diamètre au sommet de 8 m (Nikolayev *et al.*, 1996 ; Beysens and Mylymuk, 2005b). Il semble que le condenseur ait fonctionné jusqu'en 1915, date à laquelle la fondation se serait fendue. Les mesures n'ont pas été consignées, cependant 20 ans plus tard, Joukov (1931) mentionne un rendement de 360 L sur un événement. Toutefois, Nikolayev *et al.* (1996) ont montré que la structure massive du condenseur de Zibold ne devait permettre à la structure d'abaisser sa température en deçà du point de rosée qu'en de rares occasions.

Par la suite en 1929, un hydrométéorologue, Chaptal (1932), tenta d'ériger un condenseur massif à Montpellier. Il le détruisit après 2 années d'essais décevants, pour « ne pas induire en erreur les générations futures ». En 1930, l'ingénieur belge Knapen (1929) imagina une version modifiée de ces condenseurs. Il fit construire une tour évidée de 12 m de haut pour 12 m de large à la base à Trans-en-Provence (France). La tour existe toujours. Cependant, le rendement n'excéda jamais 12 L par nuit. Ces deux tentatives furent considérées comme non concluantes (Gioda and Acosta-Baladon, 1991).

Il fallut ensuite attendre 1962 pour que Gindel (1965) teste en Israël un condenseur léger composé d'un film de polyéthylène de 3 m² et placé en position inclinée d'environ 25°. Les rendements ont été relevés à 0,86 et 3,63 L / m²/ mois sur trois sites.

Depuis 1994 et après trois mois de test d'un condenseur radiatif par Nilsson (1994) en Tanzanie puis en Suède, le gisement quantitatif de rosée a été expérimenté dans de nombreux sites, un « réseau » de mesure se regroupant pour l'essentiel au sein de l'International Organization for Dew Utilisation « OPUR » ou Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée. Trois sites ont été instrumentés en France (Grenoble, dès 1995, Ajaccio et Bordeaux), ainsi que Wageningen (Pays-Bas) et Jérusalem (Israël). Les tests, standardisés sur un condenseur léger de 1 m², se sont alors étendus à la Croatie (Zadar, Komiza) et l'Ethiopie (Bahir Dahr), puis plus récemment à l'Inde (Kothara, région du Kutch, état du Gujarat), à l'Arabie Saoudite (Dharam) et au Maroc (Mirleft). Dans la continuité des travaux précédents, ces trois années de recherches ont permis de poursuivre les mesures de rosée dans des sites variés et pour différents climats (Figure 1). Une orientation nouvelle a aussi été prise, car ces recherches ont été mises à profit pour développer l'ensemble des outils et connaissances pour la réalisation de condenseurs opérationnels de grande superficie (toitures, usine de rosée).

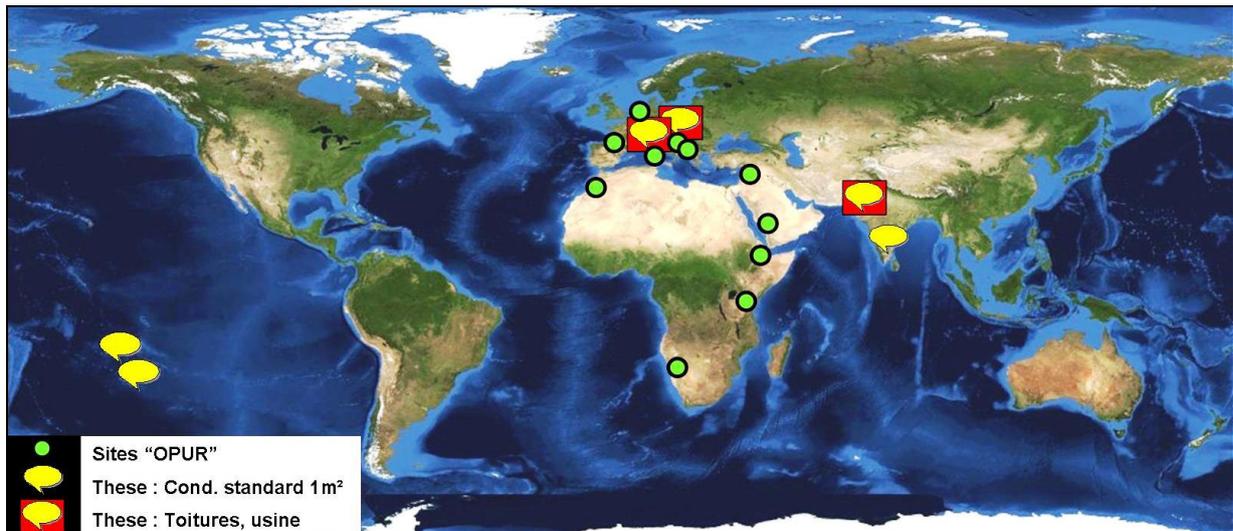


Fig. 1. Emplacement des différents sites de mesure de la ressource rosée. Points cerclés : études antérieures au travail de thèse sur condenseurs type « OPUR ». Bulles : condenseurs standard 1 m² installés au cours de cette thèse. Bulles sur fond rouge : Systèmes réels installés au cours de cette thèse ; usine de rosée de Panandhro (Inde), toiture de Bisevo (Croatie), expériences à Ajaccio (France).

La première étape de ces travaux a été de mettre au point des matériaux plus performants pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique. Compte tenu d'un cahier des charges définissant des contraintes d'état de surface pour la condensation, de propriétés radiatives IR et de coûts a minima, des matériaux polymères composites innovants ont été formulés dédiés à la condensation de rosée et à la climatisation passive par refroidissement radiatif.

Dans un second temps, les condenseurs radiatifs ont été modélisés en tant que machines thermiques et simulés grâce au logiciel de Dynamique des Fluides « CFD » PHOENICS. Cela a permis de mettre au point un outil d'aide à la décision quant aux choix techniques et de géométrie pour le développement de condenseurs innovants par leur forme et inédits par l'échelle des projets réalisés.

Parallèlement, l'étude de la ressource rosée disponible dans divers climats et zones géographiques a été prolongée comme précisé auparavant. Un nouveau système de mesure de l'ensemble des paramètres nécessaires à l'étude de la rosée a été pensé et installé pour un coût modeste en autonomie complète sur une petite île de la mer Adriatique, les données étant collectées en temps réel par modem GSM. Une étude complète de la ressource rosée a aussi été

menée pendant une durée de six mois en Polynésie Française sur les îles de Tahiti et Tikehau (atoll des Tuamotu, climat tropical humide mais pénurie d'eau douce récurrente en saison sèche).

Enfin, un important savoir faire a été développé au cours de ce travail par la participation active à deux premières mondiales en terme de développement de la condensation de rosée par refroidissement radiatif. Le premier système est une toiture de démonstration installée par nos soins en Croatie sur l'île de Biševo (mer adriatique). Le second est une usine de rosée réalisée par l'Indian Institute of Management Ahmedabad (état du Gujarat, Inde) avec l'aide de notre expertise. La surface actuelle est de 850 m² et elle sera étendue progressivement à 15 000 m² pour produire jusqu'à 5 m³ d'eau par nuit.

PREMIERE PARTIE

I PREMIERE PARTIE :

Matériaux innovants pour la condensation de rosée par refroidissement radiatif

Dans un contexte de pénurie en eau potable qui touche de nombreuses régions et en survolant l'offre de technologies disponibles pour répondre à ces besoins précis, il y a un besoin manifeste de nouvelles ressources alternatives. Les technologies innovantes permettant la condensation de vapeur d'eau atmosphérique sans apport d'énergie ont un potentiel de développement certain pour des populations isolées géographiquement ou marginalisées économiquement et exclues de l'accès à la ressource locale.

Il convient dans un premier temps de définir précisément les conditions de condensation de la vapeur d'eau sur une surface froide (buée) ainsi que les modèles décrivant la condensation de vapeur d'eau atmosphérique en environnement extérieur (rosée).

Pour cela, nous détaillerons le principe du refroidissement radiatif ainsi que les modèles décrivant les rayonnements atmosphériques solaire et infrarouge thermique incidents à la surface du globe. De ces propriétés de rayonnement seront alors déduites les conditions de formulation de nouveaux matériaux aux surfaces dédiées au refroidissement radiatif et à la condensation de rosée.

I.1 La condensation de rosée

Dans ce chapitre les modèles de transfert thermique au voisinage d'une surface froide ainsi que ceux décrivant la condensation de vapeur d'eau atmosphérique seront rapidement présentés. Ensuite, une expérience simple de mesure de la ressource rosée potentielle sera décrite. Elle permettra de mettre en évidence la dépendance de ce phénomène aux conditions de l'environnement local immédiat et à la micrométéorologie (échelle de l'ordre de 100 m ; Guyot, 1999).

I.1.1 Condensation de buée sur une surface

Le phénomène de condensation peut se définir comme un prélèvement de chaleur dans un système à l'état gazeux tel que la baisse d'agitation des molécules de vapeur entraîne leur transition de phase en un état condensé liquide.

La condensation sur une surface peut présenter deux mécanismes différents, par la formation d'un film ou par la coalescence de gouttes. Dans le premier cas, le condensât mouille la totalité de la surface et forme un film continu qui constitue alors la nouvelle surface de condensation, de grandeur égale à la surface initiale du condenseur (Guyer and Brownell, 1999). Dans le second cas, la condensation a lieu sur la ligne de triple contact (solide – liquide - gaz) et sur la surface des gouttes de condensât. En régime stationnaire, la surface mouillée occupée par les gouttes est invariablement voisine de 55 % de la surface développée par le condenseur si sa surface est à caractère hydrophobe (Beysens, 1995, 2006b).

On parle de formation de buée lorsque le gaz qui se condense est la vapeur d'eau. Celle si se forme sur une surface dont la température T_c est inférieure à la température de rosée T_d . La température de rosée correspond alors à la température pour laquelle la pression partielle de vapeur d'eau serait égale à la pression de vapeur saturante pour les conditions de pression données. Sans tenir compte du gradient de température dans la couche limite au voisinage du condenseur, la condensation y crée un déficit d'humidité absolue. A l'état d'équilibre, T_c correspond au point de rosée corrigé pour cette humidité absolue réduite contre la surface. D'un point de vue physique, la différence $T_d - T_c$ doit être proportionnelle à l'énergie nécessaire au transfert de matière de la vapeur d'eau par diffusion à travers la couche limite.

L'énergie d'activation nécessaire pour compenser l'énergie de formation de l'interface eau-vapeur et la tension de surface créée par la nucléation d'une gouttelette liquide (Beysens, 1995, 2006b) est un second facteur qui n'autorise la condensation que pour une température

inférieure à la température de rosée. De plus, la vapeur va se condenser sous forme liquide préférentiellement sur la surface mouillée du condenseur avant la surface sèche car l'énergie d'activation à fournir sera moindre. En cas de sur-saturation dans la lame d'air au-dessus du substrat, la nucléation pourra se faire sur des aérosols avec ainsi la formation de brouillard.

De nombreux modèles décrivent les transferts simultanés de chaleur et matière le long d'une interface fluide / solide. Cela peut concerner par exemple les phénomènes de sublimation, de combustion, les procédés de dépôt, de séchage, de même que la condensation de buée sur une surface froide. L'objet de ce travail n'est pas de faire un inventaire exhaustif de ces modèles théoriques. Nous nous en tiendrons aux modèles les plus utilisés pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique (Monteith and Unsworth, 1990; Nilsson, 1994 ; Nikolayev *et al.*, 1996 ; Awanou and Hazoume, 1997; Nikolayev *et al.*, 2001 ; Wahlren, 2001 ; Jacobs *et al.*, 2004 ; Gandhidasan and Abualhamayel, 2005). Par analogie, nous citerons d'autres exemples, pour la modélisation de distillateurs (Bourouni *et al.*, 1997) ou encore la simulation de machines thermiques par Computational Fluid Dynamic « CFD » (Liu *et al.*, 2004 ; D'Agaro *et al.*, 2006). Pour l'ensemble de ces auteurs, la modélisation se fonde sur le principe de continuité des conditions aux limites (soit à la surface du condenseur) en régime permanent. La conservation de la masse est respectée et le transfert de masse est déterminé à partir du bilan thermique global, tel que l'ensemble des flux de chaleur soit nul :

$$\frac{dT_c}{dt}(MC_c + m_c C_w) = q_{IR} + q_{CV} + q_{CD} + q_{COND} \quad \text{I.(1)}$$

T_c = température de surface du condenseur (°C ou K) ; M = masse du condenseur (g)
 m_c = masse d'eau en surface du condenseur en régime stationnaire ; valeur constante sur condenseur incliné (g)

C_c ; C_w = capacité calorifique du substrat de condensation et de l'eau ($\text{J g}^{-1}\text{K}^{-1}$)

q_{IR} = transfert radiatif (W)

q_{CV} = transfert de chaleur (W) convectif et diffusif (condenseur - air)

q_{CD} = transfert de chaleur (W) par conduction (condenseur - solide)

q_{COND} = transfert de chaleur (W) due à la chaleur latente de condensation λ_c (J g^{-1}) :

$$q_{COND} = \lambda_c \frac{dm}{dt} \quad \text{I.(2)}$$

m = masse cumulée d'eau condensée en surface, sans tenir compte de l'écoulement (g)

Dans les modèles cités ci-dessus, si S_C (m^2) est la surface d'échange, le coefficient de transfert thermique moyen sur la surface h_C ($W m^{-2} K^{-1}$) est défini tel que le transfert de chaleur convectif et diffusif q_{CV} (W) soit le suivant :

$$q_{CV} = S_C h_C (T_C - T_a) \quad I.(3)$$

Sous cette formulation, le coefficient de transfert h_C dépend de nombreux paramètres qui peuvent être, à l'échelle d'un système complet (longueur caractéristique de la surface L_C (m), géométrie du système) ou au niveau des propriétés intrinsèques des fluides et matériaux (masses volumiques ρ_a , viscosité μ_a , conductivité thermique k_a , capacité calorifique $C_{p,a}$ de l'air, ou encore une grandeur représentant la convection libre $g\Delta\rho_a$.

$$h_C = f(\text{géométrie}; L_C; T_C; T_a; g\Delta\rho_a; \rho_a; \mu_a; k_a; C_{p,a}) \quad I.(4)$$

De ce fait, et même dans le cas de géométries simples (plan vertical ou horizontal), h_C est déterminé par des corrélations empiriques. Cette simplification (définition d'un coefficient de transfert) est en particulier privilégiée pour l'étude des cas complexes qui nous préoccupent ici (systèmes en milieux naturels en atmosphère non contrôlée et sous conditions météorologiques variables, géométries complexes...). Les termes de l'Eq. I.(1) dont la contribution envers T_c se fait par transfert de chaleur (q_{IR} , q_{CV} , q_{CD}) seront également détaillés ultérieurement dans ce travail (chapitre II) sans corrélation empirique par une approche numérique (CFD).

Sachant que la condensation est l'un des principaux modes de transfert de chaleur en atmosphère humide, considérons à présent le terme dont la contribution envers T_c se fait par transfert de masse. La formulation du transfert de matière se fait par analogie avec le transfert thermique qui est mû par le gradient de température (Eq. I.(3) ; Eq. I.(5)) donnant un coefficient de transfert thermique h_C . Le gradient de la fraction massique de vapeur dans l'air ($g g^{-1}$) donnera ainsi un coefficient de transfert de masse α_m (Eq. I.(6)) caractéristique du transfert de matière (voir à ce propos Campen and Bot, 2002). Les ordres de grandeurs des coefficients de transfert de matière par analogie aux transferts de chaleur sont voisins de 6 000 à 30 000 $W m^{-2} K^{-1}$ dans le cas de la condensation sous forme de film et de 60 000 à 300 000 $W m^{-2} K^{-1}$ pour la condensation sous forme de gouttes ou « dropwise » (Guyer and Brownell, 1999). La littérature propose de nombreuses formulations du transfert de chaleur avec changement d'état, nous retiendrons ici les plus intéressantes pour nos applications.

i. Un premier modèle intéressant décrit des systèmes bien connus tels que des plaques froides verticales (murs, Liu *et al.*, 2004 ; ou condenseurs à ailettes refroidies par fluide caloporteur, Campen and Bot, 2002). L'exemple du condenseur à ailettes illustre ce cas. Les ailettes sont espacées de la distance D_{cool} (m) ; V ($m\ s^{-1}$) est la vitesse de l'air dans la direction z ; ρ est la masse volumique de l'air en $kg\ m^{-3}$ et enfin c_{air} et c_c les fractions massiques de vapeur respectivement dans l'air et sur la surface de condensation ($kg\ kg^{-1}$). Ce modèle admet qu'à partir de l'Eq. I.(1), le bilan énergétique donne la valeur du terme q_{COND} . Pour cela, les coefficients de transfert thermique h_C et de masse α_m sont exprimés respectivement dans les Eq. I.(5) et I.(6).

$$-V \frac{D_{cool}}{2} \rho C_p \frac{dT_a}{dz} - h_C (T_a - T_c) = 0 \quad I.(5)$$

$$-V \frac{D_{cool}}{2} \frac{dc_{air}}{dz} - \alpha_m (c_{air} - c_c) = 0 \quad I.(6)$$

h_C est déterminé expérimentalement et α_m est obtenu par la relation de Lewis (Eq. I.(7)).

$$\frac{h_C}{\alpha_m} = \rho C_p (Le)^{2/3} \quad I.(7)$$

Le nombre de Lewis Le est propre à un milieu et permet compare l'efficience du transfert de chaleur par conduction par rapport à celle du transfert de matière. Le est tel que si k_{air} est la conductivité thermique de l'air ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$), et δ_{air} le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($m^2\ s^{-1}$) :

$$Le = \frac{k_{air}}{\rho C_p \delta_{air}} \quad I.(8)$$

Finalement, la variation de c_{air} permet d'estimer la quantité de condensât obtenue. Cette relation peut s'avérer très utile dans les systèmes à condensation forcée (par refroidissement mécanique ou par effet Peltier) et dont la géométrie est contrôlée.

ii. Le second modèle détaillé est spécifique à l'application aux condenseurs de rosée en extérieur et a été développé par Nikolayev *et al.*, (1996) ; (voir aussi Nikolayev *et al.*, 2001 ; Wahren, 2001 ; Muselli *et al.*, 2006a). A partir du bilan thermique (Eqs. I.(1) et I.(2)) et par analogie au transfert thermique (Eq. I.(3)), la variation de masse s'exprime selon l'Eq. I.(9).

$$\frac{dm}{dt} = S_c \alpha_m (p_{sat}(T_d) - p_c(T_c)) = \frac{q_{COND}}{\lambda_c} \quad \text{si positif. Sinon, la valeur est 0.} \quad \text{I.(9)}$$

$p_{sat}(T_d)$ est la pression de vapeur saturante à la température T_d , $p_c(T_c)$ est la pression partielle de vapeur sur le condenseur.

α_m est le coefficient de transfert massique. De même que pour le premier modèle (Eq. I.7), α_m s'exprime ici en fonction du coefficient de transfert thermique h_c . Mais h_c étant fonction de la géométrie du condenseur (Eq. I.11) et plus seulement suivant les propriétés du fluide, α_m s'obtient suivant la formule empirique (Muselli *et al.*, 2006a):

$$\alpha_m = 0,656 \frac{h_c g_f}{p_a c_a} \quad \text{I.(10)}$$

h_c est corrélé à l'épaisseur de la couche limite laminaire le long de la surface qui dépend de la vitesse du vent météorologique V (m s^{-1}) et de la géométrie du condenseur. Si p_a est la pression atmosphérique (Pa) et c_a chaleur spécifique de l'air :

$$h_c = k_f \beta_f \sqrt{V/D_{im}} \quad \text{I.(11)}$$

Avec g_f ; k_f ; β_f et D_{im} des coefficients dépendant de la géométrie du condenseur et valables en conditions de convection forcée (la possibilité d'appliquer ce modèle en conditions de convection mixte sera discutée au Chapitre II.1) :

- g_f et k_f sont des coefficients de correction d'ordre 1 qui tiennent compte des mesures effectuées sur les condenseurs en environnement extérieur (Muselli *et al.*, 2006a).
- $D_{im} = (S_c)^{1/2}$ est la dimension du condenseur et β_f est un facteur empirique égal à $4 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{1/2}$ pour un plan incliné, selon Pedro et Gillespie, 1982 (cité par Muselli *et al.*, 2006a).

Nous constatons dès à présent qu'à partir du moment où l'étude de la condensation de buée sort du cadre défini par les modèles décrivant les cas simples connus (exemple (*i.*), plaque froide verticale), l'étude ne peut s'affranchir de coefficients correctifs empiriques ainsi que des données météorologiques (vitesse de vent) propres à la condensation de rosée. Mais avant de prendre un exemple d'expérimentation permettant d'étudier la production de rosée, regardons plus avant l'incidence de l'état de surface (propriétés de mouillage) sur la condensation de buée.

I.1.2 Propriétés de mouillage

Dans le cas de la condensation en régime transitoire (sur une surface initialement sèche), la nucléation d'une gouttelette d'eau en air saturé de vapeur d'eau (condensation homogène) est conditionnée par un terme $(T_a - T_d) < 0$ (d'après Volmer, 1939 cité par Beysens, 1995, 2006b). Ce terme doit être suffisant pour fournir une énergie libre de nucléation et ce jusqu'à l'obtention d'une gouttelette de rayon suffisant pour observer la stabilité de la phase liquide. Si la condensation a lieu sur un substrat qui peut être une particule aérosol ou un solide (condensation hétérogène), l'énergie libre « d'activation » (par analogie aux réactions chimiques) est fortement abaissée et la nucléation intervient pour une valeur absolue $|T_a - T_d|$ inférieure.

De même, la barrière énergétique dépend des propriétés de mouillage du substrat. Le mouillage se caractérise par l'angle de contact goutte - substrat θ_c (°, Figure I.1). L'angle de contact est nul pour un mouillage complet (l'eau forme alors un film), et maximal (180°) pour une goutte de liquide qui ne mouille pas la surface (séchage complet). Le taux de nucléation varie avec une fonction $\Phi(\theta_c)$ selon Sigsbee (1969) dans Beysens, 2006b :

$$\Phi(\theta_c) = 2 \frac{3 - \cos \theta_c + \cos^3 \theta_c}{3 \sin^3 \theta_c} \quad \text{I.(12)}$$

Pour $\theta_c < 180^\circ$, le taux de nucléation est supérieur par rapport au cas de la nucléation homogène. En conséquence, la nucléation hétérogène permet la condensation pour un écart thermique et donc une valeur absolue $|T_a - T_d|$ inférieure. Les éventuels défauts et irrégularités de la surface (de nature physique ou chimique) créent des écarts d'angle de contact favorisant la nucléation.

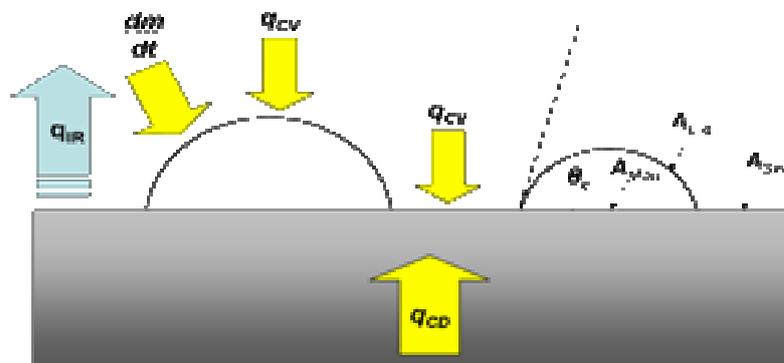


Fig. I.1. Couche de condensât : surfaces, flux et angle de contact θ_c

La représentation adoptée par D'Agaro *et al.*, (2006) permet de déduire une incidence des propriétés de mouillage sur le rapport échauffement de la surface par transfert de matière (souhaité) sur échauffement de la surface par convection (défavorable). Ainsi le bilan thermique exprimé par l'Eq. I.(1) est représenté sur la Figure I.1 avec A_{Liq} ; A_{Sec} et A_{Mou} respectivement surfaces liquide, sèche et mouillée dans les Eqs. I.(13) et I.(14) :

$$\frac{q_{COND}}{q_{CV}} \approx \frac{\alpha_m A_{Liq}}{h_{c1} A_{Liq} + h_{c2} A_{Sec}} \quad \text{I.(13)}$$

Selon Beysens (2006b), le pourcentage de surface couvert par la condensation augmente jusqu'à un régime stationnaire pour lequel :

$$\frac{A_{Mou}}{A_{Mou} + A_{Sec}} \approx 1 - 0,005\theta_c \quad \text{I.(14)}$$

D'où A_{Sec} tend vers 0,0 % quand θ_c tend vers 0° et $(h_{c2} A_{Sec})$ tend vers 0,0 dans l'Eq. I.(13).

Il semblerait alors que les meilleures conditions de condensation soient obtenues sur des surfaces fortement hydrophiles avec un angle de contact θ_c minimum. Il faut cependant prendre en compte le fait que la condensation a lieu principalement sur le « point triple » de contact condenseur – goutte liquide – air ambiant, soit le long du périmètre de la goutte. En effet, en ce point le gradient de température et donc le transfert de chaleur est le plus important, c'est pourquoi il est noté qu'en condensation intensive (procédés industriels), la condensation par coalescence donne un meilleur rendement que la condensation sur film continu.

Dans le cas de la condensation naturelle par refroidissement radiatif, d'intensité modérée, il convient toutefois d'apprécier quel est le facteur prépondérant à prendre en compte. Il y a concurrence entre la longueur cumulée des périmètres de goutte ou « point triple » (qui augmente avec le nombre de gouttes, soit θ_c maximum) et la récupération du maximum de gouttes par écoulement gravitaire qui augmente avec la taille des gouttes (θ_c minimum). L'écoulement gravitaire est maximal quand toute la surface est mouillée (en effet, une goutte non collectée s'évapore au matin). Typiquement, une goutte s'écoule lorsque les effets de la force de gravité l'emportent sur la capillarité, c'est-à-dire lorsque son rayon est supérieur à la longueur capillaire de l'eau, soit environ 2,5 mm à température ambiante. Dans ce cas, plus l'angle θ_c est faible, plus la goutte atteint rapidement son point de « rupture » et de glissement.

Il est possible de faire de manière très approchée une estimation du nombre de « générations » de gouttes qui seront condensées en un point de la surface au cours de la nuit. Prenons le cas d'un angle $\theta_c = 90^\circ$ (goutte hémisphérique). Dans ce cas, la surface mouillée en régime stationnaire représente environ 55 % de la surface du condenseur. Une « génération » de goutte est éliminée par gravité lorsqu'elle atteint un diamètre de 2,5 mm soit un rayon (hauteur) de 1,25 mm. Le volume d'une goutte est alors égal à $0,5(4/3)\pi(1,25)^3 \text{ mm}^3$ pour une surface sur le substrat de $\pi(1,25)^2 \text{ mm}^2$. Le résultat est une hauteur d'eau condensée moyenne de 0,833 mm sur la surface mouillée, soit 0,458 mm rapportés à la surface totale de substrat. Cela correspond au rendement d'une bonne nuit de rosée par refroidissement passif. Soit pour des gouttes hémisphériques, une nuit de condensation sur une surface plane correspond, comme ordre de grandeur, à la formation d'une génération de gouttes. Il est donc prioritaire de bien récupérer cette quantité d'eau par gravité. C'est pourquoi en application à la condensation passive de rosée artificielle par refroidissement radiatif, les matériaux hautement hydrophiles seront privilégiés afin de récolter une proportion aussi importante que possible du condensât sans action mécanique (voir application en toiture, Beysens *et al.*, 2007a). Dans des systèmes forcés industriels, il semble que la condensation sous forme de gouttes ou de type « dropwise » donne de meilleurs rendements en augmentant le transfert de chaleur le long du « périmètre triple » de la goutte (Beysens, 2006b).

1.1.3 La formation de rosée

Nous avons vu en abordant le modèle de production de rosée (Nikolayev *et al.*, 2001) que la description du phénomène de condensation sur une surface (buée) ne suffit plus dès que les systèmes étudiés sortent de cas simples aux corrélations empiriques prédéfinies (surface verticale ou horizontale). Il faut rapidement tenir compte du fonctionnement thermodynamique du système dans son ensemble. La formation de rosée (voire de givre) concerne la condensation de vapeur d'eau atmosphérique en milieu extérieur. Pour un condenseur donné (végétal, canopée particulière, condenseur artificiel de forme donnée), l'intensité de la condensation sera fonction des paramètres météorologiques observés sur le site : Température ambiante T_a (°C), Température de rosée T_d (°C, liée à l'humidité relative RH en %), couverture nuageuse N (octas), vitesse du vent V (m s^{-1}).

i. modèle descriptif prenant en compte les paramètres météorologiques

Il est alors possible de reprendre les termes du bilan thermique de l'Eq. I.(1) et de les expliciter en y intégrant les paramètres météorologiques de l'environnement immédiat du système :

Le bilan radiatif q_{IR} de la surface en équilibre avec le ciel, dépend du taux d'humidité relative au niveau du sol, de T_a ainsi que de la couverture nuageuse suivant l'Eq. I.(15).

$$q_{IR} = (\varepsilon_s - 1)S_c \varepsilon_c \sigma (T_c + 273)^4 \quad \text{I.(15)}$$

Avec ε_s émissivité du ciel, Pedro and Gillespie (1982) cité par Muselli *et al.*, 2006a.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 + (N/8) \left(\frac{1 - \varepsilon_0 - 8}{T_a + 273} \right) \quad \text{I.(16)}$$

$$\varepsilon_0 = 0,72 + 0,005T_a \quad \text{I.(17)}$$

Les modèles de rayonnement du ciel seront détaillés en Annexe A-1.1

Le transfert de chaleur sensible q_{CV} convectif et diffusif (condenseur - air) dépend principalement de T_a , de T_c , de la vitesse du vent V et de la forme du condenseur. Il est déterminé grâce à des paramètres empiriques pour les formes complexes. q_{CV} a été auparavant décrit par les Eq. I.(3) et I.(11) ; il sera plus largement commenté au Chapitre II.1.

Le transfert de chaleur par conduction thermique q_{CD} (condenseur - solide) dépend des propriétés de l'isolant si l'épaisseur du matériau radiatif est négligée : k_{ins} conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) et e_{ins} épaisseur (m), selon Gandhidasan and Abualhamayel (2005).

$$q_{CD} = S_c \frac{k_{ins}}{e_{ins}} (T_a - T_c) \quad \text{I.(18)}$$

Le transfert de chaleur due à la chaleur latente de condensation λ_c par unité de masse d'eau condensée est noté q_{COND} , grandeur décrite précédemment au Chapitre I.1 par les Eqs. I.(2) ; I.(9) ; I.(10) ; I.(11) pour le modèle de Pedro and Gillespie (1982). Ce terme dépend des pressions partielles de vapeur d'eau ainsi que de V et des paramètres empiriques g_f et k_f qui prennent en compte la géométrie du condenseur.

ii. Un exemple d'expérimentation : évolution de la masse condensée

Lorsque la condensation de buée sort du cadre défini par les modèles décrivant les cas simples, l'étude ne peut s'affranchir de coefficients correctifs empiriques ainsi que des données météorologiques (vitesse de vent) propres à la condensation de rosée. Des mesures physiques ont été menées sur différents condenseurs afin de déterminer les coefficients du modèle précédemment décrit. La Figure I.2 est une photographie d'un condenseur placé sur une balance électronique mesurant en continu la condensation de rosée. Ce système a été utilisé sur différents sites (Grenoble ; Bordeaux ; Ajaccio ; Outumaoro, Polynésie Française).

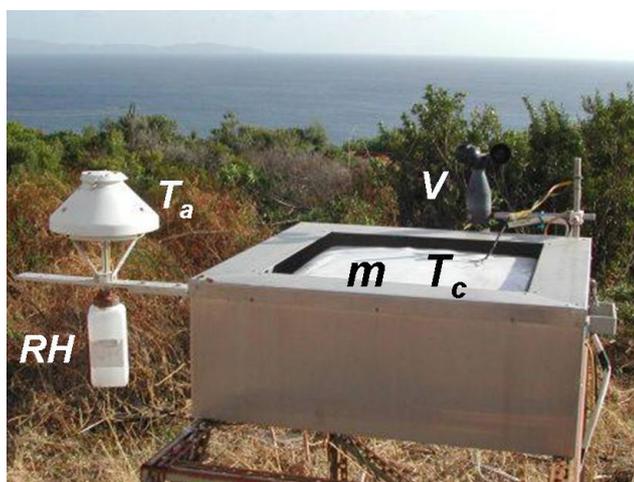


Fig. I.2. Dispositif expérimental de mesure instantanée du dépôt de rosée sur un condenseur PTFE 400 x 400 mm sur balance électronique. Acquisition des données T_a (°C), RH (%), V ($m\ s^{-1}$), m (g) et T_c (°C) ; (installé à Ajaccio depuis 1999, photo M. Muselli).

La masse de rosée condensée m est enregistrée au pas de temps de 15 min sur une plaque de référence placée à 1 m du sol. Cette surface est une plaque de PolyTetraFluororoEthylene (PTFE, désignation commerciale : Téflon) de surface de condensation $S_c = 0,16\ m^2$ et d'épaisseur $e = 1,05\ mm$. La plaque est placée sur une feuille d'aluminium de $12,5\ \mu m$ d'épaisseur (miroir IR) et une plaque de polystyrène expansé de 5 mm pour l'isoler du support (Figure I.2). L'ensemble est placé sur une balance électronique Mettler Toledo compensée en température et connectée à un PC. La balance est protégée dans une boîte aluminium jusqu'au niveau de la plaque ; la tare 0,000 g est arbitraire. Il faut noter que le vent produit généralement une force orientée de bas en haut en raison de la pression de Bernoulli. Une nuit d'enregistrement typique est présentée sur la Figure I.3. Dans le cas général, dès que $T_c < T_d$ la tombée du jour, la balance détecte une lente augmentation de la masse avec une pente

$dm/dt < 8 \text{ g h}^{-1}$. Lorsqu'au matin $T_c > T_d$, l'évaporation se manifeste avec une pente dm/dt décroissante très marquée. La période de condensation est visible et sa durée est déterminée par la grandeur (dt) durant laquelle $T_c < T_d$ (Figure I.3). La masse maximale (cumul) condensée est prise comme masse totale de rosée m_0 , quand T_c rejoint T_d tôt le matin (fin de la condensation). A partir m (g), on obtient la précipitation équivalente de rosée h (mm) :

$$h(\text{mm}) = [m \text{ ou } m_0] (\text{g}) / 160 \quad \text{I.(19)}$$

Cette grandeur h (mm) est proportionnelle à la surface du condenseur ; elle n'est pas directement comparable à la précipitation atmosphérique P (mm) qui est elle proportionnelle à la surface projetée sur un plan horizontal du système de collecte des pluies. Les événements de pluie sont détectés par observation visuelle des profils (pics pour lesquels $dm/dt > 8 \text{ g h}^{-1}$). Les paramètres physiques suivants sont enregistrés toutes les 15 minutes sur un enregistreur connecté sur PC : température de surface du PTFE T_c mesurée par un thermocouple type K ($\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$), masse m (g), humidité relative RH (%), Température de l'air T_a ($^\circ\text{C}$) et point de rosée T_d ($^\circ\text{C}$). La vitesse du vent V (m s^{-1}) est mesurée par un anémomètre à coupelle (seuil de coupure : $0,5 \text{ m s}^{-1}$) situé à 200 mm au dessus de la balance et 1,20 m au dessus du sol. La vitesse du vent est extrapolée pour une hauteur $z = 10 \text{ m}$ à l'aide de l'expression classique du profil logarithmique du vent au voisinage du sol (Monteith and Unsworth, 1990), avec z_c la rugosité caractéristique du sol (choisie ici égale à 0,1 m).

$$V(z) = V_{10} \frac{\ln(z/z_c)}{\ln(10/z_c)} \quad \text{I.(20)}$$

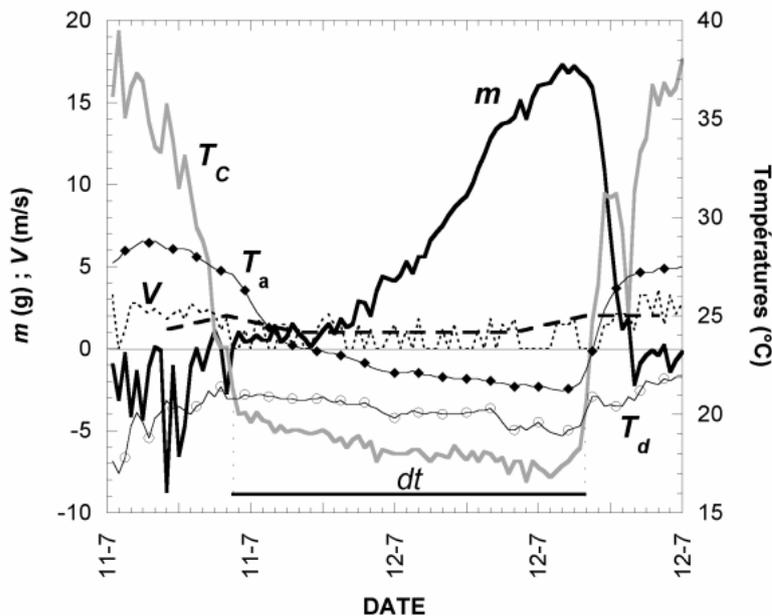


Fig. I.3. Nuit typique de mesure continue de rosée sur la balance (Université de Polynésie Française, 11-12 juillet 2005) ; Irrégularités observées sur la masse dues au vent.

Ce système est l'une des toutes premières expériences menées pour l'étude du gisement de rosée. Son principal avantage est de donner la variation de la condensation au cours du temps en fonction des différents paramètres météorologiques. Il a aussi servi de référence en étant installé en parallèle de pilotes de grande taille mais dont la mesure était un cumul de rosée sur toute la nuit car uniquement relevée au matin. Surtout, il permet de visualiser simplement le phénomène de condensation. Ainsi, si la vitesse de vent et la couverture nuageuse sont faibles, la masse d'eau condensée augmente dès l'instant où la température de surface du condenseur devient inférieure au point de rosée (Figure I.3).

iii. Rendement théorique

L'ordre de grandeur de l'humidité absolue naturelle s'échelonne de 4 à 22 g par mètre cube d'air humide, la plupart des centres de population présentant des valeurs entre 5 et 10 g m⁻³ (Wahlgren, 2001). L'humidité absolue moyenne dans des régions présentant de faibles précipitations (moyenne annuelle inférieure à 300 mm) s'échelonne par exemple de 4,0 g m⁻³ à Las Vegas (Nevada, USA) à 21,2 g m⁻³ à Djibouti (République de Djibouti, extrême Est africain). Le rendement maximum théorique qui peut être espéré par refroidissement radiatif est voisin de 0,8 L m⁻² étant donné que la puissance disponible pour le refroidissement est de l'ordre de 25 à 150 W m⁻² (En tenant compte d'une chaleur latente de condensation de l'eau de 2,5 kJ g⁻¹ à 20°C), selon Beysens (2006b). Remarquons que le terme de « rendement maximum théorique » h_{max} (mm ou L/m²) est déterminé pour une puissance radiative arbitraire et sa valeur réelle variera donc en fonction du lieu géographique et du rayonnement IR atmosphérique incident. Le terme de « rendement » devrait être réservé à une grandeur sans dimension h (mm) / h_{max} (mm). Par soucis de simplification et faute de standard h_{max} , la grandeur h (mm) sera nommée rendement de rosée au long de cet ouvrage.

I.2 Rayonnements, modèles de ciel et refroidissement radiatif

La condensation de vapeur d'eau atmosphérique en environnement extérieur (rosée) apparaît essentiellement pour des conditions de ciel nocturne clair, lorsque le sol est refroidi par échange radiatif avec le ciel. Ce refroidissement s'explique par l'émission par la surface (source chaude : sol, brin d'herbe, condenseur) d'une puissance radiative supérieure au rayonnement reçu de l'environnement (donc du ciel, source froide). Il en résulte une dissipation de chaleur qui abaisse la température du corps rayonnant. Les technologies mises en œuvre ici tendent à optimiser ce phénomène naturel afin d'en tirer le meilleur parti.

Les puissances de refroidissement disponibles sont inversement proportionnelles à l'intensité du rayonnement atmosphérique incident à la surface du globe. Dans un premier temps, il convient donc de présenter les intensités spectrales du rayonnement solaire d'une part, ainsi que de nature infrarouge thermique d'autre part. La source, la nature et les modèles descriptifs propres à chacun de ces spectres sont détaillés en Annexe A-I.1. De ces propriétés du rayonnement incident découleront les conditions à mettre en œuvre afin d'exploiter le refroidissement radiatif de surfaces. Ces conditions seront à la base des propriétés optiques incluses au cahier des charges de nos futurs matériaux dédiés à ces applications.

I.2.1 Rayonnements incidents, modèles de ciel

La Figure I.4 présente les spectres standards composant le rayonnement incident reçu du ciel au niveau du sol : rayonnement solaire (a) et IR (b).

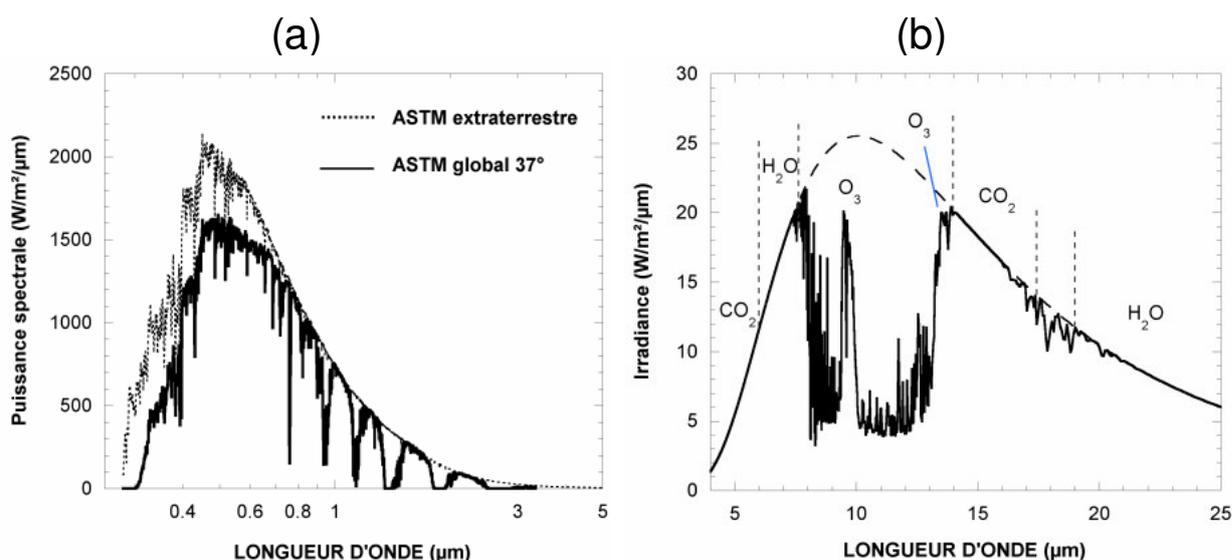


Fig. I.4. (a) trait plein : rayonnement global reçu au niveau de la mer sur un plan incliné de 37° pour des longueurs d'onde de 0,280 à 4,0 μm selon le standard ASTM G173-03. Pointillés : spectre solaire extraterrestre selon le standard ASTM G173-03. (b) caractéristiques spectrales du rayonnement IR reçu du ciel clair par un plan horizontal (calcul MODTRAN en atmosphère standard US 1976), avec indication des bandes d'émission des principaux gaz contributeurs de ce spectre.

i. Rayonnement solaire

Le spectre solaire idéal reçu en haute atmosphère (trait pointillé Figure I.4a, équivalent à l'émission d'un corps noir à 5777 K) est atténué par l'atmosphère avant de parvenir au niveau de la surface terrestre (ASTM global, Fig.I.4a). Différents modèles ou systèmes de mesure

permettent d'évaluer cette atténuation du spectre à travers l'atmosphère (se reporter à l'Annexe A-I.1). La Figure I.4a est un standard largement reconnu du rayonnement global reçu au niveau de la mer sur un plan incliné de 37° pour des longueurs d'onde de 0,280 à 4,0 μm (standard ASTM G173-03 ; Geymard *et al.*, 2002). Le spectre solaire est généralement considéré comme composé de trois bandes spectrales UV (0,20- 0,38 μm) ; Visible (0,38 - 0,78 μm) ; Proche IR (0,78 - 4,5 μm). La puissance totale reçue au niveau du sol est considérée égale à $994,4 \text{ W m}^{-2}$ dans les conditions du standard.

ii. Rayonnement thermique IR de grandes longueurs d'onde

La Fig.I.4b représente le rayonnement atmosphérique aux grandes longueurs d'onde (Moyen IR, Lointain IR) est émis par la surface et l'atmosphère terrestres en fonction de la température de chaque élément les composant. Pour les températures ambiantes observées de jour comme de nuit à la surface de la Terre, les vibrations propres à chaque liaison chimique (donc propres à chaque matière en fonction de ses arrangements moléculaires) émettent un spectre IR idéal centré autour d'un maximum d'émission aux environs de 10 μm de longueur d'onde. En fonction de la composition de l'atmosphère, les caractéristiques du spectre rayonné par le ciel au niveau du sol peuvent être modélisées par des modèles empiriques, semi empiriques ou calculatoires. Le spectre présenté sur la Figure I.4b est obtenu par le modèle calculatoire MODTRAN (voir le paramétrage standard en Annexe A-I.1). La puissance IR alors rayonnée par l'atmosphère est de $295,6 \text{ W m}^{-2}$; les composants gazeux les plus radiatifs sont indiqués sur le spectre pour leurs longueurs d'onde d'émissivité maximales.

iii. Mesure expérimentale des rayonnements solaire et IR

Nous possédons au laboratoire un ensemble de 4 radiomètres montés sur un même bloc. Deux pyranomètres CM3, Kipp & Zonen sont montés en sens opposé, l'un face au ciel, le second vers le sol. Ils mesurent chacun dans leur demi-espace la radiance globale (intégrée) sur la bande 0,3 - 3 μm ; il permet de mesurer en continu la puissance solaire reçue au sol ainsi que l'albédo du sol ou d'un matériau choisi et placé sur un support entre le sol et la cellule de mesure. Deux pyrgéomètres CG3, Kipp & Zonen mesurant dans la bande 5 - 50 μm des grandes longueurs d'onde thermiques sont aussi placés dans une configuration opposée sur le bloc. Selon Oliveti *et al.* (2003), la mesure sur la bande 4-50 μm minore d'environ 3% la radiance sur la totalité du spectre de 4 à 100 μm , ce qui est considéré comme négligeable.

I.2.2 Refroidissement radiatif nocturne, climatisation passive diurne

Le refroidissement radiatif s'appréhende très simplement comme le bilan des énergies émises et reçues par un corps. Ce corps reçoit le rayonnement solaire des courtes longueurs d'onde (UV-Vis-PIR, trait fin sur la Figure I.5, soit $994,4 \text{ W m}^{-2}$) ainsi que le rayonnement atmosphérique des grandes longueurs d'onde (Moyen et Lointain IR, trait épais, soit $295,6 \text{ W m}^{-2}$). Une fraction variable du rayonnement reçu est absorbée tandis que l'autre est réfléchi. Le même corps peut émettre par rayonnement IR un maximum d'énergie équivalent à celle émise par un corps noir de même température (exemple : $288,1 \text{ K}$, gris foncé sur la figure ; $303,1 \text{ K}$, gris clair). Si l'énergie émise est supérieure à l'énergie absorbée, il y a refroidissement radiatif.

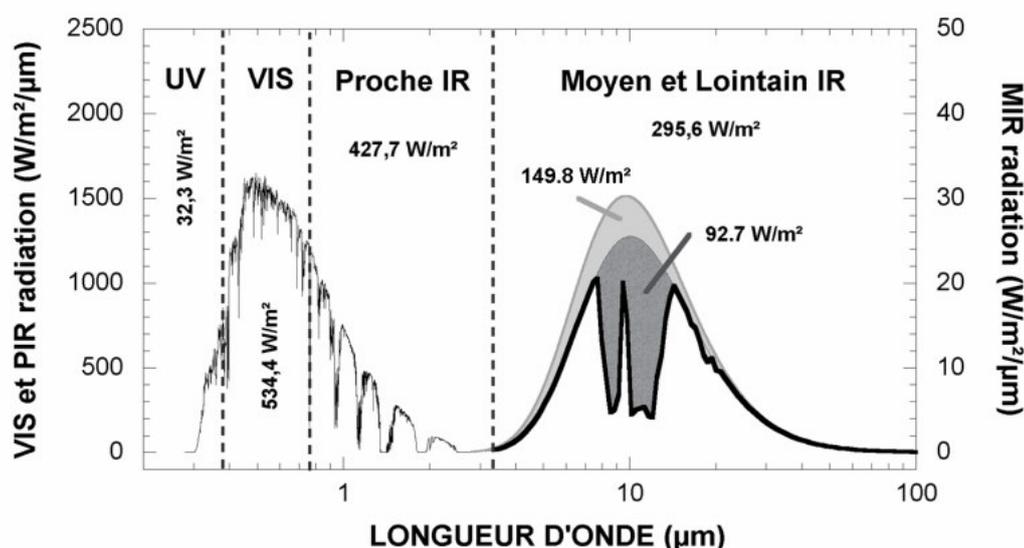


Fig. I.5. Trait fin, rayonnement solaire incident (ASTM G173-03). Trait gras, spectre Infrarouge incident à la surface du globe (spectre lissé, modèle MODTRAN pour des conditions 1976 US Standard Atmosphere, $288,1 \text{ K}$). Les puissances reçues (intégration du spectre) pour chaque composante du spectre sont indiquées en W m^{-2} .

Trait gris foncé, émittance d'un corps noir ($288,1 \text{ K}$) ; trait gris clair, émittance d'un corps noir ($303,1 \text{ K}$). Les surfaces grises correspondent au bilan thermique IR de ces corps noirs exposés en extérieur. Il y a dissipation respectivement de $92,7 \text{ W m}^{-2}$ (corps $288,1 \text{ K}$) et $149,8 \text{ W m}^{-2}$ (corps $303,1 \text{ K}$).

L'énergie radiative globale reçue au niveau du sol de jour représente 1290 W m^{-2} (somme des rayonnements UV, VIS, PIR, MIR et LIR). La première composante est le rayonnement solaire qui se décompose en rayonnements UV, Visible et Proche IR représentant respectivement $2,5 \%$; $41,4 \%$ et $33,2 \%$ du rayonnement global. De jour (pour une

température ambiante de 15°C), l'émission IR du ciel (Moyen et Lointain IR) représente 22,9 % de l'énergie totale reçue avec 295,6 W m⁻². De nuit, ce même rayonnement représente 100 % de l'énergie reçue.

Nous avons vu que l'essentiel du déficit d'émissivité du ciel s'observe dans la bande spectrale nommée « Sky Window » qui apparaît sur la Figure I.5 aux environs de 10 µm. A température ambiante, le spectre d'émission d'un corps noir possède son maximum dans la même « sky window ». C'est pourquoi un matériau d'une grande émissivité sur cette bande spectrale peut dissiper d'importantes quantités d'énergie par transfert radiatif qui se fait de la source chaude (le matériau radiatif à température ambiante), vers la source froide (le ciel auquel on attribue une température équivalente T_s inférieure à T_a , se rapporter à l'Eq. A.I(2).

A une température de 15°C, un corps noir émet 388,3 W m⁻². Face au ciel et pour une atmosphère standard à 15°C, ce corps noir dissipera une puissance proche de 93 W m⁻² par rayonnement IR (énergie calculée par intégration selon les longueurs d'onde de la surface représentée en gris foncé sur la courbe Figure I.5). Cette dissipation lui permet de se refroidir sensiblement sans apport d'énergie ; il s'agit du refroidissement radiatif.

Le même corps noir porté de jour à 25°C par le rayonnement solaire émet 445,4 W m⁻². Pour $T_a = 15^\circ\text{C}$ il dissipera alors près de 150 W m⁻² en IR (surface représentée en gris clair sur la courbe Figure I.5), ce qui lui permet en pratique de limiter sensiblement son échauffement. Le refroidissement radiatif est alors qualifié de climatisation passive car il permet d'abaisser la facture énergétique pour la climatisation d'un bâtiment par exemple ; il est théoriquement envisageable d'abaisser la température en dessous de la température ambiante.

i. refroidissement radiatif nocturne

De nuit, de grandes surfaces telles que des toitures peuvent être refroidies de 1 à 10 degrés en dessous de la température ambiante par dissipation d'une énergie radiative de l'ordre de 60 à 100 W m⁻² par ciel clair (Berdahl, 1995). Différentes applications mettant en œuvre ce principe sont étudiées. En certains lieux arides ou en déficit hydrique, de nombreuses études sont menées afin de quantifier la quantité de vapeur d'eau atmosphérique condensable et récupérable sur de telles surfaces froides (Nilsson, 1994, 1996 ; Muselli *et al.*, 2002, 2006a; Beysens *et al.* 2003, 2005a, 2007ab; Berkowicz *et al.*, 2004 ; Sharan *et al.*, 2007). Des applications de climatisation nocturne par refroidissement de la masse disponible des éléments de construction sont étudiées en ingénierie de l'habitat (Parker, 2005 pour le U.S. Department of Energy).

De nuit, le rayonnement solaire direct incident est absent (UV, VIS et proche IR). La couleur et l'absorption des matériaux radiatifs sur cette plage spectrale 0,2-3,5 μm n'ont donc pas d'incidence sur l'efficacité du condenseur (ou corps rayonnant). Des mesures expérimentales effectuées sur des condenseurs fins et isolés sur leur face inférieure (qui seront détaillés ultérieurement) ont montré une réponse rapide dès la disparition du rayonnement solaire direct. Bien évidemment, des matériaux à inertie thermique importante seront moins efficaces s'ils sont absorbants (teinte foncée). Les corps rayonnants doivent présenter une émissivité maximale sur la « fenêtre atmosphérique » ou bande spectrale 7,5 – 13,5 μm .

ii. climatisation passive diurne, atténuation de l'effet « îlot de chaleur » urbain

De jour, un matériau peut limiter sensiblement son échauffement en cumulant une importante réflectance de l'énergie solaire (rayonnement UV, visible et proche IR) avec une grande émissivité sur la « sky window » plus le moyen IR. En s'en tenant aux valeurs données Figure I.5, un corps rayonnant peut théoriquement se refroidir si sa réflectance du rayonnement solaire dépasse une valeur de 0,907 pour une émissivité de 1 sur le moyen IR. Dans ces conditions, les 92,7 W m^{-2} dissipés par rayonnement IR équilibrent les 9,3 % des 994,4 W m^{-2} de rayonnement solaire incident absorbés par la surface et la température du matériau se stabilise à T_a . La Figure I.6 fait apparaître les trois composantes radiatives (incidente, réfléchie et émise) incluses dans le bilan de la climatisation passive.

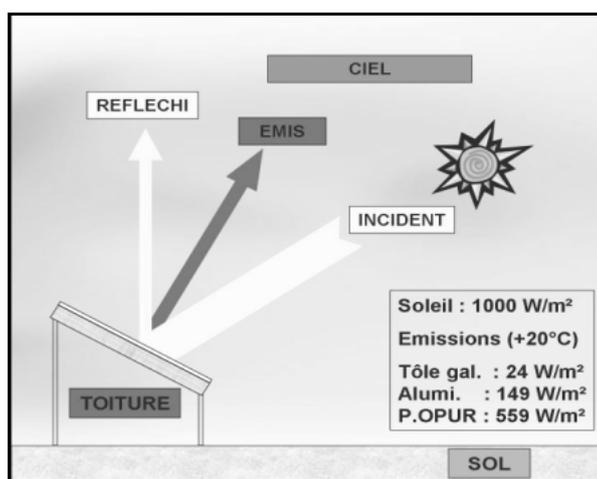


Fig. I.6. Représentation du phénomène de climatisation passive. Des grandeurs indicatives du rayonnement IR dissipée du corps rayonnant (source chaude) vers le ciel (source froide) sont données pour trois matériaux : Tôle galvanisée neuve, Aluminium et peinture expérimentale à haute émissivité formulée par nos soins (voir Chapitre I.3). Les matériaux sont considérés soumis à un rayonnement solaire de 1000 W m^{-2} et à une température 20 °C supérieure à la température moyenne observée en atmosphère tropicale de 27 °C (Polynésie Française).

La dissipation radiative est d'autant plus importante qu'elle est proportionnelle à la température de la surface. Or, bien souvent en pratique, il ne s'agit pas de refroidir des surfaces mais de limiter leur échauffement. En zones urbaines notamment, l'échauffement des matériaux de construction et du bitume sombre provoque une augmentation de la température météorologique mesurée sur de très grandes superficies de l'ordre de 1 à 3 °C. Une équipe de recherche américaine le « Heat Island Group » (Lawrence Berkeley National Laboratory), estime par exemple que 5 à 10 % de la consommation électrique de Los Angeles en période estivale est due aux climatiseurs pour faire face à cette hausse (Berdahl and Bretz, 1997 ; voir de même <http://eetd.lbl.gov/coolroof/>). Une méthode simplifiée est proposée par cette équipe afin d'estimer et de comparer le Gain Maximal en Température (*GMT*) par rapport à la température ambiante, mesurable pour différents matériaux de toiture. Le *GMT* est fonction des propriétés optiques du matériau (réflectance visible R_{vis} , émissivité IR ε) ; des valeurs de *GMT* sont données à titre d'exemple dans le Tableau I.1 :

$$(1 - R_{vis})I_0 = (h_c + h_r)GMT + h_r(T_s) \quad \text{I.(21)}$$

R_{vis} est la réflectance du spectre solaire

I_0 est le flux solaire incident, considéré égal à 1000 W m^{-2}

$h_r = 6,1 \varepsilon_i \text{ (W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}\text{)}$, coefficient de transfert de chaleur radiatif ; ε_i est l'émissivité sur le spectre thermique de l'élément considéré (matériau étudié ε_{mat} ou ciel ε_s généralement pris tel que $T_s = T_a - 10 \text{ °C}$)

$h_c = 12,4 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ coefficient de transfert de chaleur convectif, la valeur retenue pour cette approximation est issue de manuels d'ingénierie en transfert thermique.

Soit la valeur approchée du *GMT* :

$$GMT(\text{°C}) = \frac{(1 - R_{vis})1000 - 6,1(\varepsilon_s)}{12,4 + 6,1(\varepsilon_{mat.})} \quad \text{I.(22)}$$

Description	Reflectance spectre solaire $0 < R_{vis} < 1$	Emissivité IR $0 < \epsilon_f < 1$	GMT (°C)
Bardage asphalte «generic black»	0,05	0,91	52,6
Peint. rouge brique, 2 couches	0,16	0,91	46,5
ciment brut, fibrociment	0,25	0,90	41,6
Acier galvanisé neuf	0,61	0,04	30,4
Peint. Blanche, 0,203 mm	0,80	0,91	10,6
Peint. Blanche, 0,508 mm	0,85	0,91	8,1

Tab. I.1. Estimation des températures maximales atteintes par différents matériaux de couverture standard : $T_{max} = T_a + GMT$ (°C). Calcul suivant l'Eq. I.(21) pour $T_a=15$ °C ; $T_s=5$ °C et $\epsilon_s=0,868$

La Figure I.7 montre la puissance intégrée émise (dissipée) par des corps noirs faisant face à un ciel standard ($T_a = 15$ °C, $RH = 80$ %). Les exemples choisis pourraient se retrouver en conditions réelles : Conditions de condensation pour un corps de température T_a-5 °C (trait pointillé), ou climatisation passive pour un corps à T_a+15 °C (trait plein). L'observation de ces courbes permet de se représenter les gains ou pertes d'efficacité que confère l'absorption pour chaque longueur d'onde de rayonnement et sera utile pour guider la formulation de matériaux.

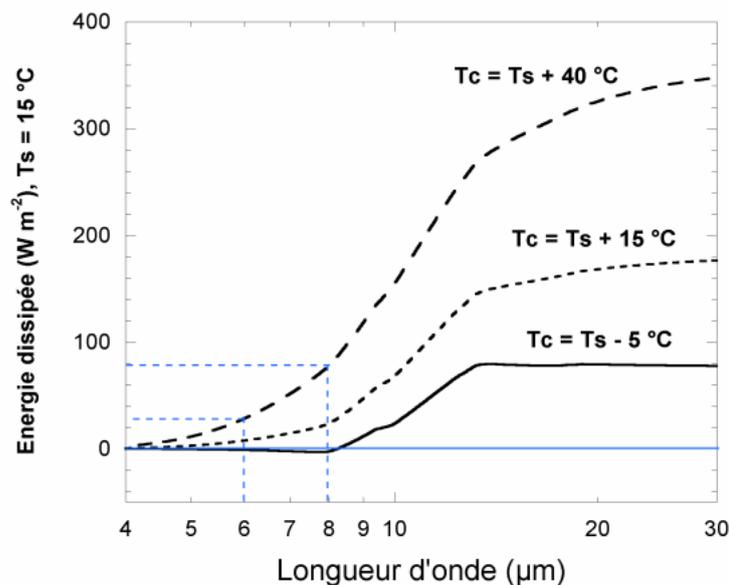


Fig. I.7. Représentation des puissances IR radiatives dissipées par un corps noir recevant le rayonnement d'un ciel à $T_s = 15$ °C en fonction de la longueur d'onde et de sa température T_c .

I.3 Formulation de matériaux radiatifs dédiés à la climatisation passive et à la condensation de vapeur d'eau atmosphérique

Nous avons vu que la propriété physique nécessaire aux matériaux pour des applications de refroidissement radiatif est une émissivité IR maximale sur la « sky window ». Pour la condensation et récupération par gravité de vapeur d'eau atmosphérique, s'ajoute le caractère hydrophile de la surface du matériau. Enfin, s'il doit être utilisé en climatisation passive diurne, le matériau doit présenter une réflectivité maximale des spectres visible et proche IR. Préalablement à la formulation de matériaux dédiés, une recherche très large de matériaux commerciaux existants a été menée en vue de l'équipement d'une toiture pilote en Croatie (se reporter au Chapitre IV). A ce stade, il est utile de préciser que certains matériaux s'avèrent intéressants pour une application en condensation de rosée, mais que leur coût important (généralement supérieur à 20 € m⁻²) en exclut l'emploi sur de très grandes surfaces en regard des volumes d'eau obtenus, notamment bien sûr pour un usage en régions arides pauvres de pays en voie de développement. Ces tests ont conclu à la nécessité d'élaborer des matériaux à très bas coût et suivant un cahier des charges précis dédié à ces usages en condensation et climatisation passive.

Les matériaux radiatifs composites formulés dans nos travaux sont principalement une base polymère pouvant être optiquement neutre (à l'exemple du Polyéthylène basse densité, LDPE, qui est transparent sur la « sky window »), mais choisie en fonction du mode de production, d'installation et des propriétés mécaniques souhaitées. Des charges minérales et des additifs y sont incorporés afin de lui conférer ses propriétés radiatives, réfléchives et de surface. Les différentes lois physiques impliquées dans les transferts radiatifs au sein de matériaux polymères composites (aussi appelées théorie 4 flux des transferts radiatifs, Nilsson, 1994) apparaissent sur la Figure I.8.

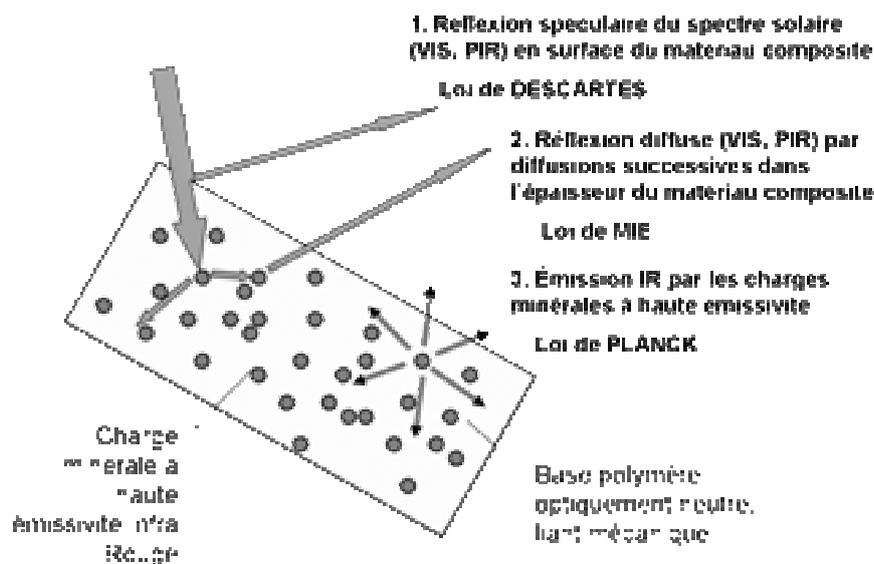


Fig. I.8. Représentation des phénomènes physiques impliqués dans les transferts radiatifs d'un matériau polymère composite : Réflexion spéculaire en surface (Descartes), réflexion diffuse dans l'épaisseur (Mie), Emission dans l'épaisseur du matériau (Planck).

Il ne s'agira pas ici de détailler les lois physiques déjà largement explicitées, cependant une bonne compréhension de ces phénomènes radiatifs à partir des travaux déjà réalisés a été le préalable à cette étude de matériaux afin d'estimer ce qu'il est possible de développer.

Ensuite, les expériences précédentes de condensation de rosée artificielle menées dans différentes régions du monde ont permis une définition transversale très large d'un cahier des charges pour la mise au point de matériaux finis pour une application aux systèmes réels et répondant en l'état à un marché potentiel important.

Enfin, il a été nécessaire de se pencher sur les procédés industriels et la disponibilité des composants souhaités afin de garantir une future production à des coûts raisonnables ainsi que des propriétés mécaniques satisfaisantes pour des applications réelles.

Cette recherche et ce développement de formulations innovantes dédiées au refroidissement radiatif de surfaces se sont appuyés sur trois objectifs : rayonnement théorique et possible mise en œuvre de matériaux radiatifs / expériences in situ, redéfinition des besoins / limites données par la mise en œuvre industrielle des matériaux.

Les paragraphes suivants présenteront les différents aspects de cette recherche de matériaux, les recherches préalables, la stratégie de recherche élaborée ainsi que les propriétés finales des matériaux (propriétés radiatives et propriétés mécaniques, mesurées en laboratoires et en extérieur). En revanche, la protection des formulations sous le régime des

brevets garantissant leur propriété intellectuelle étant en cours, elles seront tenues confidentielles et non explicitées dans ce document.

I.3.1 Solutions connues à la fabrication de matériaux radiatifs ou aux propriétés optiques sélectives

i. Films polymères

En 1989, un brevet est déposé en Grande Bretagne (Graham Allan Stevens, 1989) afin de revendiquer la propriété intellectuelle sur des systèmes de condensation de vapeur d'eau atmosphérique sur une surface refroidie par rayonnement. Les systèmes proposés sont constitués d'un corps rayonnant à forte émissivité sur la bande 8 – 13 μm , isolé sur sa face inférieure et exposé au ciel derrière un écran transparent à l'Infrarouge. La fonction de cet écran est de limiter l'apport de chaleur à proximité de la surface du corps rayonnant. Ce système comporte une ventilation afin de garantir l'apport en vapeur d'eau et préconise des matériaux rigides ou des films souples variés ainsi que de la peinture chargée de dioxyde de titane TiO_2 comme corps rayonnant.

T.M.J. Nilsson dans son travail de thèse (1994) a décrit la mise au point de films polymères réfléchissant le rayonnement visible (blancs opaques) et présentant une forte émissivité du rayonnement Infra Rouge thermique dans la bande ciblée 8-13 μm . Il décrit l'élaboration d'un film plastique blanc opaque d'environ 390 μm d'épaisseur. La matrice choisie est le Polyéthylène basse densité (LDPE, 92 % en volume) chargée de 2% en volume de Sulfate de Baryum BaSO_4 (diamètre moyen 0,8 μm) et de 5% en volume de dioxyde de Titane TiO_2 (diamètre 0,19 μm). 1 % en volume d'additif de type « tensioactif » surfactant alimentaire insoluble est incorporé afin de rendre la surface hydrophile et de faciliter la dispersion des charges minérales. Ce matériau produit à titre expérimental avait le défaut de n'être pas protégé des UV, ce qui entraîne une dégradation au bout de 12 à 24 mois d'exposition en extérieur (durées observées sur le site d'Ajaccio, Muselli *et al.*, 2002). L'émissivité infrarouge sur la bande 8 – 13 μm a été mesurée égale à 0,89 et égale à 0,91 sur l'ensemble de la bande d'émission d'un corps noir à 288,1 K. Sa réflectance du spectre solaire (visible et proche IR) est de 0,84.

Les valeurs obtenues ne permettent pas d'envisager un refroidissement diurne de la surface par rapport aux conditions données au Chapitre I.2. En conditions nocturnes, le film

fut testé pour la condensation à Kungsbacka en Suède (niveau de la mer, septembre – octobre 1993) et à Dodoma (Tanzanie, altitude 1100 m, mois de novembre 1993). Le meilleur rendement en rosée sur la période était de 0,207 mm en Suède et de 0,124 mm à Dodoma.

Des films à base de polyoléfines et présentant des propriétés optiques sélectives continuent à être développés, notamment par la recherche de nouveaux pigments (Vargas *et al.*, 2000). Certains films sélectifs sont déjà utilisés en agriculture, tendus en serres et tunnels. Dans le premier cas, il s'agit de favoriser la croissance des plantes ce qui revient à conserver une transparence maximale pour le rayonnement visible (0,4 à 0,8 μm) permettant la photosynthèse. Dans un deuxième temps, il est important de réguler la température intérieure en limitant le refroidissement radiatif nocturne du sol. Des additifs sont donc incorporés pour augmenter l'absorbance du rayonnement IR tout en préservant une importante transmittance du rayonnement visible (Pied, 1978). D'autre part, des mélanges de charges minérales (particules d'aluminium, mica, calcium carbonate, talc et kaolin) ont été formulés afin de réfléchir le rayonnement proche Infrarouge (0,8 – 1,5 μm) et de limiter l'échauffement diurne. Ces mêmes mélanges permettent de diffuser le rayonnement solaire direct qui peut brûler les cultures (Kieser *et al.*, 2002). Enfin, un dernier type de films polyoléfine pour tunnels est teinté blanc diffusant (par ajout de TiO_2) pour un usage en hangar ou bergerie. Il s'agit d'un film LDPE dont la durée de garantie est de 7 ans. L'échantillon provient d'une installation en place depuis 12 ans. Sa réflectance au spectre solaire (0,28 – 2,5 μm) est de 0,71 pour une émissivité intermédiaire en moyen IR (bande 1,4 – 33,2 μm) $\epsilon^* = 0,89$ mais de seulement $\epsilon^* = 0,81$ sur la bande 8-13 μm . La définition de l'émissivité intermédiaire (ϵ^*) sera précisée plus bas au Chapitre I.4.1. D'autres membranes commerciales aux propriétés optiques sont produites pour usage en extérieur. Nous avons testé des bâches et toiles de constructions démontables de couleur blanche (membranes tissées précontraintes de marque FERRARI). Les propriétés optiques sont satisfaisantes, mais les impératifs de résistance mécanique imposent des procédés de fabrication très onéreux (de l'ordre de 30 – 40 € m^2).

Une autre application de surfaces aux propriétés optiques sélectives concerne le contrôle thermique des satellites. En effet, dans le vide spatial le transfert thermique est exclusivement de type radiatif. Le satellite s'échauffe par absorption du rayonnement solaire et par échauffement des composants électroniques internes. La régulation de température interne se fait au niveau de son enveloppe par la mise en place de films réflecteurs (essentiellement métalliques) ou de surfaces radiatives, peintures, films polymères (Stuckey and Meshishnek,

2003 ; Baturkin, 2005). Des films de Tedlar, Mylar ou Téflon de couleur claire sont utilisés dans le but de réfléchir le rayonnement visible et de dissiper la chaleur par rayonnement IR. Cependant les conditions extrêmes du milieu spatial (écarts thermiques, rayonnement UV intense) en font des matériaux de haute technologie au coût élevé. Les mêmes contraintes s'imposent aux peintures à usage spatial, où les peintures de type silicone sont privilégiées malgré des coûts élevés.

ii. Peintures

Différents travaux ont porté sur la formulation de peintures aux propriétés optiques sélectives. Certaines peintures augmentant le refroidissement diurne de surface contiennent des additifs afin de réfléchir la bande proche IR (0,78 – 4,5 μm) qui représente 43 % du spectre solaire total (Figure I.5). Ce type de formulations se trouve le plus souvent sur des brevets (exemple : « Near-infrared reflecting composite pigments », United States Patent 6521038). Tout récemment, une formulation a été brevetée afin d'augmenter l'émissivité de la peinture sur la « fenêtre atmosphérique » par l'introduction de charges de silice creuse (environ 50 μm de diamètre) de type « hollow sphere » (Wojtysiak, 2002). L'inventeur présente une réflectance du spectre solaire supérieure à 0,80, voir 0,84. Les valeurs d'émissivité IR sont données supérieures à 0,85 ; 0,90 ; voir 0,95 en fonction des différentes formulations préconisées.

iii. Etat de surface, propriétés de mouillage

En ce qui concerne l'état de surface, il est possible de conférer à des objets une surface hydrophile par dépôt, ce qui est généralement utilisé afin de leur conférer des propriétés « antibuée ». La buée ne se forme pas en gouttelettes mais sous forme de film qui est alors quasi invisible. Par exemple, un brevet a été déposé pour le dépôt d'oxydes métalliques et de précurseurs solvantés à base de silice et qui, par photocatalyse, vont créer un film hydrophile (Hayakawa and Mitsuyoshi, 2000). Pour des films polymères de grande surface, un additif de type tensioactif est généralement incorporé lors de l'extrusion. Au cours de l'extrusion à chaud, les molécules vont migrer en surface du film. Des procédés plus onéreux, par décharges électrostatiques (procédé corona) ou de traitement par flamme permettent de rendre la surface hydrophile pour faciliter son impression ultérieure.

Peu de peintures sont développées en vue de présenter une surface hydrophile. Dans le cas général, les peintures extérieures incluent des composés fluorés leur conférant une surface hydrophobe sensée être moins salissante aux dépôts de poussières et à la pollution. La société japonaise ISAMU PAINT CO.LTD (<http://www.isamu.co.jp>) a toutefois mis au point une peinture innovante pour bâtiments, à la surface hautement hydrophile : la « NEO SILICA 21C ». A sec, les poussières offrent une adhérence supérieure sur ce support. Cependant en cas de pluie, l'eau par capillarité mouille la surface et emporte les poussières en lavant la surface. Des échantillons de cette peinture ont été testés au cours de cette thèse.

I.3.2 Nouveaux matériaux innovants : cahier des charges et choix des technologies pour les applications aux systèmes réels

Les matériaux existants pour d'autres applications peuvent être améliorés, le but étant de conjuguer les propriétés radiatives et de mouillage. La nécessité de développer cette technologie sur de larges surfaces et pour des zones arides pauvres et peu développées technologiquement a amené à la formulation de matériaux radiatifs innovants dédiés à la condensation de rosée. Dans le même temps, la mise au point des matériaux est étendue à une utilisation de jour pour la climatisation passive de bâtiments et structures. Un matériau radiatif performant doit ainsi répondre aux critères suivants :

Propriétés optiques sélectives

- Emissivité IR maximale (proche de celle du corps noir) sur l'ensemble des bandes spectrales du moyen IR (3 – 50 μm). Pour le refroidissement nocturne, l'émissivité du corps rayonnant sur la « fenêtre atmosphérique » (8 – 13 μm) est suffisante. Cependant la Figure I.7 montre qu'en étendant la bande de 8 à 6 μm , le refroidissement perd seulement 1,9 W m^{-2} d'efficacité pour un matériau à $T_c = T_s - 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Mais de jour, le même matériau chauffé à 40 $^\circ\text{C}$ au-dessus de la température ambiante dissipera 50,4 W m^{-2} de plus (soit un gain de 16,4 %) en étendant sa propriété de corps noir de 8 à 6 μm .
- Reflectance maximale du spectre solaire (UV-VIS-PIR, de 0,2 à 4,0 μm , voir Figure I.5) dans le cas où le refroidissement passif diurne est souhaité (se reporter au Chapitre I.2.2).

Propriétés nécessaires pour ces applications

La surface doit être hydrophile (condition nécessaire) pour favoriser la nucléation et la récupération par gravité d'eau liquide. La condensation en film favorise l'écoulement et la récupération de l'eau condensée (se reporter au Chapitre I.1.1).

Les matériaux doivent résister à la photo dégradation sous l'action du rayonnement ultraviolet (UV) et à l'abrasion (applications en extérieur et en toitures ou au sol).

Les composants doivent être agréés pour être en contact avec des produits alimentaires car l'eau récoltée est destinée à être consommée. Bien qu'il n'y ait pas stagnation de l'eau, son écoulement ne doit pas dissoudre ou entraîner de composés toxiques.

Propriétés nécessaires au transfert de ces technologies auprès des populations

Le prix de revient des matériaux doit être très bas afin de pouvoir être mis en œuvre sur de grandes surfaces. Et ce d'autant plus que le développement de ces systèmes se fera dans un premier temps dans le contexte socio-économique brièvement décrit en introduction de ce travail. Dans le cas où la propriété blanche opaque n'est pas nécessaire (pas d'application diurne), il est possible d'en rester à des formulations blanches diffusantes ou incolores afin d'économiser le dioxyde de titane TiO_2 qui est cher. De plus, cela permet de diminuer l'épaisseur du matériau et d'en réduire le coût par économie de matière : d'environ 0,400 mm pour être blanc opaque (Nilsson, 1994), il est envisagé de passer à 0,200 mm ce qui correspond aux standards agricoles. Un objectif raisonnable est de prévoir des matériaux pour un prix à la fabrication compris de 0,5 à 1 € m^{-2} en Europe et pour une durée de vie voisine de 5 ans.

Les matériaux produits doivent être robustes et mis en œuvre de manière simple dans des régions où la pénétration de nouvelles technologies est lente en raison de l'isolement et du manque de moyens humains et matériels sur place. Des films et des peintures seront préférés. Il faut en effet apporter une solution pour des structures dédiées (condenseurs au sol, utilisation de film plastique) ou bien en équipement de structures existantes (toitures de tôle, tuiles, fibrociment...). De plus, certaines populations (à l'exemple des habitants des îles touristiques de Croatie) souhaitent conserver l'aspect visuel du site (tuiles de terre cuite dans ce cas). Il est donc utile de proposer également des matériaux incolores.

Enfin, autant que possible, les formulations devront faire appel prioritairement à des composants commerciaux largement utilisés dans la production de polymères et bien distribués.

I.3.3 Procédé industriel : choix des bases et des charges minérales

i. Bases et liants polymères

Films

Nous devons proposer la formulation d'un mélange d'additifs et de charges minérales pouvant être incorporés à chaud dans un liant polymère en vue de la fabrication de films plastiques. Les charges minérales incorporées ici sont largement utilisées comme « extender » dans l'ensemble de l'industrie des thermoplastiques (films, moulage, extrusion, soufflage...). Leur fonction est multiple, abaisser le coût du produit fini (moins cher que le polymère), ajuster les propriétés mécaniques aux besoins... Nous avons effectué les tests sur une base LDPE Lacqtene FE 8000 (ATOFINA) autorisée pour usage au contact de produits alimentaires et pour application en extrusion soufflée. Le LDPE est peu coûteux et très répandu dans l'industrie des films plastiques, mais les mêmes formulations peuvent être incorporées dans tous les polyoléfines (Polyéthylène haute densité HDPE, LDPE, Polypropylène PP) ainsi que (poly)chlorure de vinyle PVC, Polyuréthane PU, éthylène-acétate de vinyle EVA. De même, les mêmes charges peuvent être incorporées au cours d'autres procédés de fabrication (extrusion de plaques Polycarbonates, PVC ou Polystyrène PS...).

Peintures

Les mêmes charges minérales sont fréquemment utilisées comme « extender » dans l'industrie des peintures. En fonction du traitement (ou « coating ») qui leur est appliqué industriellement, elles peuvent être incorporées dans des peintures solvantées, à base eau ou dans des résines bi-composants de type uréthane ou époxy afin de leur conférer une haute émissivité infrarouge et une surface hydrophile. Les peintures (liant et solvant commercial) permettent une application sur une grande variété de supports. Cette formulation de peinture radiative a été testée dans des bases acryliques, glycérophtaliques, polyuréthane bicomposant. Un contact avec le groupe Akzo-Nobel France nous a permis d'obtenir certaines bases de peintures (marque Trimetal) avant ajout d'opacifiant afin d'élargir la gamme des tests. Il n'y a pas de problème a priori pour appliquer ces formulations à d'autres résines, à condition de choisir la charge traitée de manière à se disperser efficacement dans la base en question (eau ou solvant pétrolier). Les bases pour usage en extérieur d'aspect final « brillant » se prêtent le

mieux au mélange pour cet usage. Hors laboratoire, les charges minérales formulées peuvent être incorporées à l'aide d'un malaxeur monté sur perceuse, ce qui peut être fait sur le site même.

ii. Additifs fonctionnels

Additif « anti-UV » (prévention du vieillissement par photo-dégradation)

Pour la fabrication de films thermoplastiques, de nombreux additifs anti-UV sont proposés par les industriels. Il s'agit pour notre usage d'utiliser les produits commerciaux les plus appropriés et dans les proportions indiquées par le fabricant en fonction de la base polymère utilisée. Pour nos essais de films LDPE, un additif industriel anti-UV de type « hindered Amine Stabilizers » a été incorporé. Il s'agit de 0,6 % massiques de TINUVIN 783 (Ciba Specialty Chemicals) qui est indiqué pour les matériaux qui requièrent un agrément au contact indirect avec des produits alimentaires. Par ailleurs, son effet sera renforcé par l'incorporation des charges minérales radiatives qui limitent, de par leur nature, la photo-dégradation du matériau.

Dans le cas des peintures, une base polymère commerciale pour usage « extérieur » (donc contenant des anti-UV) est nécessaire et suffisante.

Additif surfactant « anti-fog » (propriété de surface hydrophile)

Pour la fabrication de films, un tensioactif industriel est ajouté, qui permet une meilleure distribution des charges minérales micronisées au cours de l'extrusion et qui, en migrant en surface durant la phase de refroidissement, confère au film des propriétés de surface hydrophiles (additif « antifog » diminuant sensiblement l'angle de contact des gouttes d'eau). Il s'agit dans ce cas d'utiliser les produits commerciaux les plus appropriés et dans les proportions indiquées par le fabricant en fonction de la base polymère utilisée. Pour nos essais de films LDPE, le composé ATMER 7340 (Ciba Specialty Chemicals) développé pour usage dans des films alimentaires a été incorporé à hauteur de 7 % en masse.

Dans le cas des peintures, les charges minérales ajoutées donnent à la peinture un caractère fortement hydrophile qui est conservé lors du vieillissement et suffisamment efficace pour une application en condensation de vapeur d'eau atmosphérique. Cet état de surface s'est vérifié dans les différentes résines testées : acryliques, glycérophtalique et polyuréthane bi-composant.

iii. Charges minérales

Par la suite, l'exemple du TiO_2 permettra d'illustrer les propriétés des charges minérales à prendre en compte au cours de l'étude. Par contre, les autres composés des différentes formulations ne seront pas cités par soucis de confidentialité. Le prix du TiO_2 est supérieur d'un facteur 20 au prix d'extenders standards et l'exigence d'un matériau opaque blanc oblige d'augmenter par un facteur deux les épaisseurs de film, donc le coût global en matériaux. La recherche d'opacité est d'autant plus coûteuse que pour des épaisseurs de 350 à 450 μm le procédé industriel d'extrusions « tube » ou « soufflée » ne se situe plus dans les standards de fabrication courants. C'est pourquoi chacune des bases polymères (thermoplastiques, peintures) est développée en matériaux opaques blancs (contenant du TiO_2) ou incolores (transparent à translucide).

Nature des charges radiatives

De même que l'absorption des gaz composant l'atmosphère (Annexe A-I.1), l'émissivité des bases polymères et des composés minéraux est due aux vibrations des molécules qui absorbent les longueurs d'onde correspondant précisément à l'énergie d'excitation de leurs liaisons chimiques constitutives.

Dans un premier temps, une large recherche bibliographique a été menée afin d'identifier les minéraux les plus intéressants pour notre application (nombreuses publications et autres handbooks : Nyquist *et al.*, 1996 ; Hummel, 1991). 32 spectres d'absorption Infrarouge de minéraux potentiellement intéressants ont été collectés (bande 3800 à 45 cm^{-1} soit 2,6 à 222 μm).

La production ou la transformation de chacun de ces composés minéraux pour leur utilisation dans l'industrie des polymères a ensuite été vérifiée dans la littérature (Naudin and Cloza, 1987 ; Kroschwitz, 1998 ; Kelly and Zweben, 2000) et directement auprès d'une quarantaine de fabricants. Finalement, compte tenu du cahier des charges pour nos applications, 9 natures de composés ont été testées par incorporation dans des polymères au cours de cette étude. Il a néanmoins été nécessaire de se procurer plusieurs variétés de chaque composé pour des tests dans différents types de bases auprès de 15 fournisseurs et en provenance de trois continents.

Granulométrie

Dispersées dans un milieu de densité optique inférieure, les particules de charges minérales diffractent le rayonnement incident de longueur d'onde voisine de leur taille (Robinson, 1966 ; Nilsson, 1994 ; Wiseman and Khan, 2003). Cette propriété est utilisée pour réfléchir le spectre solaire par diffractions successives dans l'épaisseur du matériau. Un matériau suffisamment épais et suffisamment chargé en minéraux devient réfléchissant pour la longueur d'onde considérée et les charges « extender » interagissent de sorte à augmenter le pouvoir opacifiant du TiO_2 (Rüdiger, 1998 ; Vargas, 2003). Il s'agit pour ces matériaux qui s'intéressent aux propriétés radiatives en moyen infrarouge (propriété intrinsèque des charges), d'utiliser les produits commerciaux les plus appropriés à la base polymère utilisée (recommandations fabricant, coating) et augmentant la réflexion du spectre solaire (granulométrie).

Par exemple, la granulométrie de l'opacifiant TiO_2 est adaptée lors de sa fabrication (micronisation de TiO_2 dans sa forme rutil à un diamètre voisin de $0,2 \mu\text{m}$) à la réflexion du spectre solaire (Visible – Proche Infrarouge). La distribution non homogène des diamètres de particules micronisées assure une réflectance maximale du spectre Visible jusque dans le proche Infrarouge. Les tests en base LDPE ont été menés avec un Mélange Maître (Sté ELIAN) chargé en TiO_2 TR28 (Huntsman Tioxide) de diamètre moyen $0,21 \mu\text{m}$ (moyenne géométrique pondérée). Pour usage en peinture solvantée glycérophtalique, le TiO_2 R105 (Dupont) d'un diamètre moyen de $0,31 \mu\text{m}$ a été utilisé.

Enrobage ou « coating »

L'enrobage des charges peut être minéral ou consister en un traitement organique. Premièrement, dans le cas d'un usage extérieur, les charges peuvent être enrobées d'une gangue minérale afin de les stabiliser au rayonnement UV (pas de photolyse avec émission de radicaux libres). Pour notre usage, le TiO_2 TR28 est enrobé de Al_2O_3 (0,6 % en masse) et le R105 est enrobé Al_2O_3 et SiO_2 en proportions égales (3,5% en masse chacun). Al_2O_3 facilite la dispersion dans une phase solvantée (ou dans un thermoplastique), SiO_2 favorise la dispersion dans une base eau. Un traitement organique intervient également afin de modifier les propriétés de mouillage et le caractère polaire / apolaire des charges afin de faciliter leur dispersion dans le polymère. Les plus courants sont des acides gras ou bien des organo-silanes. L'avantage de ces derniers est d'augmenter la robustesse par pontage entre la charge et le liant (Bondoux, 1991 ; DeArmitt and Rothern, 2002).

Charges minérales et contact de produits alimentaires

Le critère vérifié a été que toutes les charges utilisées dans les matériaux soient autorisées pour un usage alimentaire par la Food And Drug Administration américaine (FDA). Le TiO_2 est accepté par la FDA pour le contact alimentaire s'il est noyé dans un polymère. Pour ce qui est de la peinture commerciale, chaque fiche descriptive « Material Safety Data Sheet » MSDS est à étudier au cas par cas en fonction du fabricant.

iv. Taux de charge

Pour la mise au point de ces nouvelles formulations, il était nécessaire d'évaluer les ordres de grandeur des taux de charge autorisés pour la production des films thermoplastiques par extrusion - gonflage. Des discussions ont été menées avec le responsable de la recherche sur ce procédé à Atofina Belgique. Il en ressort que les variations du taux de charges peuvent être très importantes, laissant ainsi une grande liberté. Cependant, la nature et les propriétés de surface des charges ainsi que leur bonne dispersion peuvent avoir des conséquences très variables lors du gonflage ou pour les propriétés mécaniques du produit fini. Ce type d'étude est le plus souvent mené par les industriels dans le but d'améliorer leur maîtrise du procédé. Un exemple est donné avec la charge la plus vendue en volume après le noir de carbone : le CaCO_3 (Morieras and Schaeffer, 2002). En ce qui concerne les peintures, le taux de charge se mesure en Concentration Pigmentaire Volumique (CPV) qui est le rapport volumique des matières de charge à celui des matières non volatiles et qui s'exprime en pourcentage. La CPV peut subir des variations importantes et ne nous limitera pas c'est entre autres ce qui donne une finition brillante, satinée ou mate (Brock *et al.*, 2002).

Les propriétés mécaniques du film fini sont fonction de la dispersion efficace des charges minérales et de l'absence d'amas pulvérulents dans la matrice polymère. La distribution des charges minérales a été contrôlée au sein de l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) grâce à une microsonde de Castaing. C'est une méthode d'analyse élémentaire qui consiste à bombarder un échantillon avec des électrons et à analyser le spectre des rayons X émis par l'échantillon sous cette sollicitation. En effet, certains électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique à l'atome, provoquant l'éjection d'un électron de l'atome ; l'atome est dit « excité ». Lorsque l'atome se relaxe, il émet un photon. Du fait de l'énergie de transition, ce photon va appartenir à un spectre propre à chaque élément. La Figure I.9 suivante cartographie la distribution des atomes de Ti et Ba sur un échantillon de Foil d'ancienne génération (charges TiO_2 5% vol et BaSO_4 2% vol).

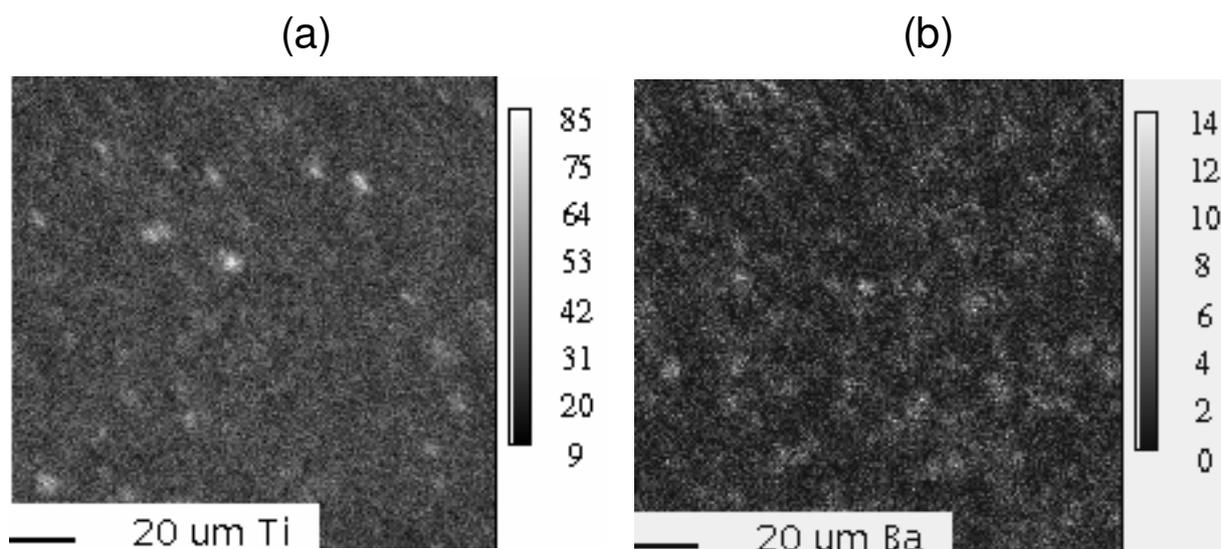


Fig. 1.9. Cartographie de la distribution et de la concentration de charges minérales dans un film LDPE. Echelle (étalon trait plein) donnée en μm

Cette cartographie permet de vérifier que la dispersion des charges est effective avant de réaliser des tests mécaniques sur des éprouvettes de film. Si les amas observés ici sur la figure (a) étaient trop nombreux, il paraîtrait judicieux de tester une autre charge ou bien un autre mélange maître avant de réaliser les tests mécaniques.

I.4 Formulation des matériaux

La méthodologie adoptée pour la formulation de ces matériaux innovants a été élaborée avec l'aide de MM les professeurs E. Duguet (ICMCB, groupe 10) et E. Papon (Ecole Nationale Supérieure de Chimie et Physique de Bordeaux). La partie pratique a été accomplie dans le laboratoire de la société RESCOLL hébergée par l'ENSCP.

I.4.1 Mode opératoire : batch / film / spectrométrie

A partir des données bibliographiques et du cahier des charges, les matériaux désirés (sélectivité optique et épaisseur) sont définis. La formulation définitive est ensuite approchée par cycles successifs comprenant :

- incorporation des charges et additifs dans les bases thermoplastiques (ou peintures)
- pressage de films LDPE à chaud
- détermination des propriétés optiques sur spectromètres IR et UV-VIS-PIR.

i. Incorporation des charges et additifs dans les bases polymères

Films

L'incorporation des charges dans la base LDPE se fait à chaud. Le mélange s'est fait sur un malaxeur BRABENDER PL 2200 à commande numérique. La vitesse des couteaux était de 50 tr min⁻¹ pour une température interne réglée à 150 °C (point de fusion du LDPE lacqtene FR 8000 : 114 °C, donnée fournisseur). Dans un premier temps, les additifs Tinuvin et Atmer sont incorporés à la base. Le volume de la chambre du malaxeur est de 60 cm³. Les quantités sont déterminées afin d'obtenir des « batchs » d'environ 40-50 g. Les additifs minéraux sont à leur tour incorporés. La durée de malaxage est déterminée par le suivi en temps réel de la viscosité du polymère (mesure du couple de résistance sur les couteaux). La viscosité augmente à l'introduction des charges micronisées ou du mélange maître. Ensuite, il y a relaxation jusqu'à une valeur quasi constante signifiant que le mélange est homogène. En fonction de la nature de la charge, la viscosité finale peut être supérieure ou inférieure à celle de la base seule. Le batch est ensuite récupéré amorphe et refroidi.

Peintures

L'introduction des charges micronisées dans une base transparente de peinture glycérophtalique (Laque « haut brillant » de Dulux Valentine) se fait à l'aide d'un disperseur de laboratoire à haute vitesse (à environ 500 tr min⁻¹ dans notre cas).

ii. Réalisation des échantillons sous forme de films

Le pressage des échantillons de films LDPE se fait à chaud sur une presse de marque TECNI HISPANIA. La pression du piston est de 55 bars pour un diamètre du piston de 70 mm. Les plaques supérieures et inférieures de la presse (400 x 500 mm²) sont réglées par thermostat sur une température de 150°C. Les films sont pressés entre deux plaques d'acier inoxydable de qualité de surface « polie miroir ». L'épaisseur du film est réglée par des cales taillées dans du « clinquant acier » d'épaisseur contrôlée. La difficulté à décoller les films

après pressage nous obligera toutefois à doubler ces surfaces de deux films d'aluminium dont la souplesse permet de récupérer le film sans l'endommager après refroidissement.

Les échantillons de peinture sont, quant à eux, peints en une ou deux couches sur un film LDPE incolore de 56 μm d'épaisseur. Ce film a la propriété d'être largement transparent à l'IR dans sa version incolore, donc son impact sur l'absorption IR sera faible. Avant la caractérisation des propriétés optiques de chaque échantillon, son épaisseur est soigneusement mesurée à l'aide d'un palmer de marque Facom (précision de 5 μm).

iii. Propriétés optiques en IR thermique et sur le spectre solaire

La caractérisation des propriétés optiques des matériaux radiatifs se fait selon une méthode connue et décrite par de nombreux auteurs (Nilsson, 1994, 1996 ; Berdahl and Bretz, 1997 ; Ventura and Papini, 1999 ; Tsilingiris, 2003 ; Dobson *et al.*, 2003).

La réflectance solaire totale est obtenue à partir des mesures de réflectance diffuse spectrale. Celle-ci est déterminée à l'aide d'un spectromètre UV-VIS-PIR à double faisceau Cary 5000. Le spectre balayé s'étend de 200 à 4000 nm par pas de 5 nm, la lampe est de type mercure Hg. Les réflexions spéculaires et diffuses sont mesurées à l'aide d'une sphère d'intégration de diamètre 110 mm couverte de PTFE micronisé et compacté (Halon). Chaque photon issu de la réflexion spéculaire (R_s) ou diffuse (R_d) sur l'échantillon placé en #1 (Figure I.10) se réfléchit dans la sphère jusqu'à heurter le récepteur PbS et être comptabilisé. Le spectre obtenu est la réflexion spéculaire exprimée en pourcentage de l'étalonnage initial (ligne de base, $R = 1$). La ligne de base est le spectre mesuré en plaçant une pastille de Halon en #1. La mesure des transmissions spéculaire et diffuse se fait en plaçant l'échantillon en #2 et en fermant la sphère par la pastille de Halon en #1.

La réflectance solaire totale est l'intégrale de la mesure de réflexion spectrale pondérée en utilisant le spectre solaire ASTM G173-03 (American Society for Testing and Material) standard (Chapitre I.2.1) comme fonction de pondération.

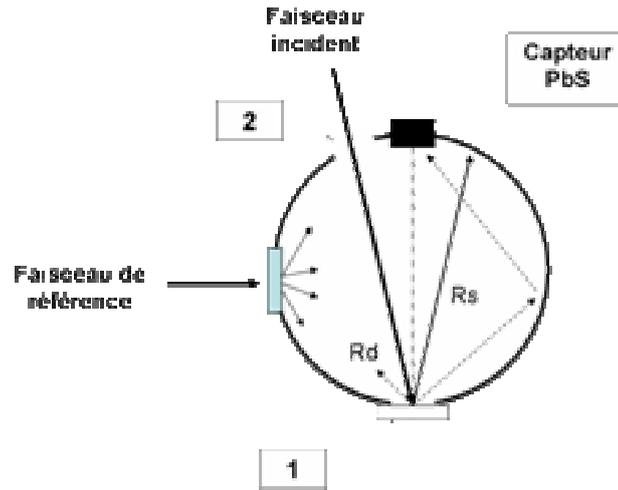


Fig. I.10. Schéma de fonctionnement de la sphère d'intégration

Les spectres de transmission spéculaire IR des matériaux ont été enregistrés sur un spectromètre IR à Transformée de Fourier (IRTF) BRUKER Equinox 55 sur la plage $7500 - 370 \text{ cm}^{-1}$ ($1,3$ à $27 \text{ }\mu\text{m}$). Pour des films polymères et en IR, la transmission spéculaire T_{spe} est la composante principale permettant de déterminer l'absorbance (équivalente à l'émissivité) du matériau, loin devant la transmission diffuse T_{dif} , la réflexion spéculaire R_s et diffuse R_d (Zhang and Ge, 1995). L'émissivité est calculée suivant la formule :

$$\varepsilon = 1 - (T_{spe} + T_{dif} + R_s + R_d) \quad \text{I.(23)}$$

Au cours de ces essais, nous ne disposons pas de sphère d'intégration pour le domaine IR, donc le seul spectre enregistré était T_{spe} . Nous en obtenons une émissivité intermédiaire du matériau ε^* qui permet d'évaluer les efficacités relatives comparées de chaque matériau intermédiaire au cours des recherches des formulations.

Cette efficacité est l'émittance du matériau à une température donnée, soit l'intégrale de l'émissivité intermédiaire ε^* préalablement pondérée par le spectre du corps noir à cette température.

La Figure I.11 montre des spectres des bases et les charges utilisées dans la précédente formulation. Le film sera d'autant plus radiatif que la transmission sera voisine de zéro, et ce tout particulièrement sur la fenêtre atmosphérique.

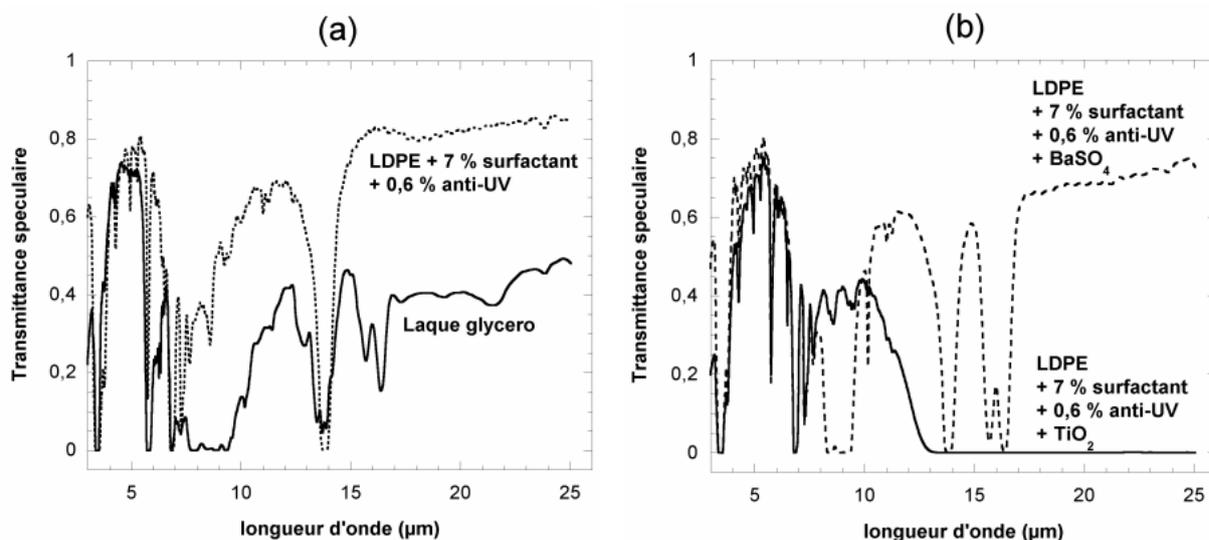


Fig. 1.11. (a) Propriétés optiques des bases polymères LDPE (LDPE + anti-UV + surfactant) et peinture glycérophtalique retenues pour la mise en œuvre des matériaux. (b), Exemple de propriétés optiques de charges minérales incorporées à la base (LDPE+surfactant+anti-UV)

1.4.2 Stratégie et résultats

Dès lors que les composants primaires et additifs sont sélectionnés, il s'agit de définir les caractéristiques des matériaux finaux souhaités ; ensuite, l'enjeu est d'élaborer une séquence de tests restreinte alternant la fabrication d'échantillons de films (polyoléfinés ou peinture) de formulation et épaisseur déterminées, avec leur passage sur spectromètres afin d'en quantifier l'efficacité pour les applications qui nous intéressent.

i. Définition de trois types de matériaux souhaités en fonction de leur usage ; chaque type étant ensuite formulé aussi bien en film plastique qu'en peinture :

- Blanc réfléchissant opaque (chargé en TiO_2) pour des applications condensation de rosée (nuit) et / ou climatisation passive (jour). L'opacité (très haute réflectance diffuse) se paie cher en raison de l'épaisseur accrue du matériau et de l'incorporation massive de TiO_2 .
- Incolore pour des applications en condensation de rosée à un coût minimal (pas de TiO_2 , cher, et aux propriétés de corps noir IR pour une épaisseur inférieure, donc moins de matériau). Les peintures incolores seront par ailleurs destinées à l'adaptation en condenseur de surfaces dont la teinte et l'aspect d'origine doivent être conservés (tuiles de terre cuite, bardot bois...).

- Formulation blanche diffuse pour application en condensation de rosée et en limitation de l'échauffement diurne du système. Dans ce cas, la propriété de corps noir IR est respectée, mais la réflexion du spectre VIS-PIR n'est pas totale. C'est un compromis entre un coût très abordable tout en garantissant un échauffement diurne moindre de la surface. Cette formulation est nécessaire pour une utilisation en pays à forte insolation car les écarts de température entraînent un vieillissement accéléré des matériaux et le cloquage des peintures.

ii. Dans un premier temps, seuls les films LDPE ont été formulés. Après le test de chaque charge individuellement, les meilleures associations de charges ont été testées et affinées. A partir de 6 directions de formulation initialement envisagées, 17 variantes (par leur nature) ont évolué jusqu'à n'en retenir que les plus intéressantes.

iii. Les 5 associations les plus prometteuses ont ensuite été dosées chacune en trois taux de charge massique croissants, soit 15 batchs. Chacun de ces batchs étant ensuite pressé en 3 classes d'épaisseurs différentes, approximativement 100-150 ; 200-250 et 300-350 μm .

Le but était de disposer de 9 échantillons pour chacune des formulations intéressantes. Sachant que l'émittance IR augmente avec le taux de charge mais que cela peut aussi diminuer les propriétés mécaniques, il restait à trouver parmi ces 9 films pour chaque formulation le meilleur compromis taux de charge / épaisseur / propriétés mécaniques.

Les peintures seront réalisées à partir des mêmes « cocktails » minéraux les plus prometteurs, ne restant alors plus qu'à trouver le meilleur compromis taux de charge / épaisseur (2 couches de peinture, de 80 à 110 μm). En tout, près de 80 échantillons de films et 24 de peinture auront été testés sur spectromètres UV-VIS-PIR et IRTF.

iv. Des tests mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes standard afin de définir le taux de charge acceptable d'un point de vue mécanique (tests effectués par la société RESCOLL, ENSCPB). Les essais de traction bi-axiale avec l'extensomètre MTS suivent la méthode des points de déformation norme ISO 527 (similaire à ASTM Method D 882). Les résultats exprimés en MPa sont adimensionnels car ramenés à la section des éprouvettes de test.

v. Les films les plus intéressants ont été analysés par μ -sonde de Castaing afin de vérifier la dispersion des charges.

vi. L'émissivité IR ε (4 – 20 μm) pour les formulations définitives a été testée sur spectromètre IRTF à sphère d'intégration IR (revêtement or). Ces mesures ont été effectuées par le Centre de Recherche sur les Matériaux à Haute Température, NRS-CRMHT, Orléans.

vii. Enfin, les peintures ont été fabriquées et testées en extérieur à l'Université de Corse (Ajaccio). Ce test permet une comparaison directe des rendements de rosée des différents matériaux. Il permet aussi d'estimer la qualité de la surface et de mesurer la proportion de rosée récupérée par écoulement gravitaire.

Matériau	FILM			PEINTURE ³ (2 couches)	
	Blanc Opaque	Blanc Diffusant	Incolore	Opaque Blanche ⁴	Vernis Incolore
Épaisseur (μm) pour tests optiques	200	215	155	90	94
ε (4 – 20 μm) ¹	0,90	0,91	0,90	0,93	0,92
Corps noir 288K					
ε^* (8 – 13 μm) ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
corps noir 288K					
Reflectance solaire (0,280 – 2,0 μm)	0,84	0,78	/	$\geq 0,80$ ⁶	$\leq 0,63$
Reflectance visible (0,38 – 0,78 μm)	0,90	0,86	/	$\geq 0,90$	$\leq 0,62$
Coût mat. premières ⁵ (indice Réf. Nilsson)				3,54	
Nilsson 415 μm : 1,0	0,46	0,36	0,18	(matière première mais pas de fabrication)	
Inde 200 μm : 0,42					
% de rosée collectée par gravité sur un plan incliné à 30°		74 % film neuf		92 à 95 % sur Glycérophtalique, PU et Acrylique stable dans le temps	

Tableau I.2. Récapitulatif des propriétés des films et peintures formulés

¹ Les émissivités IR ε (4 – 20 μm) présentées dans le Tableau I.2 sont obtenues à partir de la seule mesure de la Transmission (spéculaire et diffuse) suivie d'une correction afin de prendre en considération la réflexion spéculaire et diffuse (correction d'après les valeurs données par Nilsson, 1994).

² Emissance transitoire ; $\varepsilon^*=0,99$ signifie qu'il n'y a pas de transmission spéculaire sur la bande (8 - 13 μm).

³ Les produits formulés blancs et incolores destinés à un usage en extérieur utilisent les additifs commerciaux pour résister à la photo dégradation et aux intempéries. Toutefois, pour la fabrication de peintures, la base utilisée doit être parfaitement adaptée à la nature du support afin de ne pas écourter sensiblement sa résistance et sa durée de vie.

⁴ D'autres teintes sont possibles en fonction de la nature de la base commerciale.

⁵ En raison des écarts importants du coût de fabrication (entre l'Europe et l'Inde par exemple), seul un indice du prix des matières premières (base + additifs + charge minérale) est donné, la formulation originale de Nilsson (1994) étant la référence 1,0.

⁶ Dépend de la base de peinture testée. Une étude a montré que 11/19 échantillons de peinture blanche commerciale avaient une réflectance solaire totale supérieure à 0,80 (Ohishi, *et al.*)

I.5 Conclusion

Les matériaux à fort pouvoir radiatif sont déjà utilisés pour limiter l'échauffement diurne des locaux à usage d'habitation ou celui des véhicules. Ces nouvelles formulations augmentent leur efficacité tout en étant très bon marché.

Ces matériaux permettent la condensation nocturne de l'humidité atmosphérique sous forme d'eau de rosée potable dont la récupération par écoulement gravitaire est facilitée par le caractère hydrophile des matériaux.

Les toits de régions arides ou semi-arides peuvent facilement être équipés (peintures, films), de même que des surfaces importantes peuvent être aménagées au sol en condenseur de rosée artificielle (film). D'importants projets développant plusieurs milliers de m^2 sont déjà en cours de réalisation (Etat du Gujarat, Inde) en utilisant des formulations moins performantes. Le rendement et la durée de vie de tels condenseurs seront grandement améliorés par ces nouvelles formulations tandis que leur coût en sera sensiblement abaissé.

SECONDE PARTIE

II SECONDE PARTIE :

Simulations numériques de condenseurs radiatifs, comparaison avec les systèmes réels

Dans le cas général, les procédés de condensation consistent à refroidir un support exposé à l'air ambiant sous la température du point de rosée. Cette température de transition de phase vapeur – liquide dépend de l'humidité de l'air ambiant et elle est souvent en milieu naturel de 3 à 5 °C inférieure à la température ambiante. Pour de tels ordres de grandeur, le refroidissement radiatif, sans apport d'énergie extérieure, montre un potentiel de développement intéressant grâce à l'utilisation des films et peintures développés au cours de nos recherches et qui ont pour principales caractéristiques leur faible coût et une émissivité importante aux longueurs d'ondes thermiques IR.

De nombreuses observations ont été jusqu'à présent réalisées au sein de nos laboratoires sur des condenseurs radiatifs plans, à l'échelle du pilote (1 m² de surface) ou sur les deux ouvrages de 30 m² du site d'Ajaccio. En effet, ces structures sont relativement aisées à mettre en œuvre, à instrumenter ainsi qu'à décrire d'un point de vue thermodynamique et constituent donc un support expérimental de choix (Beysens *et al.*, 2003; Muselli *et al.*, 2006a).

Dans l'objectif de mise en œuvre de structures complexes et de condenseurs opérationnels de grandes surfaces (plusieurs milliers de m²), il a été décidé de développer un outil de simulation et d'aide à la décision afin de diriger les choix techniques. Il s'agit ici de programmer un logiciel de dynamique des fluides (Computational Fluid Dynamic, CFD : logiciel PHOENICS) à la simulation numérique de condenseurs radiatifs.

Les programmes dits de « CFD » permettent une modélisation des systèmes par éléments finis, c'est-à-dire une discrétisation de l'espace d'étude en volumes élémentaires de coordonnées et propriétés physiques connues. La résolution itérative des équations de Navier-Stokes entre cellules voisines permet alors de déterminer les échanges de matière et de chaleur dans tout l'espace d'étude. La réalisation de ces simulations numériques ouvre des perspectives très intéressantes et complémentaires à trois niveaux :

- i.* La simulation des pilotes expérimentaux déjà étudiés permet de valider le programme de simulation. Plus encore, l'expérience numérique permet de remplacer certains tests qui demandent de grandes périodes d'exposition en extérieur et de combler d'éventuelles lacunes liées à l'instrumentation (seuil de coupure de l'anémomètre trop élevé pour estimer la convection libre, effets de bord...).
- ii.* Le recours à un programme de simulations numériques permet d'envisager de nouvelles architectures de condenseurs pour lesquelles il n'existe que très peu de données à l'heure actuelle et d'optimiser les options retenues avant la mise en place d'un système novateur sur site, y compris la mise en place de coupe-vents d'épaisseur et de porosité déterminées.
- iii.* Ce même programme permet de minimiser la prise de risque en vue de la mise en place de projets à grande échelle. Il peut s'agir de l'adaptation de toitures existantes (telle que l'expérience menée sur l'île de Bisevo, Croatie, (Chapitre IV.1) ou de systèmes au sol tels que le projet d'usine de rosée de 15 000 m² dans le Kutch (Inde ; Chapitre IV.1), pour lesquels la taille influence grandement les écoulements fluides.

Dans ce triple objectif, les fonds alloués par l'OSEO-ANVAR, la Collectivité Territoriale de Corse de Corse et le CEA au projet de modélisation de systèmes innovants ont permis la mise en place d'un programme de simulation des condenseurs radiatifs de vapeur atmosphérique sur le logiciel PHOENICS (rapport de contrat, Muselli *et al.*, 2004). Ce travail a été réalisé suite à la formation de l'auteur de cette thèse à la maîtrise de cet outil grâce aux services de la société ARCOFLUID sur contrat CEA.

Après avoir brièvement rappelé les modèles développés pour l'étude des condenseurs radiatifs, il conviendra de signifier les limites posées par ces modèles pour décrire des formes complexes de condenseurs. Dans un second temps, le calcul des lois de dissipation radiative propres à chaque système sera présenté, ainsi que la programmation des expériences numériques dans PHOENICS. Enfin, la validation des résultats de ces simulations ainsi que leur lecture quantitative seront discutés comparativement aux nombreuses mesures

expérimentales accumulées sur cinq condenseurs pilotes de 0,16 ; 1,0 ; 7,3 ; 30 et 255 m². Deux exemples de réalisations assistées par des simulations préalables seront décrits.

II.1 Description de la machine thermique condenseur

En premier lieu, il convient de préciser que la température d'un objet tel que le condenseur radiatif est la résultante de trois échanges thermiques qui s'équilibrent, Figure II.1 :

- i. Echange RADIATIF : une puissance émise négative due à un bilan radiatif positif entre l'objet et la voûte céleste nocturne, conduisant à un abaissement de température.
- ii. Echange CONVECTIF : une puissance reçue positive due à la diffusion thermique à travers le fluide en contact immédiat avec le solide ; cette puissance augmente avec la convection ou la turbulence du fluide et entraîne une élévation de la température. Le refroidissement radiatif de la surface est à l'origine du phénomène de convection libre par l'augmentation de la densité de l'air au contact de la surface froide. La convection forcée peut être assimilée à l'écoulement de l'air à la surface du condenseur induit par la perturbation de l'écoulement du vent météorologique en raison de la présence du condenseur lui-même.
- iii. CONDENSATION : Une puissance reçue positive due à la chaleur latente de condensation dégagée au cours du transfert de matière (égale au signe près à la chaleur latente de vaporisation de l'eau de 2,5 kJ g⁻¹ à 20°C ; Beysens, 2006b).

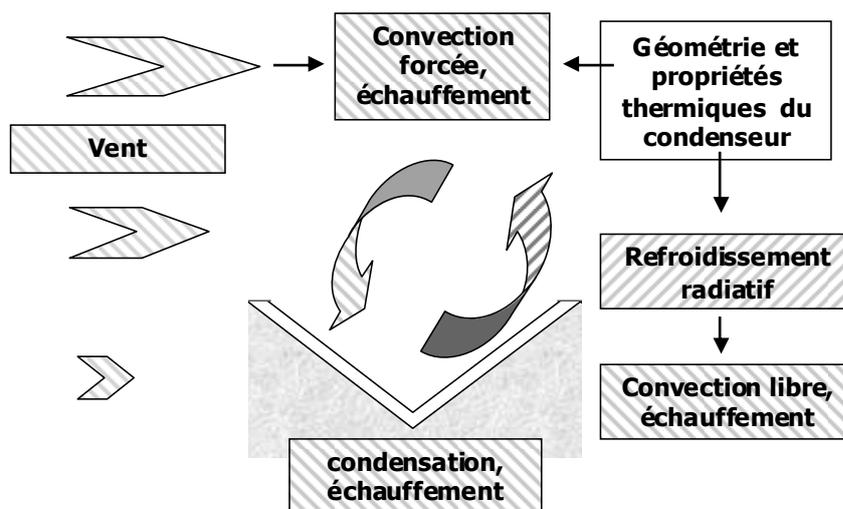


Fig. II.1. Représentation des échanges thermiques à prendre en compte dans la modélisation du condenseur radiatif comme machine thermique

Rappelons alors les caractéristiques majeures que doit respecter la géométrie d'un condenseur radiatif afin d'assurer une efficacité maximale :

- i. Le condenseur est constitué d'un matériau innovant de faible inertie thermique et de grande émissivité pour le rayonnement IR thermique (foil polyéthylène contenant des charges minérales spécifiques produit par l'association OPUR ; www.opur.u-bordeaux.fr). Ce matériau est protégé du rayonnement terrestre par plusieurs centimètres d'isolant et il est exposé au ciel nocturne de radiation moindre, avec lequel il est en équilibre radiatif. Il doit donc d'un point de vue radiatif être orienté suivant un angle minimum avec l'horizontale.
- ii. Parallèlement, la collecte de l'eau condensée par gravitation impose une inclinaison. Celle-ci a été mesurée à 30° pour un compromis efficace bilan radiatif/écoulement (Beysens *et al.*, 2003). Les matériaux présentant un très fort caractère hydrophile telles les peintures développées au cours de ce travail de thèse permettent toutefois de réduire cet angle. Une partie des tests de matériaux commerciaux (Chapitre IV.1.1 ; Figure IV.4b) a été réalisée pour un angle d'inclinaison de 23° sans incidence sur l'écoulement gravitaire.
- iii. Afin de minimiser le réchauffement du matériau radiatif avec l'air ambiant, la géométrie du système doit limiter autant que possible la vitesse d'écoulement de l'air à la surface du condenseur.

Les futurs condenseurs pourront être implantés en adaptant des structures existantes, donc sans avoir la possibilité de choisir la géométrie (toitures de géométrie et de pentes variées par exemple). Mais des structures dédiées pourront aussi être installées, en tenant compte des conditions précédemment citées.

II.1.1 Description théorique

i. Modèles

Le modèle des rendements de rosée de condenseurs expérimentaux a été abordée au Chapitre I.1. Les différents modèles partagent la formulation de l'Eq. I.(1). En régime stationnaire, le taux de condensation et la masse d'eau restant sur la surface du condenseur

m_c est constante. m_c dépend des propriétés de mouillage du condenseur. De même, en régime stationnaire, T_c est constante donc l'Eq. I.(1) devient l'Eq. II.(1) telle que :

$$q_{COND} + q_{IR} + q_{CV} + q_{CD} = 0 \quad \text{II.(1)}$$

Par la suite, la modélisation sera simplifiée en considérant l'événement de rosée comme une succession d'états du système en régime stationnaire (T_c constant) satisfaisant à l'Eq. II.(1) et avec un pas de temps correspondant à celui des données.

Le facteur $q_{CD} = f(T_c)$ est accessible par l'Eq. I.(18) ; le facteur $q_{IR} = f(T_c; T_a; \varepsilon_s)$ s'exprime suivant l'Eq. I.(15). Le facteur $q_{COND} \sim (T_c - T_d)$ permet d'obtenir le cumul de la masse d'eau condensée m d'après l'Eq. I.(9).

Le transfert thermique q_{CV} par convection de l'air en contact avec le condenseur se décline à partir de l'Eq. I.(3). D'une manière générale, les modèles s'expriment à partir du coefficient de transfert h_c sous sa forme réduite sans dimension (nombre de Nusselt Nu). Ce nombre représente le rapport de la conductance thermique par convection h_c sur la conductance thermique moléculaire k_a/L_C où k_a est la conductivité thermique de l'air ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) et L_C (m) la longueur caractéristique du système (Guyer and Brownell, 1999).

$$Nu = \frac{h_c L_C}{k_a} = f(Gr, Pr, Re, forme) \quad \text{II.(2)}$$

Dans cette écriture, le nombre de Prandtl Pr est une propriété du fluide, il fournit une mesure de l'efficacité du transport par diffusion à travers la couche limite de vitesse et la couche limite thermique : viscosité cinématique ($\nu_c = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour l'air à 20°C) sur la diffusivité thermique α_t (en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) :

$$Pr = \frac{\nu_c}{\alpha_t} \quad \text{II.(3)}$$

Le nombre de Grashof Gr est proportionnel au ratio des forces de gravité sur les contraintes de viscosité et s'exprime suivant :

$$Gr = \frac{g \beta_{exp} (T_a - T_c) L_C^3}{\nu_c^2} \quad \text{II.(4)}$$

avec g (m s^{-2}) l'accélération gravitationnelle et $\beta_{exp} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ le coefficient d'expansion thermique pour l'air à 20°C (valeur donnée dans les propriétés du programme PHOENICS). Enfin, le nombre de Reynolds Re représente le rapport entre forces d'inertie et

forces visqueuses ou le rapport (qualitatif) du transfert par convection avec le transfert par diffusion de la quantité de mouvement. Dans le cas où V est la vitesse du fluide (m s^{-1}), il s'écrit :

$$\text{Re} = \frac{V L_C}{\nu_c} \quad \text{II.(5)}$$

ii. Convection libre et convection forcée

L'importance relative de la convection libre par rapport à la convection forcée est estimée par comparaison des nombres de Grashof et de Reynolds élevé au carré (Guyer and Brownell, 1999). Cengel and Turner (2001) donnent les valeurs de comparaison suivantes : le régime est mixte si $0,1 < Gr/Re^2 < 10$. La convection libre est négligeable si $Gr/Re^2 < 0,1$. La convection forcée est négligeable si $10 < Gr/Re^2$.

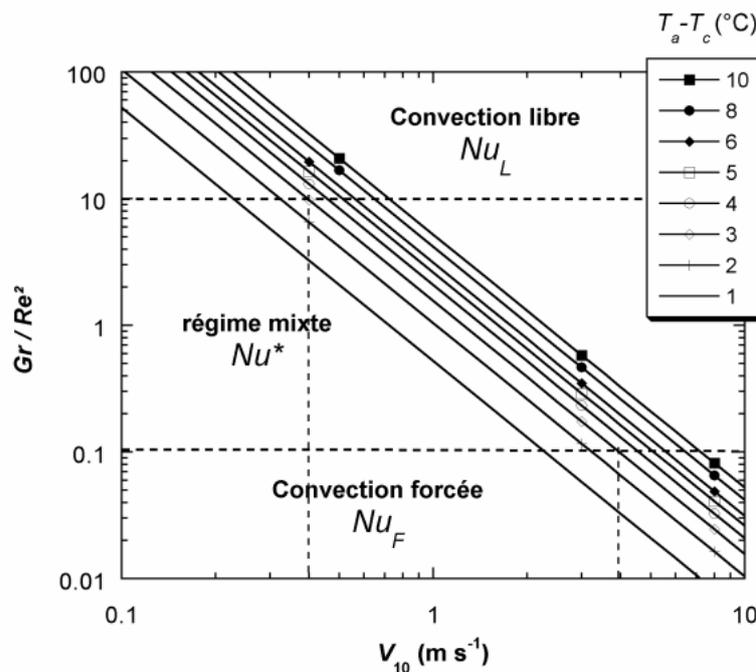


Fig. II. 2. Comparaison de Gr/Re^2 en fonction de V (m s^{-1} à 10 m) pour un condenseur plan horizontal de $L_C = 1$ m placé à 1 m de hauteur et pour différents gradients de température ($T_a - T_c$)

Les événements de rosée sont le plus souvent observés pour un vent inférieur à 4 m s^{-1} avec ($T_a - T_c$) compris entre 1 et 5 $^{\circ}\text{C}$ (Beysens *et al.*, 2003 ; 2005a). La Figure II.2 permet de considérer un condenseur de taille $L_C \sim 1$ m . Pour des vitesses de vent d'un ordre de grandeur de celles étudiées au cours de nos travaux, le transfert thermique se fera le plus souvent par convection mixte libre / forcée. Pour ($T_a - T_c$) = 3 $^{\circ}\text{C}$ par exemple, le transfert thermique est en

régime mixte libre / forcé pour un vent compris entre 0,4 et 4 m s⁻¹. En régime mixte, le transfert de chaleur convectif varie en fonction du nombre de Nusselt combiné Nu^* selon :

$$Nu^* = (Nu_f^n \pm Nu_L^n)^{1/n} \quad \text{II.(6)}$$

Dans la parenthèse, le signe est « + » si le flux de convection naturelle assiste la convection forcée. Le signe est « - » si les deux flux sont en opposition ($n = 3$ pour une plaque verticale et $n=4$ pour une plaque horizontale, valeur recommandée par Cengel and Turner, 2001). De nombreuses géométries immergées dans un fluide ont fait l'objet d'expérimentations afin de déterminer les propriétés du nombre de Nusselt leur correspondant.

II.1.2 Exemples de condenseurs plans

Certaines géométries sont bien documentées en ce qui concerne les coefficients de transfert thermique en convection libre aussi bien que forcée. C'est le cas de flux externes sur des plans verticaux, des cylindres et radiateurs à ailettes (Guyer and Brownell, 1999 ; Cengel and Turner, 2001 ; Liu *et al.*, 2004 ; Giri *et al.*, 2003) ou encore des tubes à ailettes planes verticales refroidis par fluide caloporteur (Campen and Bot, 2002). D'autres modèles sont intéressants pour l'étude de systèmes à condensation par refroidissement actif, tels que les relations pour des flux internes à travers des tubulures présentant tous types de profils et rugosités (Guyer and Brownell, 1999 ; Trujillo *et al.*, 2003 ; Bari *et al.*, 2005).

Dans le cas d'une plaque horizontale refroidie sur sa face supérieure et dont la longueur caractéristique L_C est égale à la surface divisée par le périmètre, la convection libre peut s'exprimer suivant l'équation (Guyer and Brownell, 1999) :

$$Nu_L = \frac{0,527}{\left[1 + (1,9/Pr)^{9/10}\right]^{2/9}} (Pr \cdot Gr)^{1/5} \quad \text{avec} \quad 10^5 < (Pr \cdot Gr) < 10^{10} \quad \text{II.(7)}$$

Dans le cas de la convection forcée, le nombre de Reynolds local Re_p le long de la plaque permet de définir si le flux est laminaire, turbulent ou combiné (Cengel and Turner, 2001 ; Jacobs *et al.*, 2004) :

$$Nu_{FL} = 0,664 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{en flux laminaire si} \quad Re_p < 5 \cdot 10^5 \quad \text{II.(8)}$$

$$Nu_{FT} = 0,037 Re_p^{8/10} Pr^{1/3} \quad \text{en flux turbulent si } 5.10^5 < Re_p < 10^7 \quad \text{II.(9)}$$

et $0,6 < Pr < 60$

$$Nu_F = (0,037 Re_p^{8/10} - 871) Pr^{1/3} \quad \text{en flux combiné} \quad \text{II.(10)}$$

Pour des systèmes plus complexes (plan incliné, succession de plans), certaines corrélations expérimentales ont été réalisées et sont décrites dans l'Annexe A-II.1. La faiblesse essentielle de ces descriptions est qu'elles ne précisent pas le nombre de Nusselt dans les conditions de régime forcé, or nous avons vu que les condenseurs radiatifs opèrent pour l'essentiel en conditions d'échange thermique mixte libre / forcé.

Dans le cas de condenseurs de type plan incliné exposé face arrière au vent, le coefficient de transfert thermique en régime de convection forcée est donné par l'Eq. I.(11) du modèle de Nikolayev *et al.* (1996) ; voir aussi à ce propos Beysens *et al.*, 2003 ; Muselli *et al.*, 2006a. Dans ce modèle, h_c est corrélé à la vitesse du vent V ainsi que des coefficients dépendants de la géométrie du plan incliné : surface S_c , β_f ainsi que k_f évalué directement sur le système considéré. Cependant, des difficultés ont été rencontrées dans la description des événements de condensation par faibles vitesses de vent (régime de convection libre), situation qui correspond aux meilleurs rendements de rosée mesurés. Il est envisageable d'exprimer l'Eq. I.(11) sous sa forme adimensionnelle du nombre de Nusselt en régime forcé suivant l'écriture donnée par l'Eq. II.(2) :

$$Nu_F = \frac{h_c L_c}{k_a} = \frac{k_f \beta_f L_c \sqrt{V/D_{im}}}{k_a} = \frac{k_f \beta_f \sqrt{L_c V}}{2k_a} \quad \text{si l'on se place dans le} \quad \text{II.(11)}$$

cas d'un condenseur carré pour lequel $D_{im} = \sqrt{S_c} = 4 \frac{S_c}{Périm} = 4L_c$

Il est alors possible d'exprimer $Nu^* = f(Nu_L ; Nu_F)$ dans le cas général de convection mixte libre / forcée grâce à l'Eq. II.(6) et avec Nu_L décrit par les Eq. A-II.(1) ; A-II.(2) ; A-II.(3) ou par l'Eq. A-II.(4).

Cependant, l'usage de ces équations nécessite la détermination des régimes d'écoulement libre / mixte / forcé par le calcul de Re (Eq. II.(5)). Beysens *et al.* (2003) présentent les résultats d'une première simulation 2D d'un condenseur plan incliné et décrivent la création d'un vortex de recirculation le long de la surface de condensation. Dans ces conditions, la

détermination de Re est très difficile. Enfin, ce modèle ne s'affranchit pas de la détermination expérimentale des paramètres k_f et g_f dépendants du système (voir Eq. I.(10) ; I.(11) et II.(11)). De la même façon, les corrélations de la littérature utilisées pour la détermination de Nu^* pour une plaque plane ou inclinée sont généralement empiriques et s'appliquent mal au changement d'échelle du système ou à la description de géométries plus complexes.

Les condenseurs en forme de cônes inversés, par exemple, devraient présenter de hauts rendements grâce à leur symétrie de révolution (annulation de la dépendance à la direction du vent) et surtout à la limitation de la convection libre par stagnation en leur partie basse de l'air froid et dense. Une géométrie voisine, plus aisée à mettre en œuvre serait alors un coin, c'est-à-dire une ou plusieurs tranchées présentant deux plans inclinés se faisant face. Dans tous les cas, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation de chacun de ces condenseurs afin de prévoir, avant installation à grande échelle, un ordre de grandeur comparatif de rendement ainsi que les options techniques pour la mise en œuvre. Face aux lacunes que présente la modélisation théorique de tels systèmes, il a été décidé au cours de ces travaux de la mise au point d'un outil de simulation par « Computational Fluid Dynamic » CFD pour l'aide à la décision et à la mise au point de systèmes par la réalisation d'expériences numériques préalables.

II.2 Mise en œuvre des simulations numériques

II.2.1 Intérêt de l'expérience numérique par modélisation en CFD

La CFD se propose de calculer simultanément des flux de chaleur, de matière, des changements de phase ou des réactions chimiques et des déplacements de solides dans un espace contenant le système étudié. Ce calcul se base sur la résolution d'outils mathématiques (principalement les équations de Navier-Stokes) entre deux volumes élémentaires voisins. Le balayage de l'ensemble de l'espace est réalisé et réitéré jusqu'à la relaxation du système et la stabilisation des grandeurs physiques du ou des fluides (Pression, Température, Vitesses, coefficients de turbulence...) pour chaque cellule.

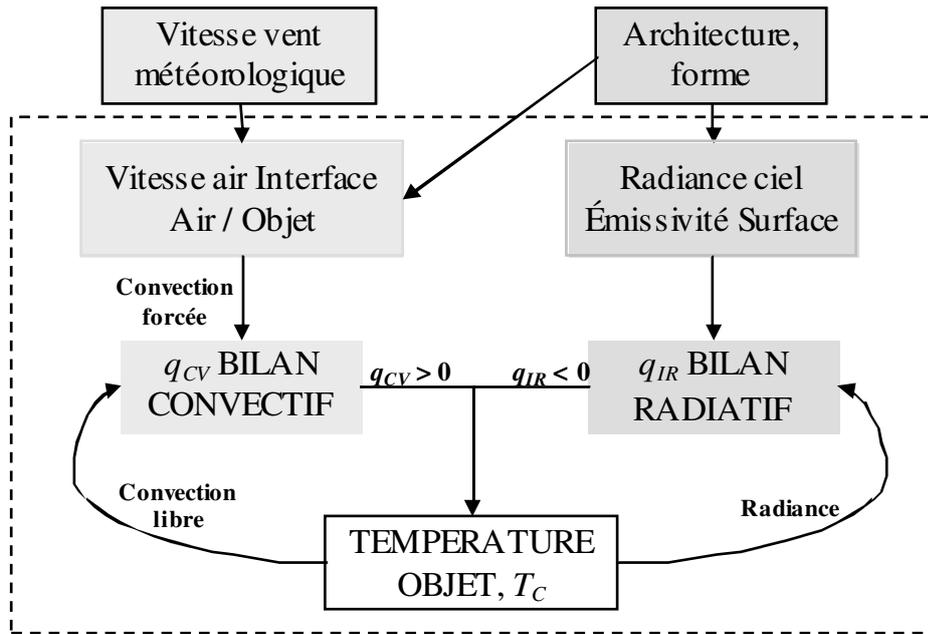


Fig. II.3. Dépendances entre variables pour l'étude thermodynamique d'un condenseur radiatif. Dans ce cas, la transition de phase de l'eau vapeur-liquide n'est pas modélisée, ce qui revient à considérer le système en atmosphère « sèche ».

La radiance d'un matériau connu, à la géométrie connue et exposé à des variables météorologiques déterminées peut être exprimée en fonction de la température de l'objet T_c par une approche théorique. La température T_c d'un objet de géométrie complexe en régime stationnaire est issue de l'Eq. II.(1). Si le système est considéré en atmosphère sèche (c'est-à-dire que la transition de phase vapeur / liquide n'est pas modélisée, $q_{COND} = 0$), T_c est dépendante de la puissance radiative émise et de l'écoulement du fluide. La Figure II.3 représente les interdépendances entre variables, la description du système nécessitant de résoudre l'ensemble des relations apparaissant dans le cadre tracé en pointillés. Il convient alors d'exprimer analytiquement le bilan radiatif $q_{IR} = f(T_c)$ et d'avoir recours à un procédé itératif de calcul permettant de résoudre le système simplifié représenté sur la Figure II.4 :

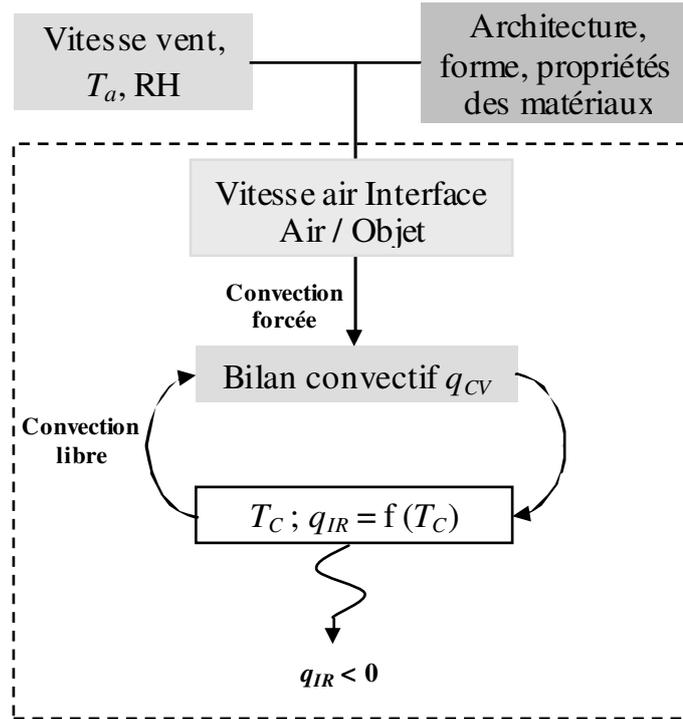


Fig. II.4. Dépendances entre variables simplifiées si T_c et q_{IR} sont liés, le calcul itératif CFD permet de résoudre le système encadré.

La modélisation du système se fera en deux étapes successives, la première étant la détermination de la puissance radiative perdue par un objet de géométrie connue en fonction de sa température. La seconde étape consistera alors à simuler le système accompagné de sa loi de dissipation de puissance grâce au logiciel de CFD PHOENICS. Les résultats seront validés par comparaison avec les données expérimentales.

II.2.2 Bilan radiatif du condenseur et dissipation d'énergie

Nous avons vu au Chapitre I.2 que le refroidissement radiatif s'appréhende très simplement comme la somme des radiations (énergies) émises et reçues par un corps. Dans le cas où ce corps à température ambiante est en équilibre radiatif avec le ciel nocturne froid, il dissipe de l'énergie suivant l'Eq. I.(15). Les ordres de grandeur du refroidissement radiatif sont représentés sur la Figure I.5.

La radiance du ciel clair n'est pas isotrope et l'émissivité relative du ciel admet une variation angulaire $\varepsilon_{s,\theta}$ en fonction de l'angle avec le zénith θ (d'après l'Eq. A-I.(17) donnée par Berger and Bathiebo, 2003). En conséquence, pour des structures radiatives complexes, la

puissance dissipée dépendra des fractions de ciel vues par la surface rayonnante et des masques engendrés par son architecture. C'est pourquoi il a été décidé de développer un premier programme (langage FORTRAN) afin de calculer pour tout élément de surface dS du condenseur le bilan radiatif intégré en 3 dimensions dans l'ensemble de demi-espace vu par dS et représenté sur la Figure II.5. En coordonnées sphériques, le pas d'intégration du programme est de 1° suivant γ et φ .

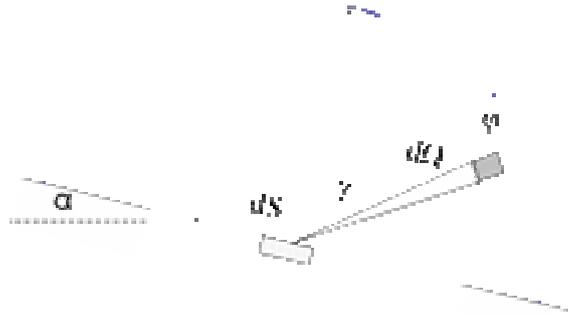


Fig. II.5. Angle solide élémentaire $d\Omega$ dans le demi-espace vu par dS et le repère sphérique $(r; \gamma; \varphi)$ associé.

i. Émittance angulaire du matériau

L'émittance totale du corps rayonnant (énergie radiative sur l'ensemble du spectre) dE_c en fonction de sa température et pour une surface élémentaire dS est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann:

$$dE_c = dS \varepsilon_c \sigma (273 + T_c)^4 \quad \text{II.(12)}$$

dE_c est en W

T_c est en $^\circ\text{C}$

$\sigma = 5,673 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la constante de Stefan Boltzmann

Pour la suite des simulations, nous prendrons $\varepsilon_c = 0,94$, comme émissivité typique de nombreux matériaux (valeur déjà utilisée comme référence, cf. Muselli *et al.*, 2006a). L'émissivité actuelle du film utilisé est voisine de 0,9 mais les recherches récentes (Chapitre I.3) ont montré que le rendement radiatif pouvait être optimisé (rendement idéal pour $\varepsilon_c = 1.0$). Concernant l'émissivité angulaire d'une source radiative, de nombreuses études ont montré que celle-ci dépendait de la nature du matériau : métal, minéral, polymères organiques etc... Cabannes and Gervais (1996) ; Robinson, (1966) et Guyer and Brownell,

(1999) précisent que pour un matériau polymère thermoplastique, l'émissivité ε_c est isotrope quel que soit l'angle d'inclinaison par rapport à la surface.

La loi de Lambert permet d'exprimer la puissance émise par dS dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ du demi-espace et l'expression de l'émittance angulaire du matériau devient dans le repère $(r ; \gamma ; \varphi)$:

$$dE_{c,\gamma,\varphi} = \frac{dE_c}{\pi} \times \cos \gamma \times d\Omega \quad (\text{W}) \quad \text{II.(13)}$$

avec

$$\cos \gamma = \cos \alpha \cdot \cos \theta + \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \quad \text{II.(14)}$$

L'Eq. II.(14) donne γ dans le repère sphérique du ciel $(r ; \theta ; \varphi)$ où α est l'angle que fait le plan portant dS par rapport à l'horizontale et θ l'angle au zénith (Robinson, 1966).

Dans le repère associé au ciel, l'émittance de la surface dS est :

$$dE_{c,\theta,\varphi} = \frac{dE_c}{\pi} (\cos \alpha \cdot \cos \theta + \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi) \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad \text{II.(15)}$$

avec $d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$ exprimé en str.

ii. Emission de l'environnement du système dans $d\Omega$

Comme largement décrit au Chapitre I.2, en conditions nocturnes, le rayonnement ambiant de grandes longueurs d'onde est émis par le sol et il est ensuite en partie absorbé puis rediffusé vers la surface terrestre par les molécules H_2O , CO_2 , CH_4 et O_3 en altitude. Suivant l'Eq. A-I.(2) et par analogie à l'Eq. II.(12), l'énergie dE_s reçue du ciel par une surface élémentaire dS de condenseur placée horizontalement s'écrit :

$$dE_s = dS \varepsilon_s \sigma (273 + T_a)^4 \quad \text{II.(16)}$$

Emissivité totale du ciel

L'Annexe A-I.1 présente de nombreux modèles numériques, semi-empiriques et empiriques donnant la valeur de ε_s . Une estimation de l'émissivité totale du ciel selon Pedro et Gillespie (1982), cité par Muselli *et al.* (2006a), est donnée par les Eqs. A-I.(14) et A-I.(15). Cette estimation est utilisée ici. Le ciel standard pris en référence tout au long des simulations numériques sera considéré comme clair ($N=0$) et la température du sol sera considérée comme égale à la température ambiante, fixée à la valeur 15°C . La valeur de ε_s calculée est 0,795 et

sera arrondie à 0,8 compte tenu du caractère empirique de cette formule et des valeurs légèrement supérieures données par d'autres auteurs dans les mêmes conditions (Nilsson, 1994 ; Awanou and Hazoume, 1997).

Emissivité angulaire de l'environnement ciel plus sol

L'atmosphère terrestre n'est pas homogène, et le rayonnement IR nocturne du ciel est la somme aussi bien de l'émission de l'ozone à très haute altitude et basse température (inférieure à 263 K) que de la vapeur d'eau au niveau du sol à température ambiante (Awanou, 1991).

Les travaux de Bliss (1961, cité par Awanou, 1998) puis Berdhal (1983) avaient pour but de modéliser l'atmosphère comme une succession de couches de compositions et températures différentes. L'Eq. A-I.(17) permet de définir une émissivité angulaire $\varepsilon_{s,\theta}$ de la voûte céleste en fonction de l'émissivité totale ε_s décrite précédemment (Awanou, 1997 ; Berger and Bathiebo, 2003) :

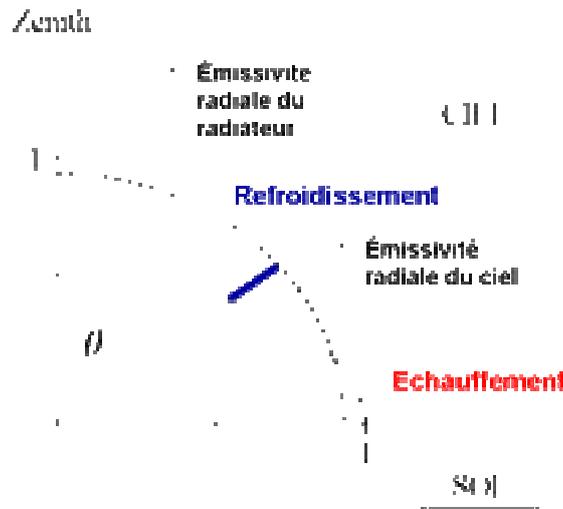


Fig. II.6. Trait plein : émissivité angulaire du ciel $\varepsilon_{s,\theta}$ retenue pour la suite de la modélisation en fonction de l'angle au zénith $0 \leq \theta \leq \pi$. Pointillés : émissivité angulaire du matériau.

Pour un angle $\theta > \pi/2$ (radiation du sol, Figure II.6), l'émissivité angulaire sera considérée comme unité, le sol étant assimilé à un corps noir rayonnant à sa température. Le cas réel, plus complexe car donnant une émissivité propre à chaque nature de sol, ne sera pas traité ici (végétation, roches, surface aménagée...). Une modélisation plus fine du sol pourra être envisagée ultérieurement dans le cas d'études de sites d'implantation.

Il est possible à présent d'exprimer l'énergie $dE_{s, \theta, \varphi}$ reçue du ciel par la surface dS dans le même angle solide élémentaire $d\Omega$:

$$dE_{s, \theta, \varphi} = \frac{\varepsilon_{s, \theta} dE_s}{\varepsilon_s \pi} \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad \text{en W} \quad \text{II.(17)}$$

iii. Bilan radiatif du condenseur, énergie dissipée par rayonnement

Le bilan radiatif de dS pour un angle solide élémentaire $d\Omega$ s'écrit :

$$dE_{\alpha, \theta, \varphi} = \left(\frac{\varepsilon_{s, \theta}}{\varepsilon_s} dE_s - (\cos \alpha \cdot \cos \theta + \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi) dE_c \right) \frac{\sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}{\pi} \quad \text{II.(18)}$$

La puissance E_i reçue par un corps de surface dS (incliné d'un angle α avec l'horizontale) dans le demi-espace lui faisant face est calculée par intégration numérique de dE_{α} pour les angles $0 < \theta < 180^\circ$ et $0 < \varphi < 360^\circ$ par pas de 1° .

$$E_i = \int_{\theta, \varphi} dE_{\alpha, \theta, \varphi} \quad \text{II.(19)}$$

La loi de dissipation d'énergie par le condenseur (W m^{-2})

$P_{T,C} = f(T_c)$ s'écrit :

$$P_{T,C} = \frac{1}{S} \sum E_i \quad \text{II.(20)}$$

iv. Géométries planes « ouvertes »

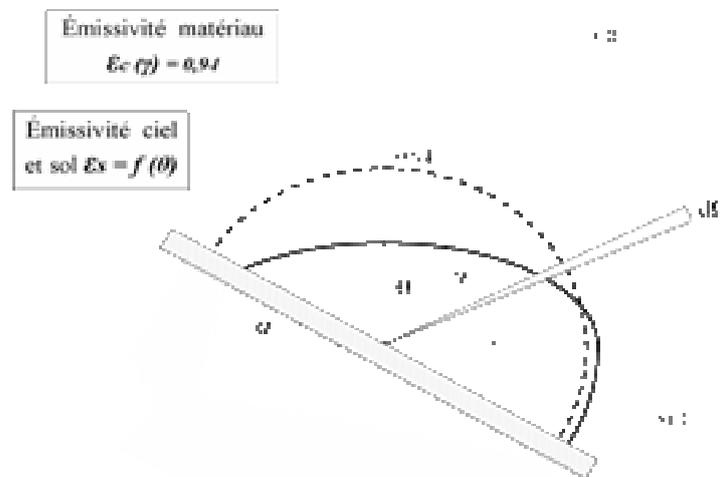


Fig. II.7. Émissivités angulaires en fonction de l'angle d'inclinaison au zénith θ pour une source plane.

La Figure II.7 représente la distribution spatiale des émissivités d'une source de rayonnement (trait pointillé) ainsi que de l'environnement (trait plein) pour une surface ouverte d'angle d'inclinaison α . Le programme permet d'intégrer le calcul décrit précédemment dans le demi-espace avec un pas de 1° pour les angles θ et φ . Comme dit plus haut, l'environnement choisi est un ciel clair à 288,1 K (15°C) et d'émissivité moyenne 0,8. Le calcul sera itéré successivement pour des températures de surface de -18 à $+40^\circ\text{C}$ avec un pas de 1°C . Les valeurs moyennes de la puissance émise $P_{T,C}$ pour les plans d'inclinaison $\alpha = 0 ; 15 ; 30 ; 60$ et 90° sont présentées sur la Figure II.8. Dans chaque cas, la loi $P_{T,C}$ peut être exprimée par une fonction polynomiale de second degré $M_0 + M_1T_c + M_2T_c^2$ avec un coefficient de régression de $R=1$. On voit bien que le déficit radiatif diminue quand l'angle d'inclinaison augmente.

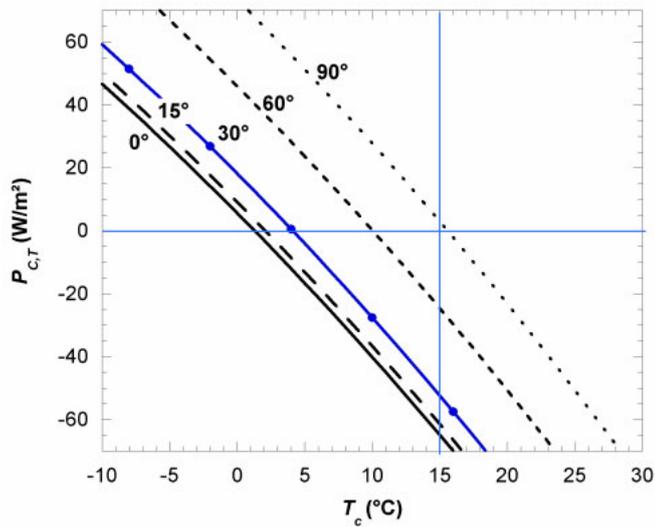


Fig. II.8. Bilans radiatifs d'un plan pour des inclinaisons de $\alpha = 0^\circ ; 15^\circ ; 30^\circ ; 60^\circ$ et 90° par rapport à l'horizontale. T_c : Température du corps radiatif. Température du ciel $T_s = 15^\circ\text{C}$. Pour une meilleure lecture, seule la gamme de températures de -10 à 30°C est présentée

v. Géométries coniques « fermées »

Pour une géométrie conique, la basse atmosphère et le sol sont masqués par la face opposée du cône comme représenté sur la Figure II.9. En première approximation et pour des vents faibles (conditions de formation de la rosée), deux surfaces opposées du cône sont considérées d'égales températures en raison de la symétrie, ce qui permet de considérer le bilan radiatif $d\Omega = 0$ si $\theta > \theta_L$ avec θ_L l'angle limite comme défini sur la Figure II.9. En raison du flux d'air non symétrique à l'intérieur du cône, une différence de température sera observée entre deux surfaces en opposition dans le cas réel. Cependant, l'effet de l'échange

radiatif négligé ici est de réduire les écarts de températures sur la structure. C'est pourquoi le fait de traiter des données moyennes obtenues sur l'ensemble de l'objet devrait limiter les erreurs de mesures induites par ces échanges internes. La surface du condenseur est finalement en équilibre radiatif avec la fraction de ciel d'émissivité la plus faible, ce qui augmente la puissance de refroidissement du condenseur radiatif « fermé » par rapport à un plan « ouvert ».

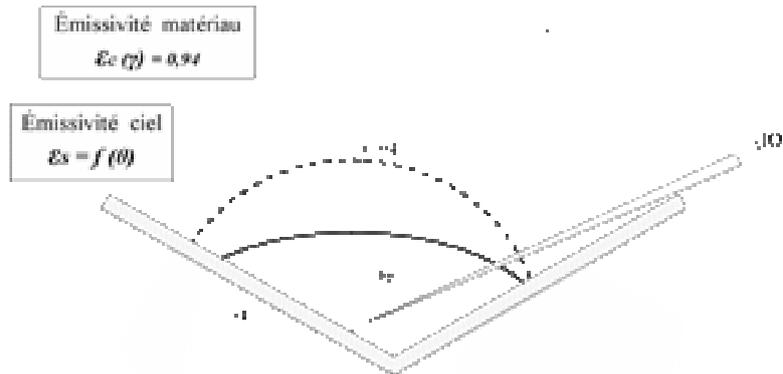


Fig. II.9. Émissivités angulaires comparées en fonction de l'angle d'inclinaison au zénith θ pour un condenseur conique.

La Figure II.10 montre que cette fraction de ciel « apparente » pour un élément de surface dS est délimitée par un angle limite θ_L lui-même dépendant de l'angle φ et de la hauteur relative h/H de dS dans le cône :

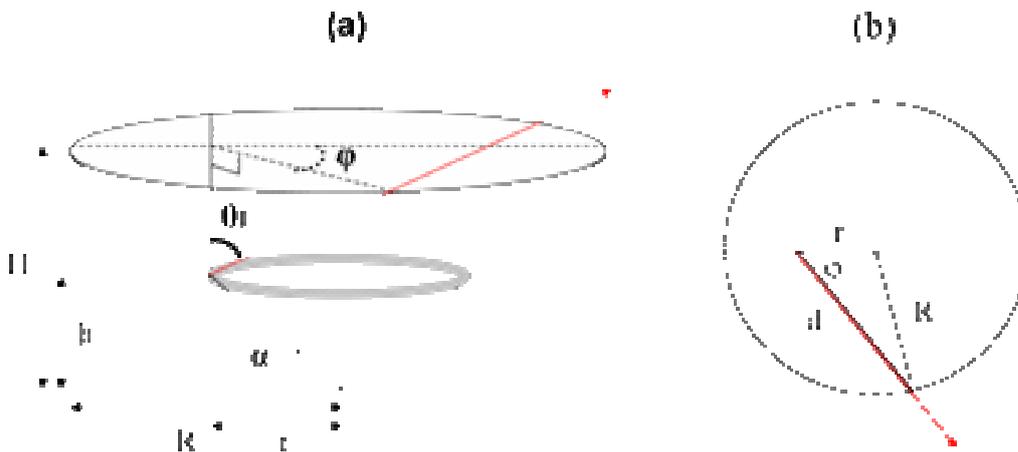


Fig. II.10. (a) Représentation en 3 dimensions des paramètres géométriques à prendre en compte pour l'intégration du bilan radiatif en un point du cône. (b) même géométrie en projection verticale.

L'angle limite θ_L s'exprime de la façon suivante :

$$\theta_L = \tan^{-1} \frac{d}{(R-r) \cdot \tan \alpha} \quad \text{d'après la Figure II.10a} \quad \text{II.(21)}$$

$$d = r \cdot \cos \varphi + (R^2 + (r \cdot \sin \varphi)^2)^{1/2} \quad \text{d'après la Figure II.10b} \quad \text{II.(22)}$$

Le bilan radiatif $dP_{T,C}(r)$ est calculé pour chaque élément de surface dS qui a la forme d'un anneau circulaire du cône de hauteur $(dr/\cos \alpha)$ et de rayon r . Dans la hauteur du cône, 50 valeurs de r de 0 à R sont calculées et le programme numérique intègre à chaque pas le bilan des émittances de la surface radiative et du ciel entre les angles θ de 0 à $\theta_L(\varphi)$ avec $\varphi \in [0 ; 2\pi]$ par pas de 1 Deg.

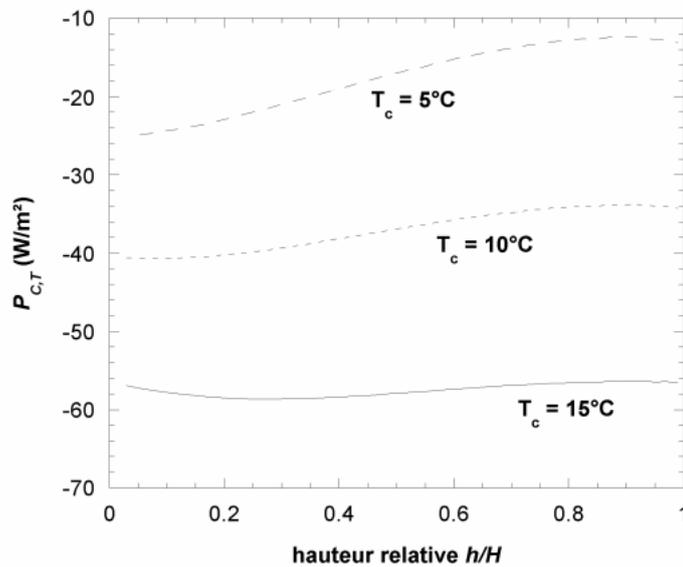


Fig. II.11. Bilan radiatif comparé dans la hauteur relative h/H d'un cône d'inclinaison 30° avec l'horizontale. Résultats donnés pour différentes T_c (5 ; 10 et 15°C) et pour un $T_a = 15^\circ\text{C}$.

Pour des écarts de température $(T_a - T_c)$ faibles (par exemple $10 < T_c < 15^\circ\text{C}$), la variation de $P_{T,C}$ est faible en fonction de h/H . Donc, en première approche, une telle précision n'est pas nécessaire et seules les valeurs moyennes du bilan radiatif obtenues pour toute la surface du cône seront utilisées. La Figure II.12 montre les résultats obtenus pour les cônes de $\alpha = 20^\circ ; 30^\circ$ et 40° , à comparer aux plans inclinés de 0 et 30° dans la plage de température qui nous intéresse (5 à 15°C pour un ciel à 15°C) :

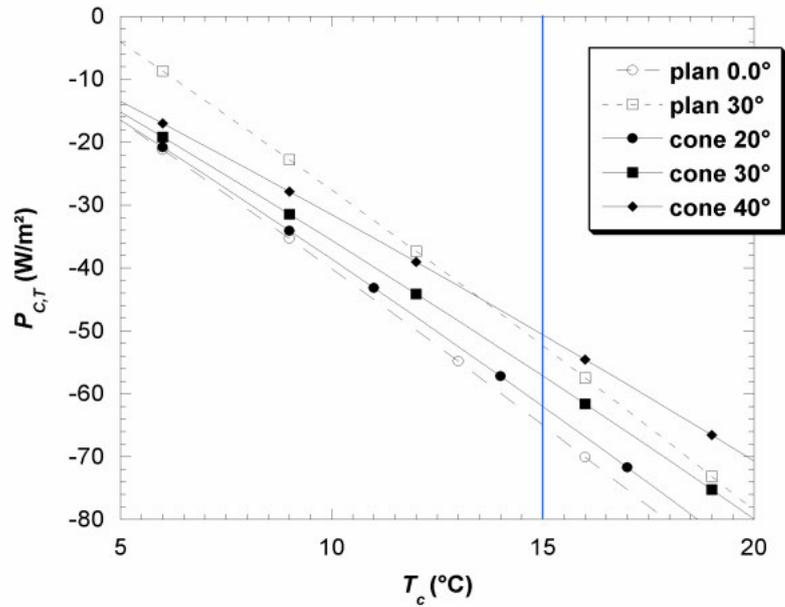


Fig. II.12. Bilans radiatifs des structures coniques pour des inclinaisons de 20° ; 30° et 40° par rapport à l'horizontale. T_c : Température du film radiatif, température du ciel T_s : 15 °C

Ces lois exprimées sous forme de polynômes de second degré seront par la suite programmées dans le logiciel de simulation PHOENICS afin de dissiper une puissance thermique localisée à chaque itération du logiciel en fonction de la température de l'objet. Les lois sur une plage de températures de 255 à 315 K sont de la forme donnée par l'Eq. II.(23) dont les coefficients a, b et c sont des fonctions de la structure (plan, cône, Tableau II.1) du condenseur et de α .

$$P_{c,T} = a + bT_c + cT_c^2 \quad \text{II.(23)}$$

STRUCTURE (Angle α / horizontale)		a	b	c
PLAN	0	5,9221		
	15	9,4134		
	30	18,502		
	45	31,492	-4,3435	-0,025912
	60	46,259		
	75	60,896		
	90	73,856		
CONE	15	4,9919	-4,2105	-0,025118
	30	4,4581	-3,7767	-0,02253
	45	3,5725	-3,0826	-0,018389
	60	2,4016	-2,1745	-0,012972

Tab. II.1 Coefficients des lois polynomiales de dissipation de puissance.

II.2.3 Programmation du logiciel de CFD PHOENICS

Les simulations numériques CFD se déroulent en trois phases : pré-traitement avec définition des conditions aux limites, résolution et post-traitement (exploitation des résultats).

i. Programmation et conditions aux limites

Définition du domaine de simulation et du maillage de discrétisation

Le choix du volume (domaine) contenant la machine thermique à étudier est essentiel pour l'obtention de résultats en cohérence avec le système réel. La définition du système doit tenir compte des facteurs physiques pouvant influencer les écoulements. Pour un vent soufflant suivant l'axe horizontal [Oz), une géométrie admettant une symétrie de révolution suivant l'axe vertical [Oy) sera préférentiellement simulée en 3 Dimensions. Dans le même flux, une géométrie admettant une symétrie par rapport au plan (yz) sera simulée en 2D, ce qui se fait sans modification en imposant seulement 2 mailles suivant x. Pour les structures étudiées couvrant des surfaces allant de 0,16 à 255 m², l'espace de travail commun sera un volume de dimension variable comprenant le système étudié ainsi qu'une portion de l'espace extérieur dans lequel sont disposés les objets composant la machine thermique (isolant, film radiatif,

sol suivant la topographie du site). Pour cette modélisation d'un système exposé en extérieur et dont la vitesse du vent V est une variable essentielle, une entrée et une sortie de fluides sont ajoutées telles que présentées sur la Figure II.13 :

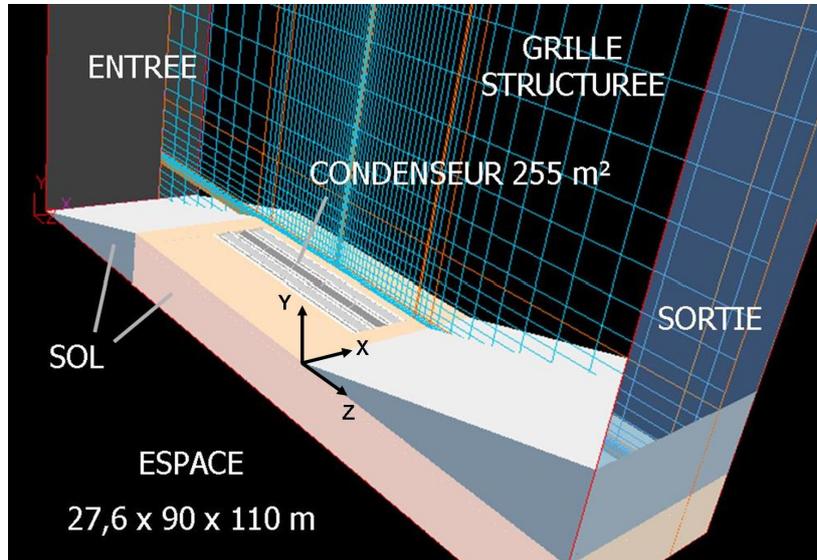


Fig. II.13. Description en réalité virtuelle sur PHOENICS de trois rangées de condenseur de type « tranchées » installées à Panandhro (état du Gujarat, Inde) sur une pente de 15°. Surface totale simulée du condenseur : 255 m²

Une fois défini, cet espace est subdivisé en volumes élémentaires qui définissent la maille du calcul. Cette étape est également primordiale car jusqu'à un certain rétrécissement des volumes, la solution est dépendante de la maille. PHOENICS a la particularité de proposer une grille structurée dont le maillage se fait suivant les directions x , y et z du repère orthonormé. Cela permet de définir un fichier support des options de programmation (appelé « ground ») qui soit commun à toutes les géométries puisque seule la densité (et non la direction) du maillage sera modifiée par l'introduction de différents objets virtuels.

Afin d'éviter que la comparaison des solutions pour plusieurs systèmes ne soient dépendantes du maillage, les objets radiatifs auront tous une épaisseur de 5 cm pour une maille de 2 cm, et ce, quelle que soit la géométrie et la taille du condenseur (voir plus bas les conséquences). Pour vérification, le condenseur plan de 1 m² a été simulé jusqu'à une trame 1/2 (1 cm) sans observer de variation significative des résultats moyennés tels qu'ils seront exploités par la suite. L'option « PARTIAL SOLID Treatment » qui permet de définir des objets de taille inférieure à la maille ne sera pas appliquée ici car l'algorithme de section des cellules cartésiennes par une surface oblique n'est pas disponible et cette section (m²) est nécessaire pour l'application de la condition de dissipation d'énergie $P_{T,C}$ déterminée par l'Eq. II.(20).

En règle générale, le maillage est ensuite paramétré plus dense à proximité des solides et dans les zones d'écoulement turbulent ou à Re élevé (Smale *et al.*, 2006).

A chaque volume élémentaire défini par ses coordonnées spatiales (x_i ; y_i ; z_i) et ses dimensions (dx_i ; dy_i ; dz_i) sont associées les valeurs locales de température T_i ; Pression P_i ; composantes de vitesse (u_i ; v_i ; w_i) ainsi que les paramètres internes de densité ρ_i et turbulence (modèle courant k- ϵ). Cette modélisation offre un avantage considérable : la programmation du logiciel se fait par rapport aux propriétés de chaque cellule, indépendamment de la géométrie des objets. Lors de la mise en place, un indice est donné à chaque objet, indice auquel peuvent être associées des propriétés spécifiques (dissipation de puissance, propriétés physiques du matériau...). Ainsi, il sera possible :

- d'étudier des géométries très différentes sans modification fondamentale du programme source.
- d'imposer des conditions aux limites et de récupérer les données séparément sur chaque objet afin de mieux comprendre le fonctionnement global du condenseur.

Conditions aux limites : propriétés intrinsèques des objets virtuels

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes dans un solide et à sa surface, le programme associe à un volume élémentaire (indice i) particulier les propriétés du solide correspondant :

- masse volumique (densité) ρ_i (kg m^{-3})
- capacité calorifique massique $C_{p,m(i)}$ ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- conductivité thermique k_i ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- coefficients d'expansion thermique, donnés pour l'air à 20° C et 80 % d'humidité relative
- coefficient de compressibilité qui sera négligé ici

Les valeurs réelles de ces grandeurs sont caractéristiques du film LDPE radiatif d'épaisseur 0,35 ou 0,20 mm et du Polystyrène expansé d'épaisseur 3 cm ou 1 inch (1 inch = 2,54 cm). Comme précisé précédemment, les épaisseurs des objets virtuels correspondants e_v sont augmentées (5 cm pour le film radiatif virtuel) dans le but de diminuer le maillage (imposé à 2 cm). C'est pourquoi les paramètres intrinsèques aux matériaux doivent être corrigés en modélisation. Deux relations, qui expriment la conservation de la capacité calorifique et de la conductivité thermique, doivent être cependant respectées. L'indice (v) désigne les valeurs de masse volumique ρ ; capacité calorifique massique $C_{p,m}$; conductivité thermique k pour l'objet virtuel (par exemple le film radiatif, d'épaisseur $e_v = 5$ cm)

$$\rho_i \times C_{p,m,(i)} \times e_i = \rho_v \times C_{p,m,(v)} \times e_v \quad \text{II.(24)}$$

$$\frac{k_i}{e_i} = \frac{k_v}{e_v} \quad \text{II.(25)}$$

Dans le système étudié, la correction de la conductivité thermique n'a pu être effectuée. En effet, son augmentation isotrope augmente à tort les flux thermiques parallèles à la surface du condenseur. La conséquence en est une homogénéisation artificielle de la température en volume du matériau. Dans ce travail, où il s'agit d'étudier les écarts entre la température de surface du condenseur et la température de l'air ambiant, nous nous limiterons donc à la seule exploitation des valeurs de température de surface.

Conditions aux limites : puissance dissipée par le film radiatif « virtuel »

Le bilan thermique du film radiatif virtuel est la somme de l'énergie perdue par bilan radiatif (négatif) et du gain d'énergie par convection de l'air à sa surface supérieure (et en moindre mesure, par conduction dans l'isolant à sa surface inférieure). Les échanges par conduction sont calculés par le logiciel. Le bilan radiatif sera introduit dans le programme source par une puissance volumique $P_{T,v}$ (en W m^{-3}) appliquée au volume de toute cellule du « film radiatif virtuel » en fonction de sa température. La loi de bilan radiatif surfacique $P_{T,c}$ (W m^{-2}) établie précédemment (chapitre II.2.1) devient une puissance volumique :

$$P_{T,v} = \frac{P_{T,c}}{e_v} \quad \text{où } e_v \text{ est l'épaisseur du film radiatif virtuel (m)} \quad \text{II.(26)}$$

Conditions aux limites : profil de vitesse du flux d'air entrant

La température initiale $T_a = 15^\circ\text{C}$ (288,1 K) sera programmée pour tous les objets virtuels ainsi que pour l'air entrant dans l'espace de travail. Cet air aura les propriétés physiques d'un air standard à 20°C et 1 atm et de $RH = 80\%$.

Un flux d'air en régime permanent au profil logarithmique en fonction de l'altitude est imposé sur l'objet virtuel « entrée » du modèle et donne la vitesse initiale du fluide selon l'Eq. I.(20). Les vitesses de vent données par la suite seront les valeurs à $y = 10$ m en entrée de l'espace simulé (la hauteur z dans l'Eq. I.(20) doit être remplacée par y dans PHOENICS).

ii. Calcul numérique

En comparaison de l'étude analytique des transferts de chaleur présentée au Chapitre II.1, un apport majeur de l'expérience numérique est la possibilité qu'offre le calcul itératif par discrétisation en éléments finis d'additionner localement, entre cellules voisines, les composantes forcées et libres de la convection.

Dans l'analyse de la convection naturelle, les principes de conservation sont utilisés pour gouverner les équations d'état, les équations de mouvement, de transfert thermique et de continuité. Pour le développement de l'équation de mouvement dans les simulations, les termes proportionnels au poids des fluides (ρg) font généralement l'objet d'une attention particulière. Pour les travaux réalisés à pression atmosphérique, la validité de l'approximation de Boussinesq est admise, à savoir que la densité est considérée variant avec la température du corps ou fluide considéré lorsque le terme ρg apparaît, mais la densité est donnée constante partout ailleurs dans les équations de conservation (Guyer and Brownell, 1999).

Par ailleurs, le modèle de description des écoulements turbulents $k \sim \varepsilon$ modifié par Chen-Kim (nommé KECHEN dans PHOENICS) est utilisé ici. Si le choix de ce modèle est décrit comme déterminant pour la fiabilité des simulations, il n'est que secondaire dans les travaux décrits ici en raison des faibles vitesses des flux.

iii. Accès et traitement des résultats

A ce stade de développement, la simulation a été programmée en monophasique, c'est-à-dire sans quantifier la condensation de rosée. En conséquence, la température moyenne de surface $\langle T_c \rangle$ pour un état d'équilibre défini sera le principal paramètre de comparaison extrait de ces simulations. Cependant, de nombreuses autres grandeurs sont disponibles pour chaque cellule de l'espace du modèle. Les exemples suivants ne sont pas exhaustifs :

- Température moyenne de chaque objet T (°C)
- Température de surface T_c (°C)
- Surface des objets S_c (m²)
- Surface S_d (m²) où la condensation est observée, c'est-à-dire la surface de l'objet à une température inférieure à la température de rosée ($T_d = 11,8^\circ\text{C}$ pour $T_a = 15^\circ\text{C}$ et $RH = 80\%$).
- Vitesse de l'air en tout point de l'espace (par exemple à proximité de la surface du condenseur)

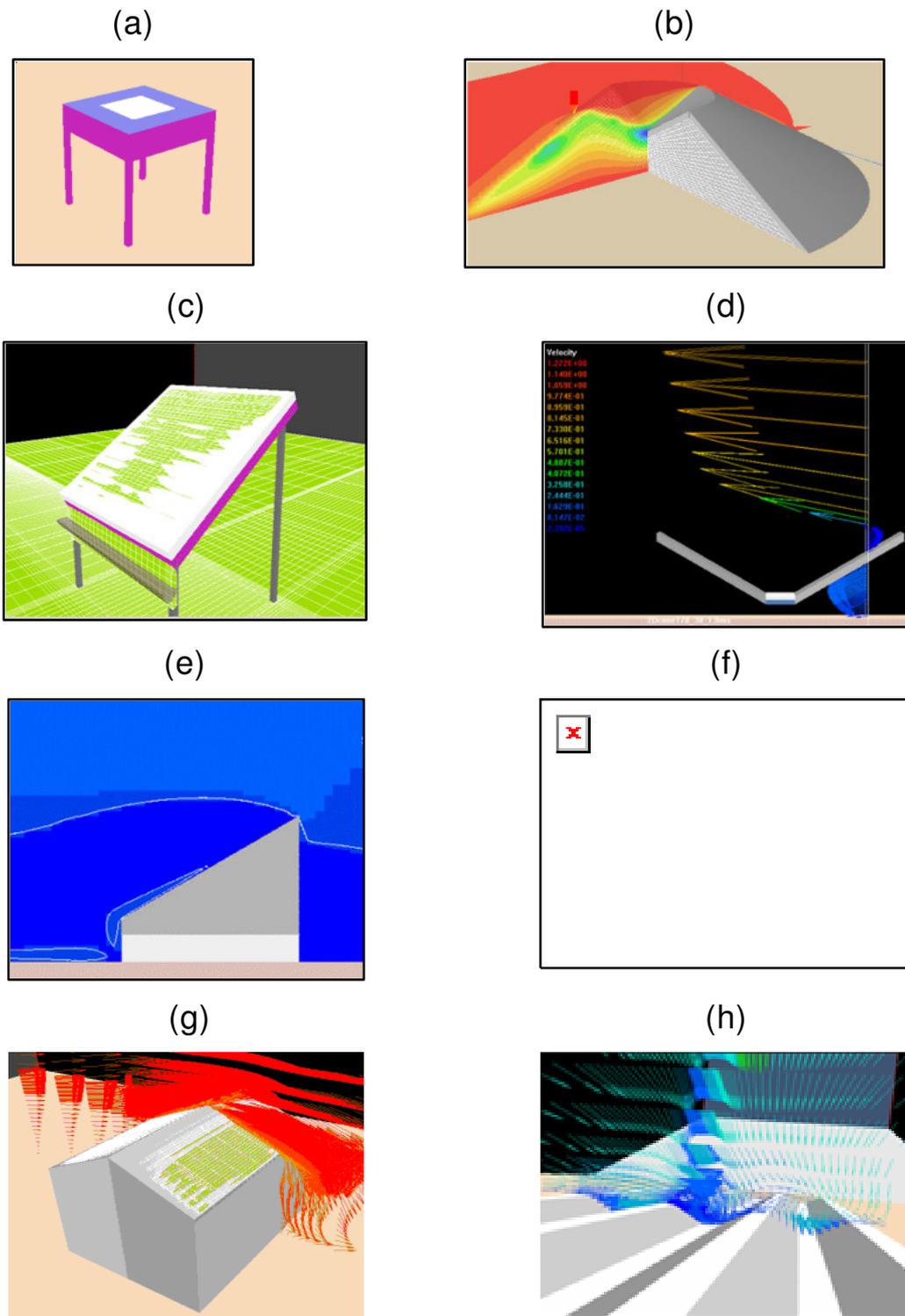


Fig. II.14. (a) condenseur 400x400 mm posé sur balance (voir chapitre I.1), 3D ; (b) champ de températures interne et externe à une structure double conique, 3D ; (c) surface de condensation sur un condenseur standard 1 m² incliné à 30° ($V = 1 \text{ m s}^{-1}$, $T_d = 11,8 \text{ °C}$), 3D ; (d) profil de vitesse sur un cône de 7,32 m² incliné de 30° par rapport à l'horizontale, 2D ; (e) champ de vitesses sur condenseur « dune » de 30 m², 2D ; (f) distribution des températures sur une onde de 6 plans successifs de longueur 1 m et inclinés à 30°, 2D ; (g) surface de condensation sur toiture de 15 m² inclinée à 22° (Bisevo, Croatie), 3D ; (h) profil de vitesse s sur 3 tranchées (255 m²), usine de Panandhro (Inde), 3D

Le programme développé pour la simulation de condenseurs radiatifs a été utilisé pour la compréhension et la réalisation de 8 géométries de condenseurs (Figure II.14). Les données graphiques à partir de l'interface « Virtual Reality Viewer » présentent les résultats en trois dimensions sous forme de vecteurs, de gradients, ou d'iso surfaces. Les grandeurs accessibles sous cette forme visuelle sont : pression, température, composantes vitesse ainsi que les composantes des turbulences. L'observation de ces distributions permet la compréhension ou la vérification de certaines hypothèses émises sur le terrain.

II.3 Applications : optimisation de systèmes, validation du modèle

Des dispositifs utilisant le refroidissement radiatif de surfaces pour la condensation peuvent être installés sur des supports déjà existants (toitures) ou sur des structures innovantes aux formes plus complexes afin d'augmenter le rendement en eau condensée. La validation du programme de simulation des condenseurs radiatifs se fera par comparaison des efficacités relatives de chaque architecture. L'efficacité simulée de chaque système sera comparée à son efficacité mesurée expérimentalement en conditions réelles. Jusqu'à présent, seuls des plans horizontaux ou des pilotes de type plan incliné ont été étudiés. Il a donc été décidé de réaliser un pilote de forme complexe et au fonctionnement thermodynamique différent afin de valider le programme. Une forme de cône inversé est un exemple extrême au fonctionnement thermodynamique très spécifique.

II.3.1 Optimisation d'un condenseur conique innovant

La forme de cône inversé réduit la convection libre donc l'apport de chaleur sur la surface du condenseur du fait de la stagnation de l'air refroidi de densité supérieure dans la partie basse. Le refroidissement de la surface devrait alors être favorisé et la condensation de rosée augmentée. De plus, la forme conique favorise le refroidissement radiatif en masquant à la surface radiative interne les plus basses couches atmosphériques qui, comme nous l'avons vu au Chapitre I.2 et par l'Eq. A-I.(17), sont aussi celles qui ont la plus grande émissivité IR. Le rayonnement IR reçu de l'environnement peut ainsi être abaissé. Berger and Bathiebo (2003) estiment que la bande atmosphérique s'élevant dans un angle de 15° au-dessus de l'horizon émet environ 25 % de la radiance globale d'un ciel clair. Jacobs *et al.* (2004) ont effectué des

mesures expérimentales sur une pyramide inversée aux quatre faces inclinées de 30° avec l'horizontale. Le substrat de condensation était du film LDPE « Opur » posé sur un isolant de 3 cm d'épaisseur. Le gain en rendement de la pyramide inversée de $1,11 \text{ m}^2$ par rapport à un condenseur plan de 1 m^2 standard a été mesuré comme étant 115 %.

Un condenseur de $7,32 \text{ m}^2$ a été simulé par CFD (Clus *et al.*, 2006a) afin de déterminer le meilleur angle d'inclinaison de sa surface avant fabrication. En effet, réduire l'angle d'ouverture du cône réduit le transfert convectif mais réduit également le refroidissement radiatif. Les résultats sont présentés sur la Figure II.15.

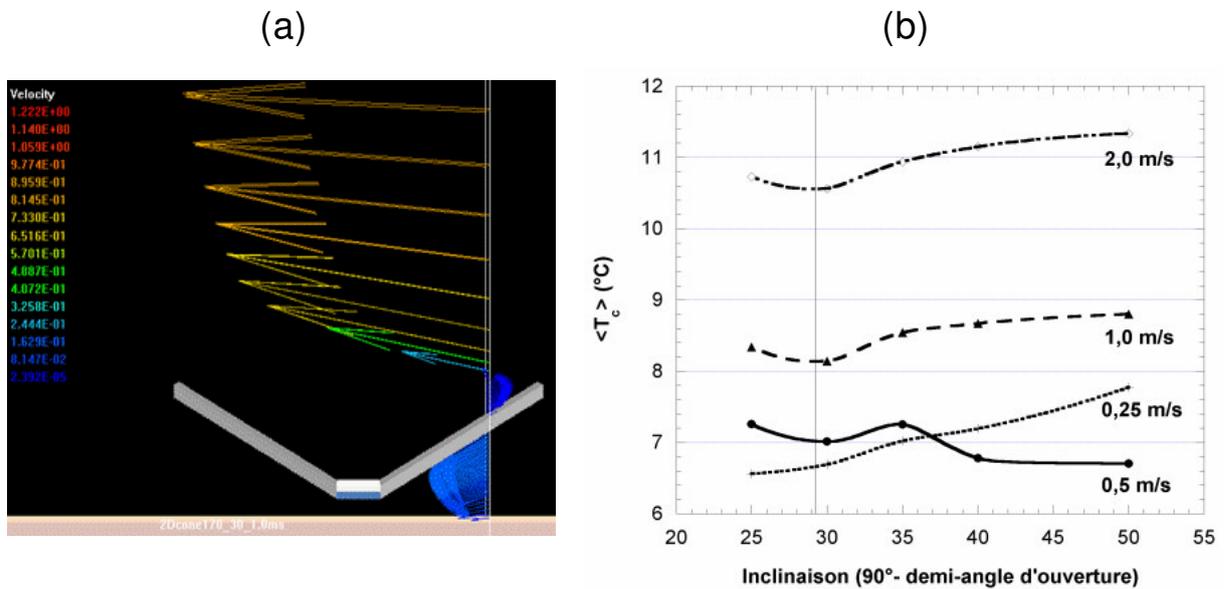


Fig. II.15. (a) Capture d'écran du condenseur conique de $7,32 \text{ m}^2$ simulé (2D) pour un angle d'inclinaison de 30° avec l'horizontale (b) Température moyenne de la surface interne au condenseur conique en fonction de l'angle d'inclinaison (90° - le demi angle d'ouverture du cône) et pour des conditions déterminées de vent $V = 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 \text{ m s}^{-1}$ (hauteur 10 m).

Un angle d'inclinaison de 30° avec l'horizontale (demi-angle d'ouverture du cône de 60°) a été désigné après simulation comme offrant le meilleur compromis pour le refroidissement du cône (Figure II.15b, trait vertical). Cela se vérifie particulièrement pour les vitesses de vent supérieures 1 et 2 m s^{-1} . Pour $0,5 \text{ m s}^{-1}$, il semble que le vortex interne au cône (convection forcée) soit du même ordre de grandeur que la convection libre, ce qui entraîne un refroidissement plus efficace pour un vent V sensé être moins favorable que le cas à $0,25 \text{ m s}^{-1}$. Finalement, le meilleur compromis est une pente de 30° ; il est intéressant de noter que cela correspond également à la pente recommandée dans le cas de condenseurs plans (Beysens *et al.*, 2003). Une telle inclinaison correspond aussi à l'angle pour lequel la force de gravité représente encore 50 % de la force à laquelle est soumise une goutte d'eau sur une surface verticale.

L'étape suivante fut de réaliser le condenseur conique afin de confronter les mesures physiques aux données simulées. La structure initiale est constituée de 10 supports « compas » en profilé d'acier galvanisé, assemblés avec un angle de 30° et disposés en rayonnement autour d'un collecteur central (écartement de 36°). Les supports sont joints par de la tôle galvanisée plane rivetée à même les profilés (Figure II.16a). Un mastic polyuréthane est appliqué entre tôles et supports afin de limiter la circulation d'air entre la structure initiale et la surface de condensation. L'isolant (polystyrène expansé d'épaisseur 3 cm) et le film LDPE « OPUR » (film radiatif et substrat de condensation) sont ensuite pressés sur la structure par 10 autres profilés d'acier galvanisé ou peints (Figure II.16b).



Fig. II.16. (a) détail de l'armature du condenseur conique. (b) vue d'ensemble.

Après 17 mois de mesures sur des pilotes en extérieur (conditions réelles), le cône de 7,32 m² présentait un rendement en rosée de 136,3 % d'un condenseur plan de 1 m². Avec un rendement moyen de 0,127 mm par nuit de rosée ($\pm 0,0938$) avec une mesure maximum à 0,432 mm (soit 3,16 L).

Il faut rappeler que les besoins incompressibles en eau d'une personne sont évalués par l'Organisation Mondiale de la Santé à 5 L quotidiens voire, en conditions temporaires de survie à 2 L par adulte et 1 L par enfant. Un modèle de condenseur conique rustique et performant tel que celui étudié pourrait être une bonne base de réflexion pour la mise au point de systèmes simples, bon marché et surtout très fiables destinés à apporter un complément de ressource durant les périodes de sécheresse pour des petits groupes de personnes isolées.

II.3.2 Validation des simulations par comparaison avec des mesures physiques enregistrées sur 5 condenseurs

Des expériences se déroulent depuis 8 ans sur le site d'Ajaccio et de nombreux condenseurs pilotes ont été testés. Leur comportement est désormais bien compris et de nombreuses corrélations ont été réalisées avec un nombre limité de paramètres météorologiques : vitesse du vent V (m s^{-1}), humidité relative RH (%), couverture nuageuse N (octas), température ambiante T_a ($^{\circ}\text{C}$), température de rosée T_d ($^{\circ}\text{C}$). Nous considérons désormais 4 de ces condenseurs expérimentaux (Figure II.17ABCD) qui ont été installés et étudiés à Ajaccio depuis 1998 et un collecteur de grande dimension (« usine de rosée », Figure II.17E) à Panandhro (NW de l'Inde, Sharan, 2006 ; Sharan *et al.*, 2007).

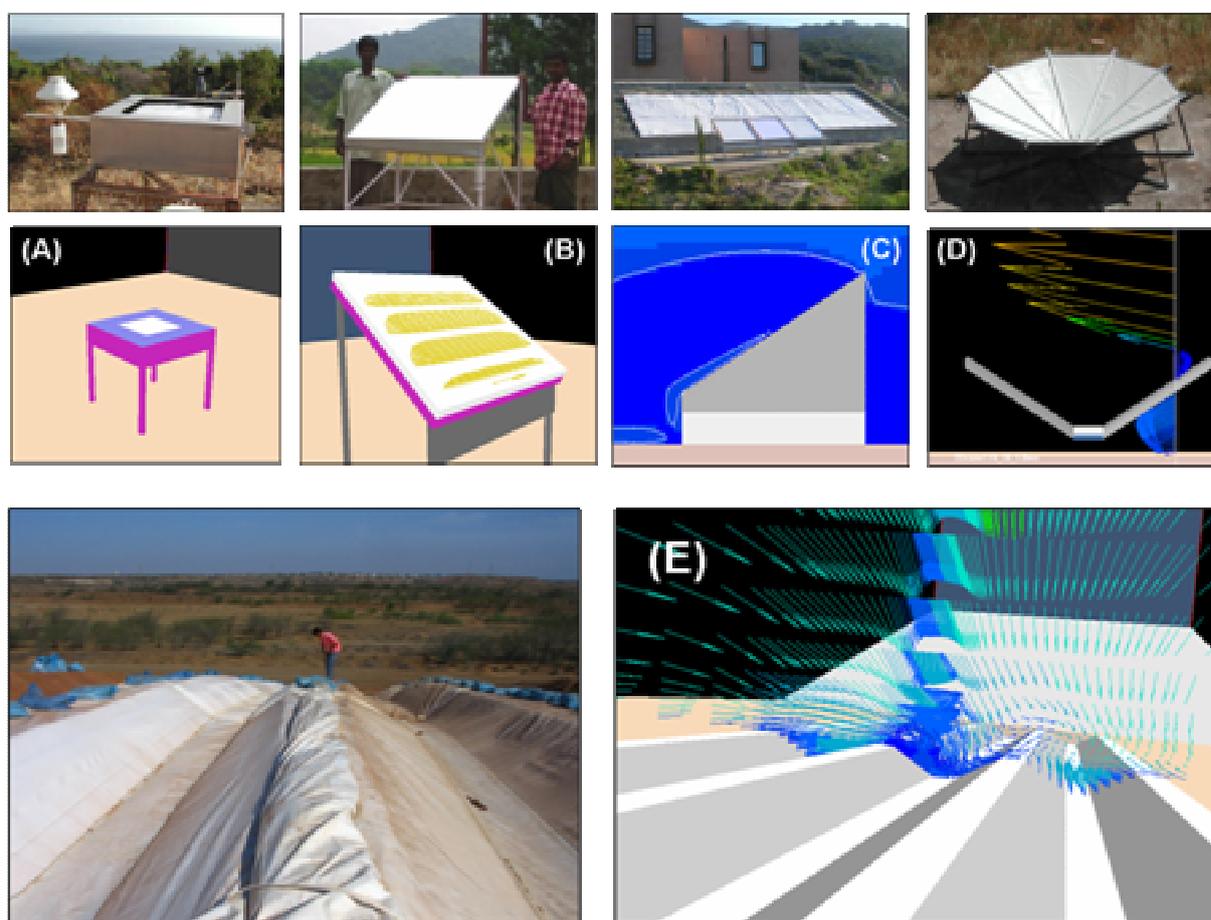


Fig. II.17. Condenseurs réels (haut) et virtuels (bas). (A) plaque de PTFE de $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$ isolée dans le boîtier « balance ». (B) condenseur « standard » de 1 m^2 incliné de 30° par rapport à l'horizontale, (C) condenseur de $3 \times 10 \text{ m}^2$ et incliné de 30° . (D) condenseur conique de $7,32 \text{ m}^2$ avec un angle d'ouverture du cône de 120° . (E) 3 rangées de condenseur « tranchée » de forme trapézoïdale (sommet et fond de 50 cm , deux faces de 100 cm inclinées à 30° , hauteur 50 cm , longueur 33 m sur une pente de 15° , dans le Gujarat (NW de l'Inde). (photo. O. Clus)

La Figure II.18 montre la température moyenne des surfaces $T_{cond} = \langle T_c \rangle$ des différentes structures présentées (Figure II.17) et simulées pour les conditions standard qui ont été précédemment décrites. La température est celle de la surface supérieure de chaque cellule élémentaire solide du condenseur. (A, D) ont un comportement symétrique par rapport à la direction du vent. (B, C) sont orientés de sorte à présenter leur face arrière au vent dominant nocturne comme préconisé par Beysens *et al.* (2003). Pour le condenseur « tranchées », les simulations ont été réalisées pour un vent horizontal venant du sommet de la colline et faisant un angle de 30° avec l'axe de la pente qui est aussi l'axe des « tranchées » du condenseur (Cf. Figure IV.18). Cette direction est proche de la direction de vent moyenne mesurée sur le site durant les événements de rosée.

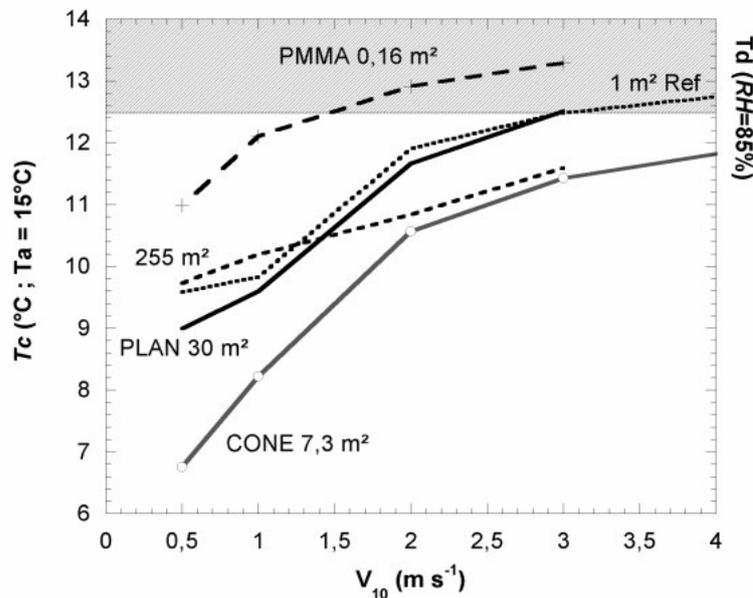


Fig. II.18. Températures de surface moyennes obtenues par simulations numériques et rapportées en fonction de la vitesse du vent à 10 m. Il n'y a pas de condensation dans la zone grisée si $RH = 85\%$ ($T_c < T_d = 12,5^\circ\text{C}$) ; 85% est une valeur de RH représentative au cours d'un événement de rosée

Dans le but de comparer différentes structures de condenseurs par simulation numérique dont les paramètres sont délibérément choisis identiques, il est admis par principe qu'un rendement de condensation h (mm/nuit) sera augmenté si l'efficacité du refroidissement est supérieure. Il est donc possible de comparer la puissance de refroidissement de chaque condenseur par rapport à un condenseur de référence de surface 1 m^2 et incliné à 30° . L'efficacité relative peut s'exprimer par un « gain en température » noté ΔT_0 (Beysens *et al.*, 2003) :

$$\Delta T_0 = \frac{T_{cond} - T_a}{T_{Ref} - T_a} \quad \text{II.(27)}$$

$T_a = 15^\circ\text{C}$; T_{Ref} température de surface simulée du condenseur de référence 1 m².

Le gain en température obtenu à partir des simulations numériques (Figure II.19a) peut atteindre 150%. Le rendement de rosée condensée dépend principalement de la différence $T_c - T_a$ ou de son équivalent RH (Lushiku *et al.*, 1989 cité par Muselli *et al.*, 2006a) et la puissance de refroidissement radiatif est limitée par la couverture nuageuse N . Ces deux paramètres ne sont pas a priori spécifiques aux géométries de condenseurs mais sont des grandeurs météorologiques générales qui s'appliqueront indifféremment à toutes les géométries. Donc, d'un point de vue physique, la variation du rendement en rosée observée pour différentes géométries devrait principalement dépendre du bilan radiatif et de la circulation de l'air qui sont, eux, particulièrement déterminés par la forme des systèmes. Le bilan radiatif et la circulation de l'air sont, eux inclus dans le calcul programmé sur PHOENICS. C'est pourquoi la comparaison par le biais du facteur réduit « gain en température » ΔT_0 des différents condenseurs (ciel clair, $N = 0$ et $RH = 80\%$) peut être considérée comme représentative des efficacités de chaque condenseur par rapport à la référence, quelles que soient les conditions météorologiques.

Ces températures issues de la simulation numérique peuvent être comparées aux données expérimentales représentées par le rendement en rosée réduit h_{cond}/h_{ref} (h en mm/nuit ; voir la Figure II.19b). Les mesures sur les condenseurs plans ont été menées à Ajaccio du 07-09-2003 au 06-12-2003 (45 événements de rosée) et les mesures sur le cône (et simultanément sur un condenseur de référence 1 m²), également à Ajaccio du 25-05-2005 au 14-11-2006 (107 événements de rosée).

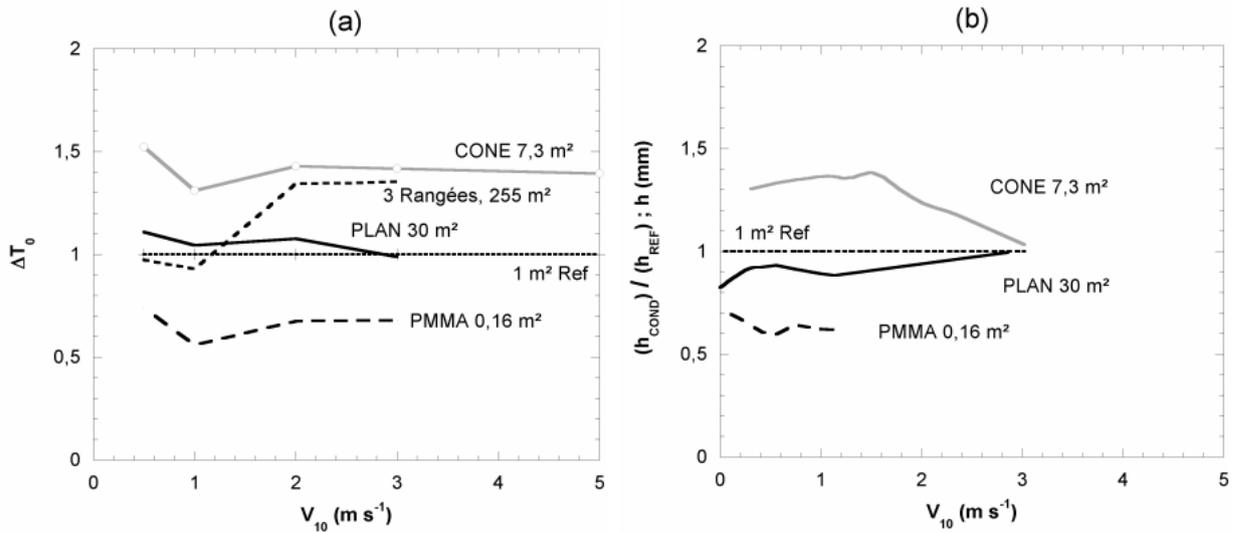


Fig. II.19. (a), “Gain en température” ΔT_0 obtenu par simulation numérique pour 5 condenseurs différents développant des surfaces de 0,16 à 255 m^2 et pour les conditions aux limites $T_a = 15^\circ\text{C}$ et $RH = 80\%$. Le condenseur plan de 1 m^2 incliné à 30° est la référence. (b) “Gain en eau” ou rendement de rosée relatif $h_{\text{cond}}/h_{\text{ref}}$, obtenu à Ajaccio sur 4 types de condenseurs et reportés en fonction de la vitesse moyenne (de 21h00 à 7h00) du vent extrapolé à 10m. V non disponible pour le condenseur de 255 m^2 ; les données sont lissées par une pondération à 70%.

Une bonne corrélation est observée entre le gain en température ΔT_0 simulé et le gain en eau $h_{\text{cond}}/h_{\text{ref}}$ expérimental pour 4 des condenseurs (plans inclinés et cône). Cela laisse à penser qu’il est possible à partir de cet outil numérique d’obtenir une comparaison quantitative des efficacités de condenseurs de différentes formes.

Le refroidissement radiatif du condenseur met en jeu des phénomènes convectifs complexes. Le phénomène de condensation implique des paramètres météorologiques qui sont d’une grande variabilité. C’est pourquoi les modèles analytiques pour l’estimation des rendements de condensation sont incomplets. Ainsi, (Figure II.19b), le condenseur plan PMMA de 0,16 m^2 sur balance cesse de condenser pour une vitesse V voisine de $1,1 \text{ m s}^{-1}$, tandis que les condenseurs plans inclinés cessent de condenser pour des valeurs V de l’ordre de 3 m s^{-1} (Beysens *et al.*, 2003). La simulation du condenseur horizontal (Figure II.19a) correspond à une efficacité moindre en terme de rendement par rapport aux autres systèmes, ce qui est cohérent avec les observations précédentes. Le Tableau II.2 donne les rendements de chaque condenseur comparé à ceux du condenseur de référence 1 m^2 (valeurs cumulées durant l’ensemble de la période de mesure). Il faut souligner que le condenseur conique condense avec un rendement cumulé de 38 % supérieur par rapport au condenseur de référence 1 m^2 incliné.

	Plan 1 m ² incliné à 30°	Plan horizontal 0,16 m ² (PMMA)	Plan 30 m ² incliné à 30°	Cône 7,32 m ² , demi ouverture de 60°	3 tranchées trapézoïdales, 255 m ²
<ΔT ₀ >, intégration de 0 à 3 m/s	1,00	0,65	1,05	1,40	1,15
<Cumul rosée / cumul rosée 1 m ² Ref.>	1,00	0,68	0,91	1,38	0,81

Tab. II.2. Rendements de chaque géométrie de condenseur par rapport au condenseur de référence 1 m² durant la même période

Certaines mesures ont également été réalisées à Panandhro (région du Kutch, état du Gujarat, NO Inde) du 22-03-2006 au 20-04-2006 (22 événements de rosée) simultanément sur un condenseur de référence plan de 1 m² incliné à 30° et sur le condenseur type « tranchée » (Figure II.17E). La comparaison simulation – expérience est délicate du fait que les données de vent V sont indisponibles sur cette période. La Figure II.20 représente le « gain en eau » identique à celui de la Figure II.19b, mais cette fois avec le rendement de rosée du condenseur de référence 1 m² en abscisse. La vitesse de vent moyenne pendant les événements de rosée et mesurée auparavant durant la période du 01-09-2005 au 01-02-2006 à proximité (3 km du site) était d'environ 1,5 m s⁻¹ à 10 m du sol. Cela correspond environ à la valeur de 0,2 mm/nuit sur la Figure II.20. Sur les deux graphiques (II.19a, 1,5 m/s ; II.20, 0,2 mm/nuit) le rendement du condenseur « canal » est voisin de celui du condenseur de référence 1 m². Les plus petites valeurs de h correspondent aux vitesses de vent V supérieures ; de même ici, l'expérience (Figure II.20) et la simulation (Figure II.19a) montrent que le condenseur approche alors l'efficacité du condenseur conique. Cependant, une nette différenciation des résultats expérimentaux par rapport aux simulations s'observe pour $h > 0,2$ mm ou si $V > 1,5$ m s⁻¹. Etant donné que seulement trois événements de rosée sont à l'origine de cette observation, aucune explication de cette divergence ne peut être avancée avec certitude. Une hypothèse plausible pour les événements de condensation maximum est une contribution du brouillard sur les condenseurs montés sur châssis aérien exposés au vent). Les condenseurs construits à même le sol, bien que de taille supérieure, pourraient être moins sensibles à la contribution du brouillard, ce qui pourrait avoir une incidence importante sur le gain en eau. Ce résultat est corroboré par les nombreuses observations effectuées au cours des mois 02, 03 et 04-2006 passés à Panandhro (le protocole de mesure en Inde a été ajusté ensuite afin d'apporter des éléments de réponse quant à cette hypothèse).

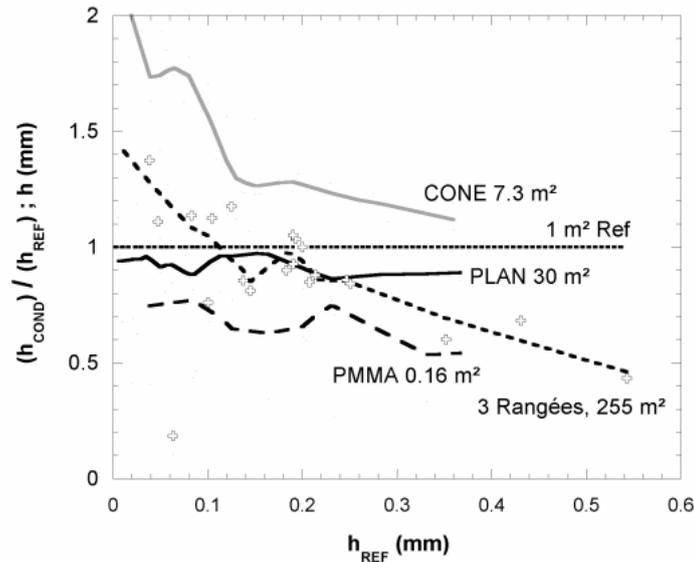


Fig. II.20. Mesures des rendements de rosée (mm/huit) pour les 5 condenseurs en fonction des rendements du condenseur de référence de 1 m^2 . Les données sont lissées par une pondération à 40%. Les croix sont les rendements exacts (non lissés) mesurés sur une tranchée de l'usine de rosée.

II.4 Conclusion

La simulation des condenseurs radiatifs mise au point au cours de ces travaux permet de comparer quantitativement l'efficacité thermique de plusieurs systèmes de géométries différentes. Cet outil donne les valeurs de $T_C = f(V)$ et $T_{REF} = f(V)$ qui permettent d'obtenir par l'Eq. II.(27) le gain en température $\Delta T_{0,V} = f(V)$. Cette grandeur a été confrontée à des mesures expérimentales de rendements de rosée pour des condenseurs très variés en terme de forme, d'échelle et d'implantation. Une bonne correspondance a été relevée entre le gain en température et le « gain en eau », validant une simulation des rendements de rosée. La valeur de $\Delta T_{0,V}$ pourra aussi être utilisée sous l'appellation « facteur de forme » comme coefficient multiplicateur des rendements en eau du condenseur de référence pour approcher le rendement attendu d'un système quelconque. Deux exemples d'utilisation du facteur de forme sont donnés :

i. Il est possible de représenter graphiquement le facteur de forme pour une géométrie inédite : une succession de 6 plans (assimilable à une « onde ») tels que représentés à la Figure II.14f. La Figure II.21 présente le facteur de forme obtenu pour une température relevée sur les 4 plans centraux parmi les 6 que compte la géométrie ; le vent souffle perpendiculairement à l'onde.

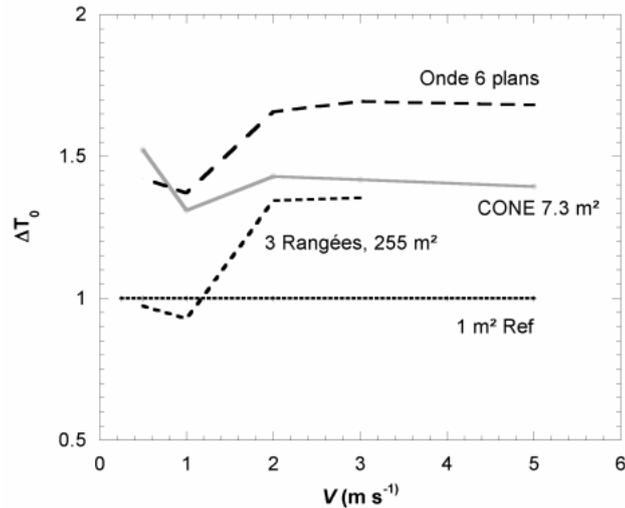


Fig. II.21. “Gain en température” ou Facteur de forme $\Delta T_{0,V}$ obtenu par simulation numérique pour une onde à 6 plans radiatifs consécutifs comparée au cône, aux trois rangées de condenseur « tranchée ». Le condenseur plan de 1 m² incliné à 30° est choisi comme référence.

ii. Par une méthode analogue, il est possible de calculer le facteur de forme d’un même système en prenant comme référence une configuration précise. L’exemple type est le test de plusieurs orientations d’un même condenseur par rapport au vent dominant, la mise en place d’un coupe-vent... etc. Une telle simulation détaillée a été réalisée en préalable de l’installation de la première usine à rosée dans la région du Kutch (état du Gujarat, Inde). Les résultats seront présentés en détail au chapitre IV.2.

Le développement de cet outil de simulation a permis d’obtenir une comparaison fiable de l’efficacité de condenseurs très variés en forme et en surface développée. Le choix d’effectuer les simulations en « air sec » monophasique s’est montré payant sur deux plans principaux : la légèreté et la portabilité. Cet outil a en effet permis de simuler de très grandes structures sur le terrain avec la même maille que pour l’étude de petits systèmes, et sur un simple PC portable.

Une méthode originale et légère de calcul en CFD des échanges radiatifs d’une forme complexe avec une source de rayonnement complexe (la voûte atmosphérique) a été développée au cours de ce travail. Elle sera très utile pour les développements à venir.

Le gain en température est une grandeur représentative de l’efficacité des condenseurs. Cependant, l’étude en air sec ne prend pas en compte la chaleur latente de changement d’état et aboutit à des gradients de température simulés bien supérieurs à ce qui peut être observé en conditions réelles de condensation. Il est attendu que cela accélère les écoulements de convection libre. C’est pourquoi ce programme sert dès à présent de base pour le développement d’un outil plus complet de simulation des condenseurs de rosée avec prise en compte des deux phases vapeur / liquide et modélisation des phénomènes de transfert.

TROISIEME PARTIE

III TROISIEME PARTIE :

Ressource rosée

Jusqu'à présent, les recherches présentées dans ce document concernaient l'optimisation scientifique sur de grande surface du phénomène naturel de condensation de rosée (refroidissement radiatif). Deux projets ont été menés dans le but de faire de la rosée une ressource alternative.

- Une recherche technologique avec la mise au point de matériaux innovants à bas coûts et dont les formulations font actuellement l'objet d'une demande de dépôt de brevet.
- La mise au point d'un outil théorique de simulation CFD pour l'aide à la décision et aux choix technologiques dans la réalisation de condenseurs à grande échelle.

Parallèlement à ce travail théorique, des expériences ont été installées, outre sur le site d'Ajaccio, en différents endroits pour y estimer le gisement en eau condensable (Croatie, Polynésie Française, Inde) et leur intérêt pour les populations locales. Les nombreuses études de gisement de rosée déjà réalisées ont été prolongées pour de nouveaux climats (tropical semi-aride, tropical humide). Une évaluation de chaque site en terme de ressource sera présentée.

De nouvelles procédures et systèmes de mesure ont été mis au point dans le but d'avoir une plus grande fiabilité des résultats, notamment dans le cas où les données sont collectées par du personnel non qualifié ou, cas extrême, par une procédure automatisée en absence de contrôle humain. Dans un premier temps, ces procédures et matériels seront décrits.

Enfin, il sera intéressant de détailler les avancées dans la compréhension de la dépendance des rendements de rosée vis-à-vis des paramètres environnementaux (humidité relative, vitesse du vent, direction du vent, couverture nuageuse, événements de brouillard, micrométéorologie...) qu'ont permis ces études menées dans des climats aussi marqués que tropical humide (à alternance saison sèche / saison des pluies) ou semi désertique (région du Kutch).

III.1 Description des méthodes de mesure

III.1.1 Condenseur standard, 1 m² incliné à 30° par rapport à l'horizontale

Parallèlement aux mesures effectuées sur la balance supportant un condenseur de 0,16 m² (plexiglas PMMA sur aluminium et isolant thermique, puis Téflon PTFE sur isolant thermique) et décrite au Chapitre I.1.2., le standard adopté par l'ensemble des chercheurs fédérés au sein de l'International Organization for Dew Utilisation « OPUR » pour évaluer le gisement de rosée est une mesure matinale du cumul quotidien de rosée sur un condenseur standard de 1x1 m² incliné à 30° avec l'horizontale. Les condenseurs sont recouverts d'un film polymère favorisant la condensation. La version produite et encore employée à ce jour est composée de charges minérales TiO₂ et BaSO₄ incorporées dans un film Polyéthylène basse densité (PEBD) d'épaisseur 0,35 mm (selon Nilsson, 1996; produit par OPUR, France, www.opur.u-bordeaux.fr). Le film est isolé du rayonnement du sol et de la convection thermique inférieure par 3 cm de Polystyrène expansé (condenseur fixe) ou 2 cm de Polystyrène extrudé (modèle de condenseur démontable). Beysens *et al.* (2003) ont montré que pour ce type de surface plane de condensation, la mesure sera optimale pour un angle d'inclinaison de 30° avec l'horizontale et le condenseur exposé dos au vent dominant nocturne (afin de limiter l'échauffement par l'écoulement de l'air ambiant). En raison du vieillissement du film du fait de son exposition en extérieur (abrasion par les poussières, irradiation UV), il est préférable de cumuler les volumes récupérés (i) par gravité et (ii) après raclage de la surface afin de mesurer le volume total condensé. Cette mesure standard a été appliquée en :

- Tanzanie (Dodoma) ; Nilsson, 1994.
- Suède (Göteborg) ; Nilsson, 1994.
- France (Grenoble ; Ajaccio ; Bordeaux) ; Muselli *et al.*, 2002 ; Beysens, *et al.*, 2005a
- Israël (Nizzana, désert du Néguev ; Jérusalem) ; Berkowicz *et al.*, 2004.
- Pays Bas (Wageningen) ; Jacobs *et al.*, 2004.
- Croatie (Zadar ; Komiža) ; Mileta *et al.*, 2004.
- Ethiopie (Bahir Dahr) ; Cf. pub. de l'association OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr)
- Arabie Saoudite (Dharam) ; Gandhidasan and Abualhamayel, 2005.
- Polynésie Française (Tahiti ; Tikehau) ; Cf. ce travail
- Inde, Gujarat (Kothara ; Panandhro) ; Sharan, 2006.

- Inde, Tamil Nadu (Yellagiri Hills) ; en cours, (Cf. ce travail)
- Namibie (Gobabeb) ; en cours



Fig. III.1. (a) Trois condenseurs standard sur le site d' Ajaccio (Université de Corse). De gauche à droite : peinture, Polycarbonate et Film « OPUR ». (b) détail du condenseur tôle + nouvelle peinture radiative sur le site de Yelagiri Hills (Tamil Nadu, Inde). (Photo O. Clus).

La Figure III.1a. présente l'expérimentation installée sur le site de l'Université de Corse (Ajaccio) dans le but de comparer différents matériaux sur 3 condenseurs identiques, le plus à droite étant le « standard » couvert de film OPUR. L'avantage de la mesure sur condenseur standard est sa simplicité et sa portabilité. Des condenseurs démontables peuvent être emmenés dans des endroits isolés (ou construits sur place comme en Inde, Figure III.1b), ils sont robustes, ne nécessitent aucune alimentation électrique vu que la mesure est manuelle et le relevé ne demande pas de qualification particulière et peut donc être effectuée par du personnel recruté localement.

La principale évolution apportée à ce type de mesure standard découle de la formulation des nouveaux matériaux précédemment décrits. En effet, les derniers condenseurs installés ont comme surface radiative et de condensation de la tôle plane d'épaisseur 0,6 mm peinte avec une peinture radiative blanche (Figure III.1b) dont les avantages sont les suivants :

- Durée de vie : jusqu'à présent, la composition du film n'incluait pas d'additif anti-UV ce qui diminuait sa durée de vie.
- Après environ 3 semaines d'exposition en extérieur, il a été précisé (se reporter au Chapitre I.3) que la peinture radiative devient hydrophile, ce qui donne des taux de récupération par écoulement gravitaire supérieurs à 92 %. La mesure est alors beaucoup plus fiable car elle peut être effectuée après le lever du soleil (peu d'évaporation dans le réservoir)

avec une perte minimale de volume ; c'est tout spécialement important si elle est effectuée par des personnels locaux.

- Avec une rétention d'eau négligeable sur la surface, l'écoulement est instantané et permet d'obtenir la production d'eau au cours du temps tout au long de la nuit si une acquisition du débit en temps réel, type pluviomètre automatique, est installée. Cette surface pourrait ainsi devenir une nouvelle référence de mesure.

III.1.2 Développement d'une station autonome de mesure des volumes condensés

Le projet "Dew Equipment for Water" (D.E.W.) a permis de mesurer durant une période de deux ans la quantité de rosée récupérable sur un système réel (toiture de 15,1 m²) en comparaison des précipitations atmosphériques (pluie et brouillard). L'installation s'est faite en avril 2005 sur Biševo, une petite île de 5,84 km² de la côte dalmate (Croatie, mer Adriatique ; Beysens *et al.*, 2007a). Ce projet est la première application au niveau international d'un matériau commercial existant spécialement sélectionné pour ses propriétés favorables à la condensation. La mise en oeuvre pratique du condenseur sera détaillée dans le Chapitre IV.1. Les données sont collectées par une station météorologique commerciale de marque DAVIS, modèle Vantage pro II sans fil standard et quelques capteurs et sondes additionnelles dont la configuration est décrite sur la Figure III.2.

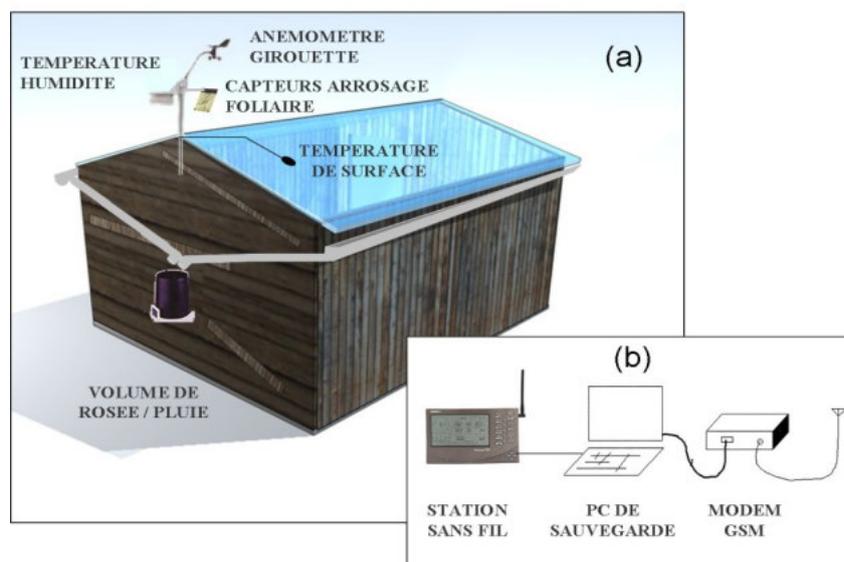


Fig. III.2. (a) Emplacement des capteurs ; (b) Chaîne de transfert des données.

i. Détails des capteurs en place

La donnée principale est le débit d'eau mesuré en sortie de gouttières. Un pluviomètre automatique a été utilisé (Figure III.3a), placé sous les gouttières et calibré in situ afin de mesurer les précipitations pluie et rosée (précision constructeur, environ 0,2 mm (5 ml) \pm 4%, à calibrer par réglage de butées). Le pluviomètre a été calibré par 4 déversements de 5 L d'eau goutte à goutte (pendant une durée avoisinant 3 heures) soit des conditions approchant un écoulement de rosée (environ 5 L par nuit). La mesure moyenne donnée est de 30,2 mm L⁻¹. Dans le cas de pluies importantes (orages, Figure III.3b), une limitation du débit en amont des godets ainsi qu'un trop-plein protègent le système de mesure. L'eau en excès n'est alors pas mesurée, c'est pourquoi les mesures de pluie manuelles effectuées par l'opérateur local (contractuel du Meteorological and Hydrological Institute of Croatia, Zagreb) doivent être comparées aux données de la station. Les autres données sont mesurées par pas de temps de 15 minutes et transmises sans fil à la console par le boîtier (5) (Figures III.3cd) :

- (1) Vitesse du vent (résolution 0,1 m s⁻¹, précision 5%) et sa direction (résolution 1°, précision 5%, valeurs moyennes sur 10 min enregistrées en 16 classes correspondant chacune à 22,5 °) sont mesurées 1 m au dessus de la faîtière du toit (3,80 m au dessus du sol).
- (2) Température ambiante (résolution de 0,1 °C, précision 0,5 °C) et humidité relative (résolution 1%, précision 5%) sont mesurées à l'ombre dans un abri équipé d'une ventilation active et placé 50 cm au dessus de la faîtière.
- (3) Deux capteurs d'arrosage foliaire (*AF*) additionnels sont placés au niveau de la faîtière du toit : *AF*1 horizontal, *AF*2 incliné à 30°. Le circuit imprimé des capteurs a été placé sur une isolation afin d'en augmenter le refroidissement radiatif et afin que sa température de surface approche celle du toit. Les valeurs sont analysées en tant que binaire *AF* = 15 ou *AF* = 0 si <15, respectivement, présence et absence.
- (4) Deux sondes à résistance thermique (résolution 0,1 °C, précision 0,5 °C) sont placées sous la surface de chaque pente du toit en deux emplacements symétriques (à 70 cm de distance de la faîtière, T1 pente nord et T2 pente sud).

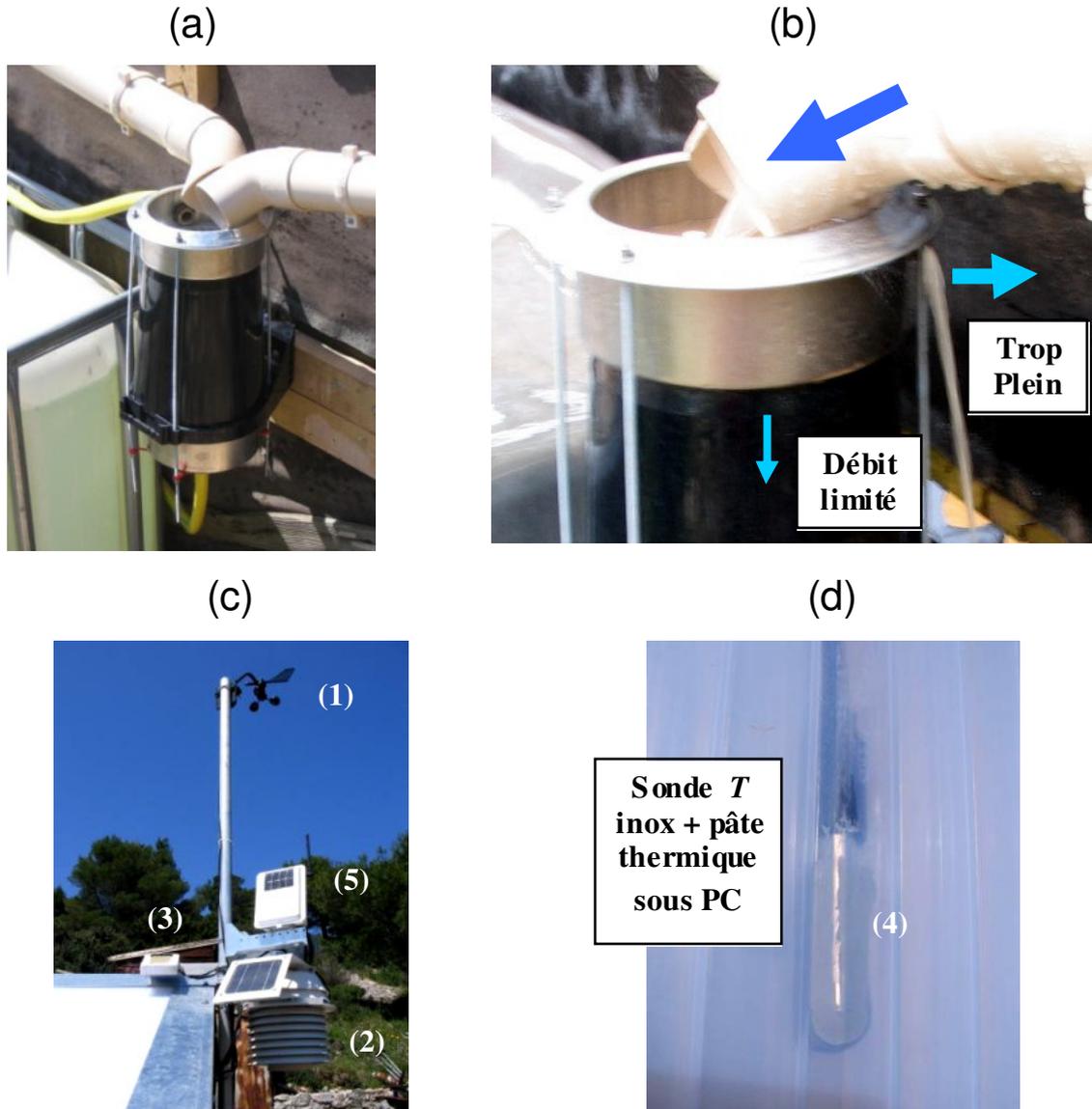


Fig. III.3. (a) Vue d'ensemble du système de mesure rosée/brouillard/pluie. (b) Fonctionnement en régime de débordement par le trop-plein (orage). (c) Vue globale de la série de capteurs (détail paragraphe précédent) ; (d) La sonde de température du toit insérée dans le Polycarbonate alvéolaire et pontée à la surface à l'aide de pâte à haute conductivité thermique pour usage informatique

ii. Aperçu graphique de l'enregistrement des données

La Figure III.4 représente les données obtenues automatiquement par le programme Weatherlink associé à la station DAVIS. Les Figures III.4ab montrent la même nuit du 22-23 août 2006. La période de condensation dt (lorsque $T_c \leq T_d$) est indiquée (flèche noire).

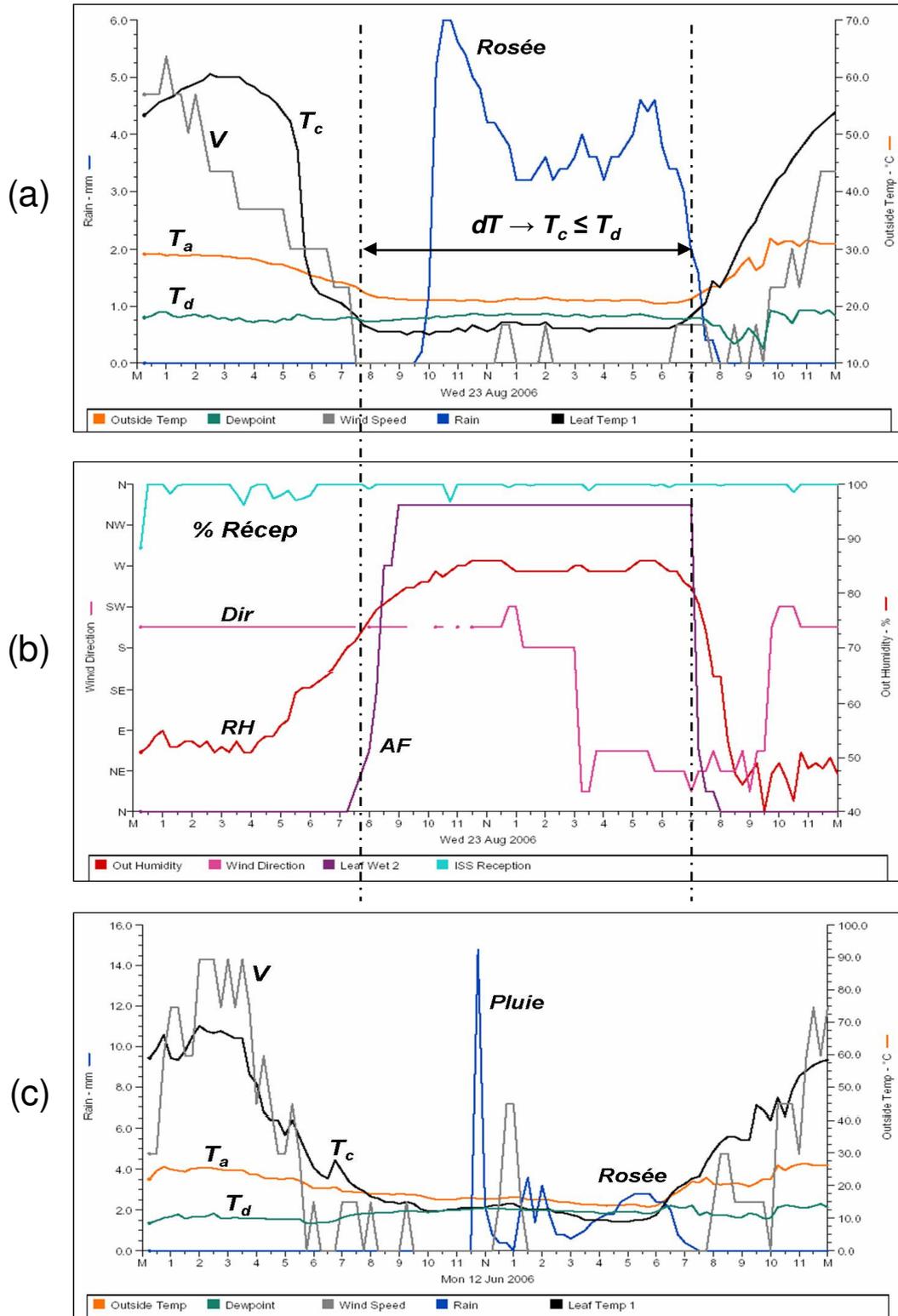


Fig.III.4. (a) Nuit du 23/08/06 : grandeurs V ($m s^{-1}$), T_a ($^{\circ}C$), T_d ($^{\circ}C$), T_c ($^{\circ}C$) et précipitations dh/dt (mm) instantanées telles que données par Weatherlink lors d'un cumul de rosée de 0,32 mm; (b) nuit du 23/08/06 : grandeurs RH (%), Dir (Direction du vent en 12 classes de $22,5^{\circ}$), Arrosage Foliaire (valeurs retenues 15 ou 0) et pourcentage de réception qui donne la qualité de la transmission. (c) nuit du 12/06/06 : profil particulier présentant à la fois un événement de pluie et de rosée, reconnaissables par les fortes différences des valeurs de dh/dt .

Le profil de précipitations observé en figure III.4a est typique d'une nuit de rosée avec un premier pic vers 21h30 correspondant à un effet « avalanche » transitoire sur la mesure dû à l'écoulement brutal des volumes cumulés de 19h30 à 21h30 et retenus par capillarité sur toutes les surfaces et gouttières sèches. Dès lors que le chemin d'écoulement est mouillé par un film, l'écoulement correspond à la vitesse instantanée de condensation sur la surface (mm/15 min). Sur le graphique, la vitesse de condensation est quasiment constante de 1h00 à 7h00 avec toutefois une légère augmentation entre 5h00 et 6h00.

La figure III.4c montre un cas limite pour lequel le cumul journalier tabulé pourrait être considéré par erreur pour de la rosée (0,14 mm) mais que l'observation manuelle permet de classer en tant que pluie. Le contrôle manuel de chaque journée de données est effectué afin d'isoler les événements de pluie parmi les cumuls journaliers, typiquement lorsque dh/dt est supérieur à 100 mm/h (valeur issue des observations). Le cumul journalier est l'intégration du débit mesuré (mm/15 min). L'observation des graphiques permet par ailleurs le contrôle des capteurs en temps réel sans présence physique sur site.

iii. Une séquence de sauvegarde multi échelle des données



Fig.III.5. (a) Station météorologique et modem GSM ; (b) Le système complet de collecte et de rapatriement des données induant le PC avec sauvegarde, la liaison par modem et la station avec lecture directe et sauvegarde de sûreté sur grilles papier.

Le moniteur de la station (figure III.5a) reçoit les données et les stocke sur une mémoire propre (capacité de 28 jours avec un pas de temps de 15 min). Le moniteur est protégé dans un boîtier électrique PVC placé dans un lieu clos à 6 m du condenseur. La station est alimentée en courant 220 V AC et possède des batteries de sécurité (environ 6 mois

d'autonomie). Un ordinateur PC (sécurisé par onduleur) est connecté à la station par port série. Il est programmé pour sauvegarder automatiquement les données à 7h00 et 20h00 simultanément sur trois lecteurs :

- partition C: et partition D: du disque dur
- Disquette A:, chaque mois, une nouvelle disquette sur laquelle une station virtuelle « stationA » a préalablement été configurée grâce au programme Weatherlink est insérée en remplacement de la précédente dans le lecteur A:

Trois procédures complémentaires de rapatriement des données ont été utilisées pour faire face au risque de perte d'information dû à l'éloignement et à l'isolement de l'île :

- Le PC est connecté à un modem GSM (modèle Motorola TC35T, Figure III.5a). Le choix du réseau GSM est conditionné par l'absence de téléphone filaire à partir de l'île de Vis voisine. L'accès aux données ainsi que le contrôle de l'expérience sont ainsi possible en temps réel depuis le laboratoire de l'Université de Corse à Ajaccio par une simple connexion réseau « network dialing » de PC à PC.
- En cas de défaillance de la connexion GSM, les données numériques sont obtenues chaque mois par l'envoi des disquettes de sauvegarde par la poste.
- En cas d'échec des procédures précédentes ou simplement d'une panne de PC, des grilles papier (Figure III.5b) sont remplies manuellement chaque matin avec les données suivantes lues sur l'écran de la station : date ; heure ; humidité relative ; vitesse du vent ; direction du vent ; température ambiante et cumul des précipitations. Le cumul de précipitation étant programmé pour être initialisé à 0h00, l'heure de la station a été réglée avec une avance de 12h00. Ainsi le cumul est initialisé à midi (lecture station 0h00), après consignation sur la grille papier.

iv. Intervention de l'opérateur local

Au-delà de l'aspect strictement scientifique, il est nécessaire de prendre en considération l'environnement humain dans lequel le système est installé. Les pannes de courant sont fréquentes et l'onduleur ne permet pas de secours plus long que quelques minutes. C'est pourquoi le programme de sauvegarde a été configuré pour s'ouvrir automatiquement lorsque l'ordinateur est redémarré par une simple pression sur le bouton de mise en tension. Trois couleurs, rouge, vert, noir ont été appliquées sur le bouton de mise en Tension du PC, de mise en tension de l'écran et sur le « reset » PC. Des procédures simplifiées de réinitialisation et de

redémarrage du PC ont ainsi pu être décidées et notées malgré l'ignorance totale en informatique de l'opérateur. En dépit de rares pertes de données, cette procédure « de la dernière chance » a permis d'assurer la continuité de l'acquisition des données pendant près de deux ans (04-2005 à 02-2007).



Fig.III.6. L'opérateur local, Zivko Jonzic, son épouse Nives et l'auteur de ces travaux devant le condenseur de Biševo.

III.1.3 Installation de capteurs d'arrosage foliaire

Sur l'expérience de Biševo, deux capteurs ont été ajoutés à titre expérimental au kit standard de la station DAVIS et aux deux sondes de températures (Figure III.7). Le capteur est constitué d'un circuit imprimé présentant une longueur linéaire importante mettant en parallèle les deux pôles de cuivre positif et négatif. La présence de gouttelettes d'eau (pluie, rosée) sur la surface diminue la résistance entre les deux pôles.

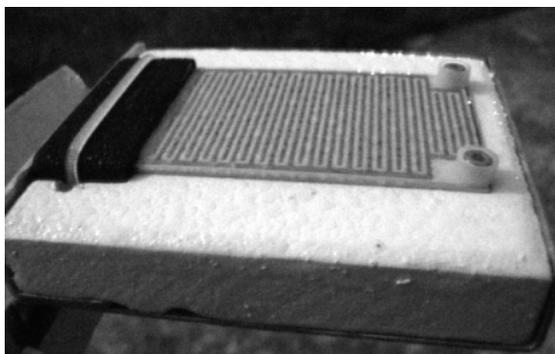


Fig.III.7. Détail d'un capteur AF tel qu'installé sur le site de Biševo et placé sur un isolant (Polystyrène extrudé peint en blanc) pour en augmenter le refroidissement radiatif

Ce type de capteur a été développé pour un usage agricole (serres, plein air) afin d'estimer les périodes durant lesquelles le feuillage des plantations est humide (pluie, arrosage, condensation). Son usage en étude de la rosée n'est pas encore largement répandu essentiellement du fait que la sensibilité importante du capteur ne permet pas une réponse graduelle à l'intensité de rosée. Par exemple, Bernardi *et al.* (2006) utilisent le capteur d'arrosage foliaire comme signal binaire : présence (rosée, pluie) ou absence (surface sèche) d'humidité sur le capteur. Une étude impliquant les inventeurs du capteur (Sentelhas *et al.*, 2004) préconise la pulvérisation d'une fine couche de peinture par aérosol en surface du capteur afin d'en diminuer la sensibilité et d'obtenir une mesure proportionnelle à l'intensité de la rosée. La méthode n'étant pas standardisée et la tenue dans le temps n'étant pas garantie, il a été choisi de ne pas modifier la surface des capteurs et de repérer la durée de condensation du toit en utilisant les capteurs *AF* en mode binaire.

De tels capteurs sont installés sur d'autres sites (par exemple par le Gobabeb Training and Research Centre dans le désert central de Namibie). Les résultats obtenus en Croatie seront discutés au Chapitre III.2.2 avant de conclure sur l'intérêt de ces capteurs pour l'équipement d'un site en fonction des mesures (physiques et météorologiques) disponibles sur place (Chapitre III.4).

III.2 Gisements de rosée en Polynésie Française, Croatie et Inde

Au cours de ce travail de thèse, trois missions sur le terrain ont permis d'étudier le potentiel de nouveaux sites. Une mission de six mois (saison sèche) en Polynésie Française a permis d'étudier deux îles (Tahiti et Tikehau) pour y évaluer la ressource rosée disponible sur condenseurs radiatifs dans ce climat tropical humide. Ensuite, si l'expérience croate (île de Biševo) vaut pour son intérêt en tant que première toiture optimisée pour la condensation de rosée, elle a aussi permis de confirmer le gisement de rosée important dans cette île de la côte Dalmate. Enfin, un séjour en Inde de trois mois pour collaborer avec l'Indian Institute of Management Ahmedabad (IIMA) dans l'installation de la première usine à rosée a dans un premier temps permis d'étudier le gisement de rosée sur le site de Panandhro (district du Kutch, état du Gujarat).

III.2.1 Polynésie Française

Le contrat de collaboration liant l'U. de Polynésie Française avec l'U. de Corse et le CEA sur la période avril 2004 - novembre 2005 avait pour but l'évaluation de la ressource rosée en climat tropical et spécifiquement dans l'archipel des Tuamotu. Sur ces atolls coralliens affleurant à la surface de l'Océan Pacifique, la ressource en eau douce est très limitée. Avec de nouveaux standards de confort pour la population et la demande touristique qui atteint son pic durant la saison sèche, la pression anthropique s'accroît sur la mince lentille d'eau douce disponible en certains points des « motus » (îlots coralliens). La salinité augmente avec les débits excessifs pompés qui abaissent le niveau piézométrique des nappes et entraînent une intrusion d'eau en provenance du lagon ou du récif. Il faut ajouter le fait que de plus en plus de puits sont creusés sans respecter les règles traditionnelles instaurant des distances minimales entre eux, entre le puit et l'océan ou le lagon ou bien encore sans respecter un périmètre de protection suffisant autour des points de relargage des effluents domestiques (Dupon, 1987). Le résultat est une eau impropre à la consommation, polluée ou saline. L'eau de pluie collectée en toiture et stockée en citernes est devenue l'unique ressource pour les habitants, avec l'eau de source embouteillée, financièrement inaccessible pour la majorité d'entre eux. Le cumul annuel moyen des précipitations sur l'atoll de Rangiroa (archipel des Tuamotu) est de 1521 mm/an avec environ 183 jours de pluie sur l'année et les précipitations durant la saison sèche sont d'environ 341 mm (22,4% de la valeur totale, Laurent *et al.*, 2004). De nos jours, les citernes roto moulées et les toits en tôles sont généralisés sur l'ensemble de l'archipel, le volume stocké correspondant en général à une durée de 4 mois en rationalisant la consommation durant la saison sèche. Pour des précipitations annuelles proches de la moyenne, l'approvisionnement est suffisant pour la consommation humaine, cependant on observe périodiquement des années de sécheresse durant lesquelles la situation peut rapidement être critique. Les autorités doivent alors approvisionner une population dispersée sur une surface équivalente à celle de l'Europe.

Les habitants, les responsables politiques et les chercheurs à l'Université de Polynésie Française sont très intéressés par la recherche de ressources complémentaires aux eaux pluviales pour ces territoires. Cet intérêt est à l'origine de cette campagne d'évaluation de la ressource rosée. Deux sites représentatifs ont été choisis : un atoll corallien de très basse altitude (point culminant 2 m) dans l'archipel des Tuamotu (village de Tuherahera, île de Tikehau, Polynésie Française) et une île haute et montagneuse (Punaauia, île de Tahiti,

Polynésie Française), les deux sites étant distants de 320 km. Les données ont été collectées sur chaque site sur un condenseur plan incliné à 30° de 1 m² et complétées sur le site de Punaauia par des mesures en continu sur une balance électronique (précédemment décrite au chapitre I. 1.) Les données ont été corrélées avec la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, sa direction et la couverture nuageuse. Un radiomètre IR a enfin été installé sur le site de l'Université de Polynésie Française (UPF, Punaauia).

i. Sites de mesure

Tikehau

L'atoll de Tikehau (Figure III.8a) a une superficie de 448 km² avec son lagon. Deux sites ont été expérimentés sur le Motu Tuherahera. Le premier site (annoté # 1) est l'aérodrome (latitude 15°07' S, longitude 148°14' O, Figure III.9a). Il est exposé au vent Alizé dominant. Le second site (annoté # 2) est situé 300 m à l'Ouest du site # 1 et il est abrité des vents Alizés par une douzaine de rangées de cocotiers Figure III.22. Les deux sites sont à environ 0,5 m au dessus du niveau de la mer.

Le climat est tropical humide avec alternance de deux saisons : la saison sèche courant de mai à octobre et la saison humide de novembre à avril (Laurent *et al.*, 2004). Le régime de vent est caractérisé par l'activité permanente des vents Alizés, avec une direction dominante ENE de jour comme de nuit. La vitesse moyenne de vent à 10 m de hauteur a été mesurée de 1966 à 2002 sur l'atoll de Takaroa (300 km à l'Est de Tikehau, atoll des Tuamotu) et pour plus de 80 % des nuits se situe entre 5 et 8 m s⁻¹, (Laurent *et al.*, 2004). Le vent souffle avec plus d'intensité durant la saison sèche (moyenne 6,7 m s⁻¹ en août).

Tahiti

La superficie de l'île est de 1042 km², le site de mesure (Fig. III.8b) est localisé à l'Université de Polynésie Française (quartier d'Outumaoro) le long de la côte ouest de Tahiti, à la latitude de 17°34' S et longitude de 149°36' O. L'altitude est de 97 m asl et la pente de la colline est orientée vers l'Ouest. Le climat est également tropical humide avec deux saisons sèche et humide contrastées.

La côte Ouest de Tahiti est protégée du flux ENE des Alizés, cependant il est fréquent au cours de la saison sèche que le vent tourne au SE (le « Mara'amu ») et devienne suffisamment puissant pour empêcher la condensation de rosée sur les surfaces exposées.

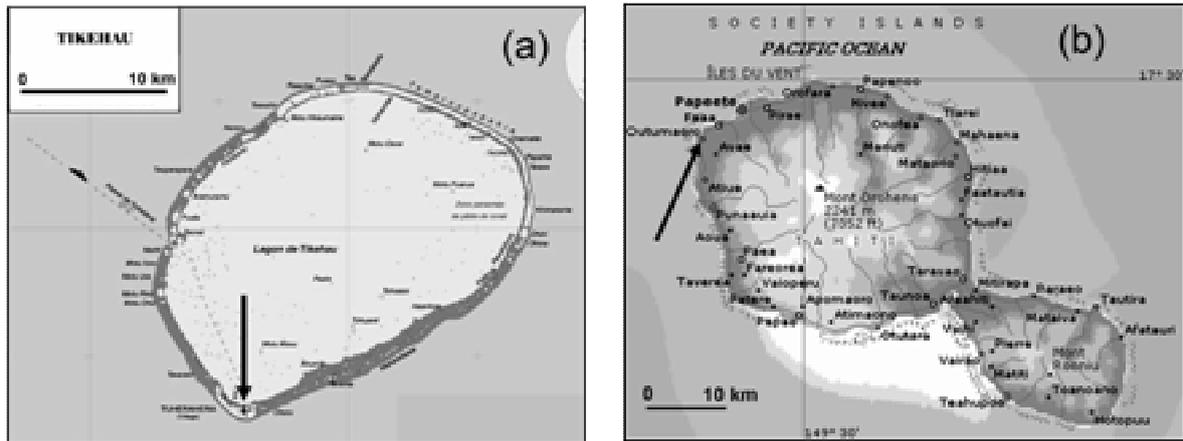


Fig.III.8. (a) Atoll de Tikehau dans l'archipel des Tuamotu. La flèche indique l'aéroport de Tuherahera. (b) Ile de Tahiti dans l'archipel de la Société. La flèche indique le site de l'Université (Outumaoro, commune de Punaauia).

ii. Protocoles de mesure

Les volumes de rosée sont mesurés dans les mêmes conditions à Tikehau et Tahiti. Des condenseurs standards 1 m x 1 m, inclinés à 30° et couverts de film polyéthylène type OPUR (Nilsson, 1996) comme précédemment décrits (Chapitre III.1.1.) et visibles sur la Figure III.9. A Tikehau, le condenseur est exposé vers l'Ouest et reste ainsi protégé des premiers rayons du soleil jusqu'à 8:00 heure locale. Le condenseur d'Outumaoro est exposé NE et fait face à la partie la plus ouverte du ciel pour son refroidissement radiatif compte tenu des bâtiments et du parking bitumé. La rosée était mesurée chaque matin à 7:30 heure locale (UTC-10H). Le volume total pris en compte correspond au volume de l'eau récupérée dans le flacon par écoulement gravitaire auquel on ajoute le volume des gouttelettes résiduelles raclées manuellement.



Fig.III.9. (a) Condenseur (C) sur le site # 1 de Tikehau. (b) Site de mesure à Tahiti. B : plaque de PTFE sur balance électronique. C : Condenseur.

Tikehau

Les paramètres suivants sont quotidiennement relevés à 7:30 heure locale (UTC-10H) par les deux pompiers en charge de la sécurité de l'aérodrome : Température ambiante T_a (°C), V (m s^{-1}) sur un mât de 6 m de hauteur, direction du vent (degré), nébulosité N (octas). La pluviométrie n'est pas relevée. Les données sont collectées durant la saison sèche du 21-06-2005 au 7-10-2005.

Les données météorologiques complémentaires sont disponibles au pas de temps horaire en provenance de la station automatisée de l'aérodrome sur l'atoll voisin de Rangiroa (64,3 km ENE de Tikehau, lat. $14^{\circ}57'$ S, long. $147^{\circ}39'$ O) : V (m s^{-1}) et direction Dir (degré), T_a (°C), humidité relative RH (%) donnant la température de rosée T_d (°C). En raison de l'affleurement des atolls à la surface des océans, l'absence de relief et la proximité des deux aérodromes dans l'axe des vents dominants, ces données seront considérées comme représentatives des conditions observables à Tikehau.

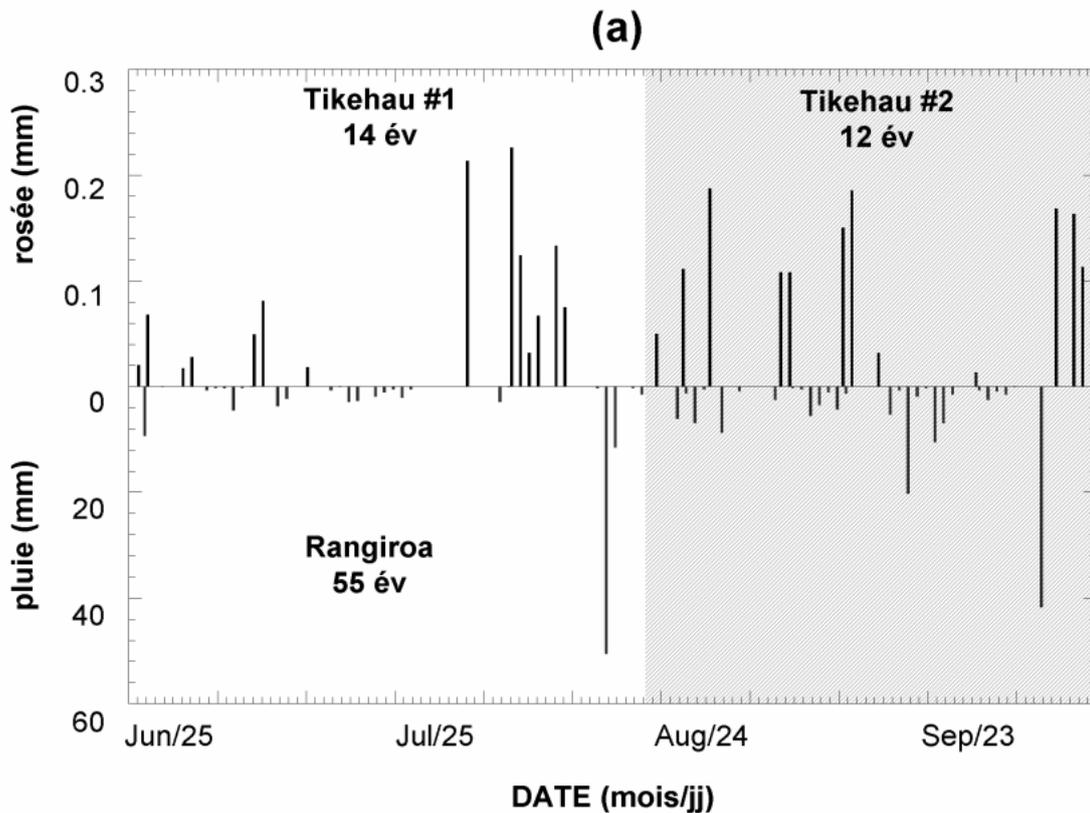
Tahiti

Sur Tahiti, les volumes de rosée sont également obtenus sur un condenseur standard 1m x 1m (Figure III.9b) du 16-05-2005 au 02-10-2005. La masse m de rosée a aussi été mesurée avec un pas de temps de 15 min sur une plaque de téflon (PTFE) de 0,16 m^2 posée sur une balance électronique, selon le système décrit au Chapitre I.1 et qui apparaît sur la Figure III.9b. (B). Les données de rosée ont été enregistrées du 08-06-2005 au 02-10-2005.

Les paramètres suivants sont enregistrés au pas de 15 min : Température de la plaque de PTFE T_c (± 0.1 °C), masse de rosée m (g), RH (%), T_a (°C) ; T_d (°C) et V ($m s^{-1}$) à 1,5 m de hauteur. Les précipitations visibles sur la Figure III.10b (mm), la direction du vent (°) et la couverture nuageuse ont été obtenus auprès de Météo France - PF sur le site de l'aéroport international de Faaa (3 km dans la direction NE).

Afin d'évaluer l'équilibre radiatif pour les grandes longueurs d'onde IR à la surface du condenseur, la radiance globale du ciel a été mesurée par deux radiomètres installés sur le toit du laboratoire à 5 m du sol avec un horizon dégagé, à une distance de 20 m du condenseur. Le dispositif de mesure des spectres solaire et IR est détaillé au Chapitre I.2.1 Ces données de rayonnement ont été relevées durant la saison sèche du 14/7/2005 au 14/10/2005. Il y a eu perte de données du 15 août au 24 septembre.

iii. Rendements de rosée



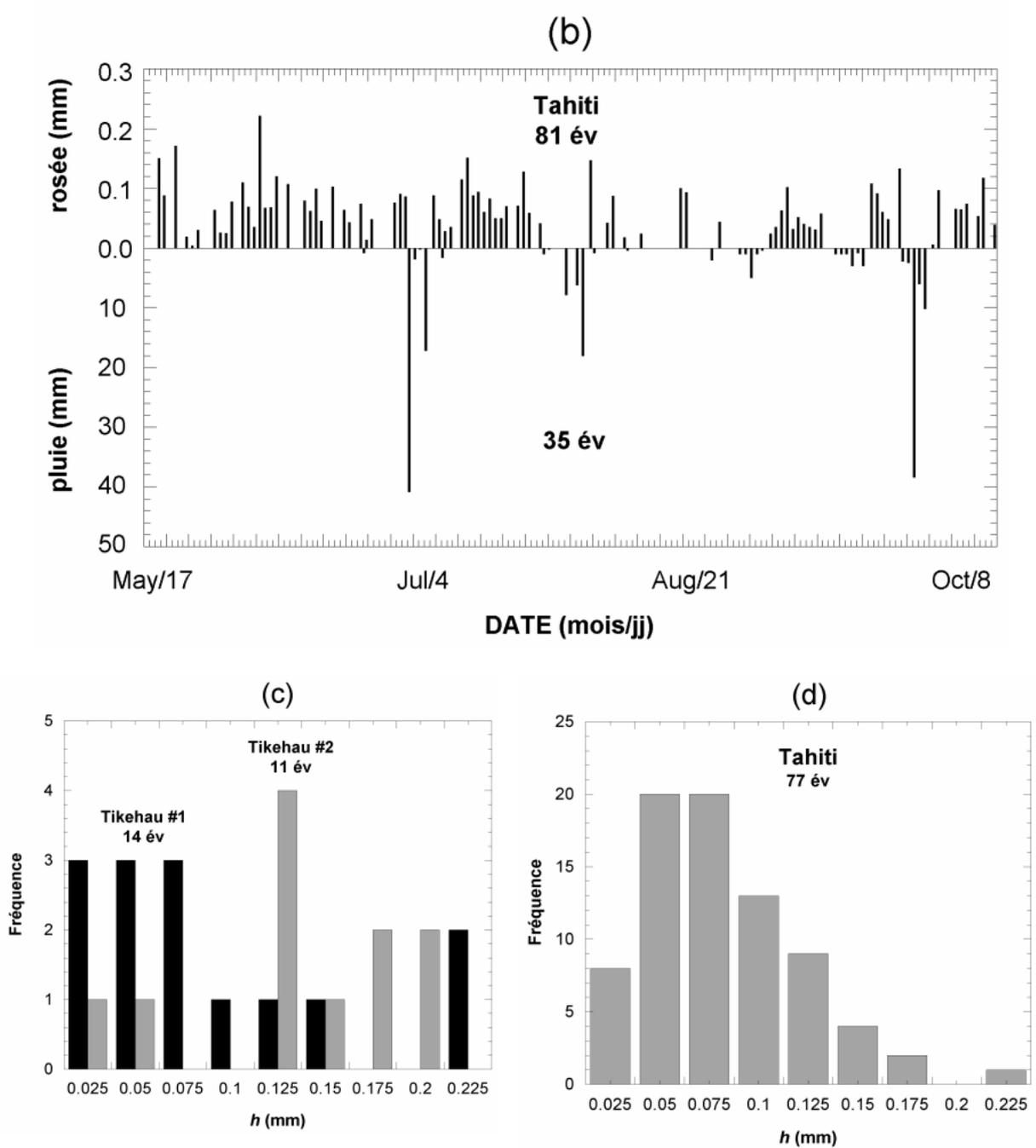


Fig.III.10. (a) Evolution des rendements de rosée (ordonnées supérieures) mesurés sur les sites # 1 et # 2 de Tikehau (Tuherahera). Les données de pluviométrie (ordonnées inférieures) sont issues des mesures de l'aérodrome de Rangiroa. (b) Evolution des rendements de rosée sur le site de Tahiti (Outumaoro). Les données de pluviométrie (ordonnées inférieures) sont issues des mesures de Faaa. (c) Distribution des rendements de rosée à Tikehau. Site # 1 : histogramme noir ; site # 2 : histogramme gris. (d) Distribution des rendements de rosée à Tahiti.

La Figure III.10 ainsi que le Tableau III.1 présentent un aperçu global de la pluviométrie et de la ressource rosée à Tikehau et Tahiti. Il est notable que la saison sèche était exceptionnellement humide durant la période étudiée, avec cependant plus de 50% d'événements de pluie inférieurs à 2 mm/nuit. Les événements de rosée supérieurs à 0,2 mm/nuit sont rares sur les sites de Tikehau tout comme à Tahiti. Ces rendements de rosée sont inférieurs aux rendements observés ailleurs à ce jour, à l'exemple du bassin méditerranéen où jusqu'à 0,42 mm/nuit ont été relevés à Ajaccio (Corse, France) et presque 0,526 mm/nuit à Biševo (voir Tableau III.4). Les mesures de Tahiti présentent cependant une fréquence importante d'événements de rosée, 53 %, comparés aux 33 % d'Ajaccio sur une période de 1 an (Beysens *et al.*, 2005a), mais avec un faible rendement moyen égal à 0,068 mm. Les rosées sont relativement stables en volume et fréquence tout au long de la période de mesure. Le volume cumulé est élevé (5,58 mm à Tahiti, contre 3,5 mm pour la saison sèche à Ajaccio et 8,43 mm pour une année complète à Ajaccio, Beysens *et al.*, 2005). Les premières mesures de rosée à Tikehau (site # 1) pour la période juin – juillet étaient faibles. En revanche, le site # 2 donna de meilleurs résultats avec une fréquence supérieure et de meilleurs rendements. Les distributions des rosées à Tikehau (Figure III.10c) et Tahiti (Figure III.10d) montrent que les événements les plus fréquents ne sont pas les plus faibles en volume.

	Tikehau sites 1 & 2 21/6/2005 – 7/10/2005 109 jours	Tahiti 16/5/2005 – 14/10/2005 151 jours
pluie (cumul, mm)	247,8	176,2
rosée (cumul, mm)	2,64	5,58
rosée / pluie (%)	1,07	3,17
Rosée Maximum (mm)	0,23	0,22
Rosée moyenne (mm/événement)	0,102	0,068
% de jours de rosée (ensemble des jours)	23,9	53,6
% de jours de rosée (jours de pluie exclus)	38,8	69,8
Ressource rosée (mm/jour)	0,024 mm/jour	0,037 mm/jour

Tab. III.1. Grandeurs représentatives des événements de rosée sur les îles de Tahiti et Tikehau.

La population rencontrée sur l'atoll de Tikehau s'est montrée intéressée par ce système pouvant apporter un appoint en eau pendant les longues périodes de sécheresse dépassant parfois l'autonomie dont les habitants disposent grâce à leurs citernes. Face à cette ressource parfois incertaine et courant potentiellement un risque de contamination bactérienne, les habitants sont intéressés par un équipement de toiture bon marché et ne nécessitant pas de maintenance qui pourrait produire quotidiennement la quantité d'eau propre nécessaire à la consommation humaine du foyer. En climat tropical, la condensation de rosée est une ressource complémentaire intéressante, pouvant parfois devenir essentielle en cas de sécheresse prolongée sur les atolls coralliens ou bien en situation de crise après la contamination des puits et citernes par eau salée ou pollution bactérienne.

III.2.2 Île de Biševo, mer adriatique, Croatie

i. Site de mesure

De nombreuses îles de Méditerranée, y compris dans le périmètre européen, souffrent d'un manque de ressource en eau chronique. C'est notamment le cas sur la petite île de Biševo, située en mer adriatique le long de la côte croate à 5 km SO de l'île de Vis. Depuis 2003, l'étude de la rosée comme ressource alternative et/ou complémentaire est menée en Croatie sous la coordination de l'association OPUR. Ces travaux impliquent l'Université de Corse (laboratoire d'Ajaccio), le Commissariat à l'Energie Atomique (Grenoble), l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles (Paris), le Centre National de la Recherche Scientifique et l'Institut de Météorologie et d'Hydrologie de Croatie (MHIC, Zagreb, Croatie).

Biševo est localisée par 42°59' N et 16°01' E, son point culminant se trouve à 65 m au dessus du niveau de la mer (Figure III.11). En raison de sa petite taille (longueur maximale d'environ 3 km pour une superficie de 5,84 km²) et de sa géologie karstique (calcaire hautement fissuré), l'île est dépourvue d'une quelconque ressource d'eau douce, courante ou souterraine. La population permanente sur cette île est d'environ 14 personnes l'hiver et 40 en été. La seule ressource disponible est d'origine pluviale, soigneusement collectée sur toutes les surfaces disponibles. En cas de pénurie ou de sécheresse, l'eau est apportée par bateau. Les précipitations sont généralement abondantes l'hiver mais très rares en période estivale (en 2003, la dernière pluie du printemps tomba en mars). La rosée est connue pour y être

abondante tout au long de l'année et pourrait être un apport intéressant, bien qu'à ce jour, les toits de tuiles poreuses ne permettent pas la récupération de l'eau condensée.



Fig.III.11. (a) Localisation de l'île de Biševo, à proximité de l'île de Vis, Croatie. (b) Vue panoramique sur la végétation sèche sur sol calcaire au sommet de Biševo (Mars, en fin de saison humide). (Photo O. Clus)

ii. Protocoles de mesure

Depuis 2003, deux condenseurs standards de 1 m x 1 m (type OPUR) sont en place sur les stations météorologiques de Zadar et Komiza et des analyses physiques (volumes de rosée) et chimiques (Zadar uniquement) se poursuivent depuis cette date (Mileta *et al.*, 2004 ; 2006). La toiture de 15,1 m² de Biševo (Figure III.5) a permis de recueillir les résultats présentés sur la Figure III.13. Cette première expérimentale sera décrite dans le détail au Chapitre IV.1. Le matériau sélectionné pour cette toiture est un Polycarbonate dont la surface est hautement hydrophile ce qui permet d'obtenir par gravité plus de 95% du volume total condensé (Beysens *et al.*, 2006b ; 2007a). Par ailleurs, des tests en extérieur sur des condenseurs standards (Photo figure III.12a) ont été menés du 25/05/05 au 05/02/06 (70 événements de rosée) pour comparer l'efficacité du Foil OPUR (abscisse figure III.12b) à celle du matériau Polycarbonate utilisé en toiture, mais non raclé (ordonnée figure III.12b).

(a)



(b)

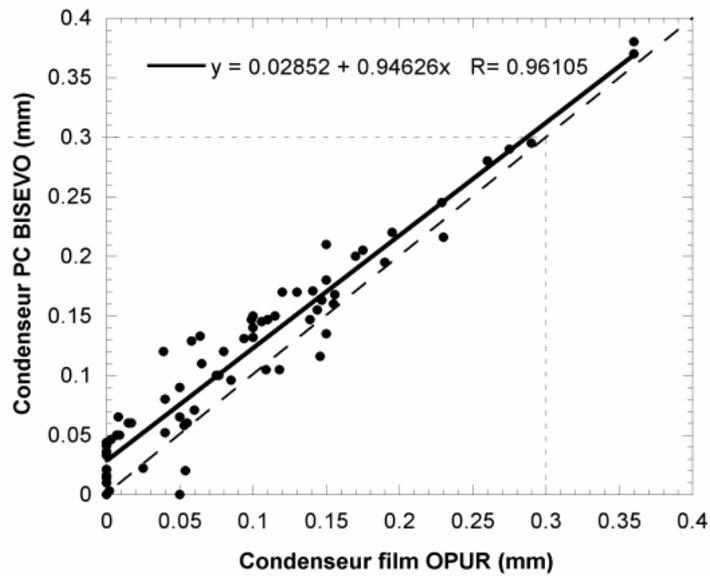


Fig.III.12. (a) Vue d'ensemble de l'expérience de comparaison des matériaux en situation réelle.
 (b) corrélation condenseur « Film OPUR » avec condenseur « PC Biševo »

La Figure III.12 montre que si la récupération sur PC hydrophile est plus efficace pour les rendements faibles (approximativement de 0,0 à 0,15 mm). En revanche, au delà de 0,15 mm (nuits présentant de bonnes conditions de rosée), les écarts s'estompent et les deux condenseurs donnent des rendements très voisins. Les cumuls sur la période donnent 6,84 mm sur PC contre 5,52 mm sur Film OPUR, soit environ 26 % de rendement en plus pour le PC type Biševo et 18 % en ne prenant en compte que les mesures avec raclage.

iii. Rendements de rosée

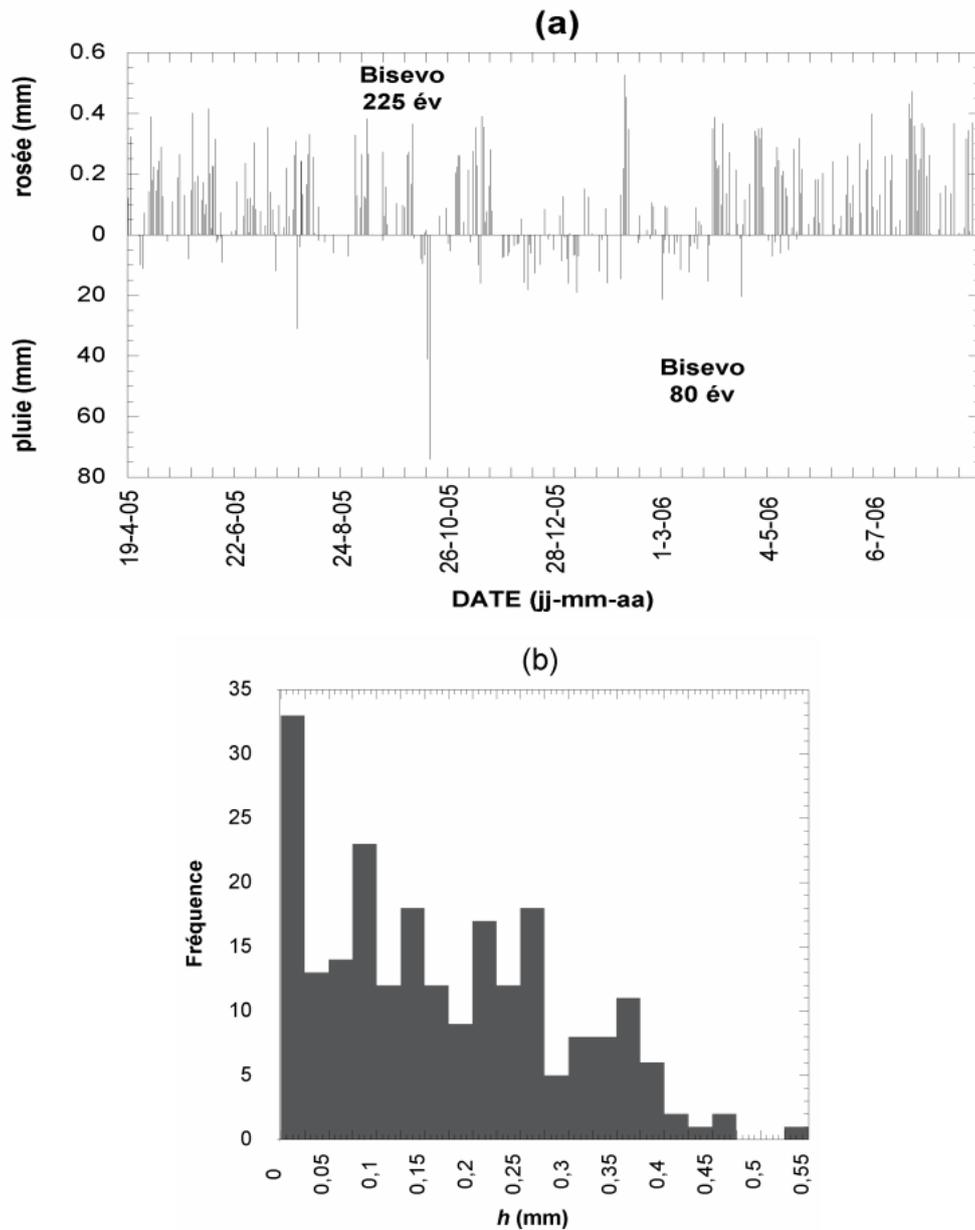


Fig.III.13. (a) Evolution des rendements de rosée (ordonnées supérieures) ; les données de pluviométrie (ordonnées inférieures) sont issues de mesures manuelles relevées sur site.

(b) Distribution des rendements de rosée à Biševo.

La procédure d'enregistrement et de transmission des données a été largement décrite au Chapitre III.1.2 de ce travail. Les données expérimentales de Biševo (Figure III.13) sont disponibles pour la période du 14/04/05 au 31/08/06 avec une interruption d'enregistrement du 07/08/05 au 25/08/05, soit 485 jours. Un aperçu de la Figure III.13a montre deux saisons assez marquées avec un hiver caractérisé par des pluies fréquentes et des rosées très dispersées si l'on excepte les 5 jours à grands rendements du 31/01 – 04/02/06. En

conséquence, il semble judicieux de s'intéresser non seulement aux données annuelles mais également à la ressource rosée durant la saison sèche uniquement. Les résultats dans les deux cas sont présentés dans le Tableau III.2 (la seconde saison sèche n'est pas complète car enregistrée jusqu'au 31-08-06).

Le second graphique (b) montre une distribution très équilibrée. En effet, si l'on excepte les rendements très faibles et très nombreux (inférieurs à 0,0025 mm) dont la fréquence est augmentée par la procédure de mesure automatique (déclenchement aux environs de 5 ml pour un condenseur de 15,1 m² soit potentiellement pour 3,33.10⁻⁴ mm m⁻²), la régularité du nombre d'événements de rosée de 0,025 à 0,300 mm est remarquable.

	Toutes dates 14/04/05 - 31/08/06 485 jours	Saison sèche (mai-sept) 01/05/05 – 30/09/05 01/05/06 – 31/08/06 258 jours
cumul pluie, mm ; (occurrences)	840,1	281,0
cumul rosée, mm (occurrences)	37,9	25,0
rosée / pluie (%)	4,51 %	8,90 %
Rosée Minimum (mm)	0,005	0,007
Rosée Maximum (mm)	0,526	0,472
Rosée moyenne (mm/événement)	0,181	0,181
% de jours de rosée (ensemble des jours)	43,1 %	53,5 %
Ressource rosée (mm/jour)	0,078 mm/jour	0,097 mm/jour

Tab. III.2. Grandeurs représentatives des événements de rosée sur l'île de Biševo (valeurs inférieures à 0,0025 mm non prises en compte, reste 225 événements).

III.2.3 Panandhro, région du Kutch, Inde

Depuis l'année 2003, des tests de récupération de rosée ont été menés dans l'état du Gujarat (Nord Ouest de l'Inde) dans la région du Kutch (ou Kuchchh). Celle-ci se situe entre le « Rann de Kutch » (Nord-Ouest de l'état du Gujarat, le mot rann vient de l'hindi et signifie « marais de sel ») et la Mer d'Arabie à l'extrême ouest du sous-continent indien. Les études

ont été menées sous l'impulsion de l'Indian Institute of Management de Ahmedabad (I.I.M.A., Sharan, 2006). La zone se trouve à la limite entre les climats tropicaux aride et de mousson. Il s'agit d'un climat de mousson mais présentant les précipitations d'un climat aride à semi-aride (de 100 à 400 mm de pluie par an). Différentes études ont été menées dans le village de Kothara (zone encerclée (1), figure III. 14) dans le but de déterminer le potentiel de rosée durant la saison sèche (octobre à mai) sur des condenseurs standards (1 m² type OPUR) et pour différents substrats de condensation (PVC, Acier, Polyéthylène commercial...) et sur des toitures en l'état (Sharan *et al.*, 2003; 2007). (On peut se reporter au Chapitre IV.2 qui présente en détail les équipements de grande dimension entrepris dans cette région). Le cumul annuel de rosée a été mesuré égal à 6,3 mm, ce qui reste modeste en comparaison de l'ordre de grandeur des précipitations sur la même période (300 mm). Mais compte tenu du régime de mousson, l'essentiel des précipitations (généralement la totalité) se concentre durant seulement quelques jours en Août et Septembre tandis que la rosée apparaît beaucoup plus régulièrement et précisément durant la saison sèche. Pour des toits de grande dimension (100 – 300 m²) qui sont fréquents à Kothara, la rosée peut fournir 60 à 180 L, ce qui représente un volume modeste mais pouvant assurer une sécurité minimum aux populations. A Panandhro, environ à 90 km au Nord-Ouest de Kothara, une première phase de mesures physiques a été menée à partir du 8 nov. 2005 afin de déterminer le potentiel de rosée du site.

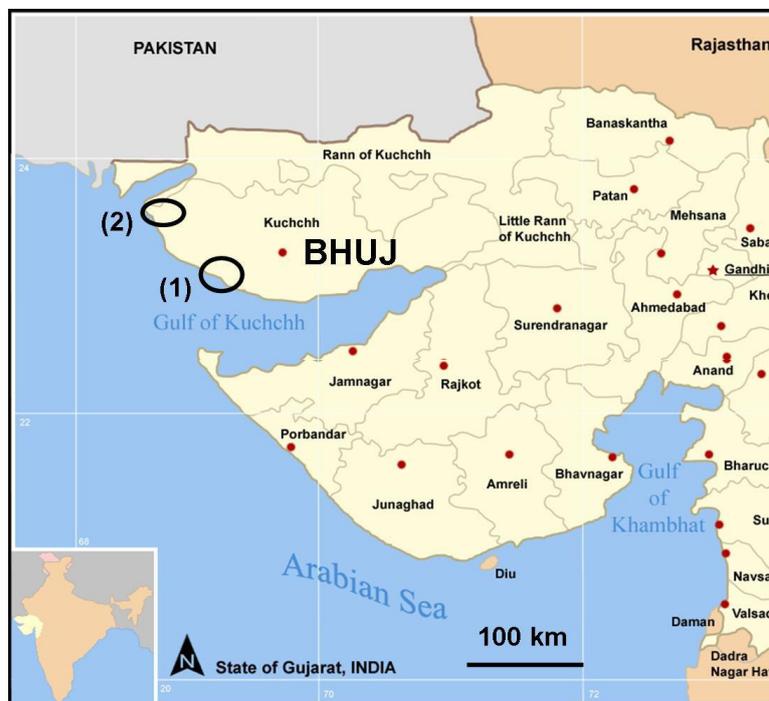


Fig. III.14. Mesures dans la région du Kutch. Cercle (1) : localisation du « IIMA Development and Outreach Station » de Kothara ; cercle (2) : localisation de Panandhro.

i. Site de mesure

Il a été décidé d'installer la future usine à rosée au village de Panandhro, à environ 20 km de la mer d'Arabie, le long d'un golfe situé à l'extrême Ouest de la « Rann of Kutch » et de la ville de Bhuj (chef lieu de district, Figure III.14), dans l'état du Gujarat (capitale : Ahmedabad). Les coordonnées géographiques sont les suivantes : 23°40' N, 68°46'E, à 42 m au dessus du niveau de la mer. Le site est mis à disposition par la Gujarat Mineral Development Corporation (GMDC) et se situe sur un site minier dans une partie qui n'est plus exploitée de la zone de 1740 ha occupée par l'exploitation à ciel ouvert de lignite. Globalement, le cumul de pluie annuel dans le Kutch est faible (environ 300 mm) et très irrégulier – coefficient de variation de 75%. Par comparaison, l'évaporation globale annuelle est d'environ 2000 mm. A Panandhro, les précipitations sont souvent inférieures, par exemple, le cumul pour une période s'étendant du 07 fév. 2004 au 12 Jan. 2005 était seulement de 189,5 mm. Comme il a été observé à Kothara (Sharan *et al.*, 2007), la rosée dans la zone côtière du Kutch se manifeste principalement sous un régime nocturne de brise marine avec bascule occasionnelle en brise de terre nocturne.



Fig. III.15. (a) Vue d'ensemble d'un paysage typique du Kutch (entre Nalia et Mata-Namad, sur la route joignant Panandhro à Kothara). (b) vue des quatre condenseurs standard de 1 m² (type OPUR) faisant face aux quatre directions cardinales sur le site de Panandhro (photo O. Clus).

ii. Protocoles de mesure

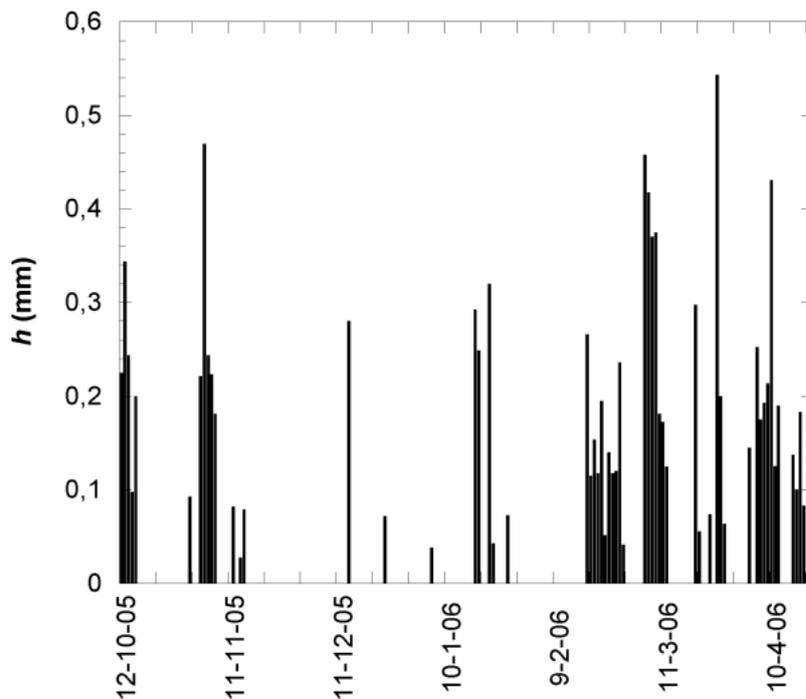
Les volumes de rosée condensée sont mesurés sur 4 condenseurs de référence identiques orientés face aux quatre directions cardinales et placés au sommet d'une colline haute d'environ 10 m. La surface de condensation est de 1 m x 1 m avec une inclinaison de 30° placée à 1 m au-dessus du sol. Les condenseurs sont recouverts d'un film radiatif de type OPUR (formulation de Nilsson, 1996) mais fabriqué en Inde et dont l'épaisseur a été réduite à 0,2 mm, ce qui diminue sensiblement l'émissivité IR mais permet d'appliquer le procédé d'extrusion soufflée sur des laies de 50 m x 5 m. Le film est isolé thermiquement sur sa face inférieure par une plaque de polystyrène expansé épaisse de 1 inch (25,4 mm). La rosée est mesurée chaque matin vers 8:00 (heure locale : UTC + 06:30). Le volume est récupéré uniquement par gravité (pas de raclage) dans un récipient distinct pour chaque condenseur. Cependant il est très intéressant de noter que le dépôt et l'incrustation de poussières minérales à la surface du film maintient la surface hydrophile et permet de négliger la fraction retenue par capillarité dans la mesure finale. Cette propriété a été observée durant une période de 3 mois passés sur place et ne paraît pas étonnante dans cette région aride à l'atmosphère très dense en aérosols provenant du sol. Il est probable que l'activité de la mine (2000 camions quotidiens, sans compter les machines excavatrices et le transport sur des kilomètres de tapis roulants) augmente les dépôts d'aérosols. Le phénomène semble en effet moindre sur le site de Kothara. L'orientation des condenseurs influence la condensation (Beysens *et al.*, 2003 ; de même se reporter au Chapitre II de ce travail), c'est pourquoi la mesure simultanée sur 4 condenseurs exposés aux quatre directions cardinales permet de disposer chaque jour du maximum réel et d'avoir ainsi une bonne estimation du potentiel effectif du site.

Les données météorologiques sont mesurées sur le site de la centrale électrique thermique (qui utilise comme combustible la lignite extraite sur place) de la GEB, située 2 km au sud-est du site (150 °). Les données sont enregistrées au pas de temps horaire et sont disponibles du 07/02/2004 au 25/02/2006. 24,7 % des jours de mesure ont été perdus sur cette période. Les paramètres enregistrés sont T_a (°C), RH (%), pluviométrie (mm). La vitesse de vent V ($m s^{-1}$) et sa direction Dir (°) sont mesurées à une hauteur de 13,5 ft (4,1 m). V est extrapolé à la hauteur $z = 10$ m en utilisant l'Eq. I.(22).

iii. Rendements de rosée.

Sur la figure III.16. le potentiel de rosée apparaît faible de la mi-novembre à la mi-janvier, avec un rendement par jour moyen de 0,006 mm. Par comparaison, d’octobre à mi-novembre, la ressource moyenne était de 0,078 mm par jour (0,186 mm par événement de rosée face Ouest) et de mi-janvier à avril, la ressource a atteint 0,114 mm par jour (0,210 mm par événement de rosée face Ouest). Pour la saison de rosée 2004 – 2005, une distribution semblable était observée à Kothara avec une chute de rendements pour les mois de décembre – janvier, c.à.d. avec un décalage d’environ 15 jours (Sharan *et al.*, 2007). Cela a été attribué aux variations saisonnières du régime de vent et des valeurs de *RH* associés. Comme nous le détaillerons par la suite (chapitre III.3), l’humidité relative est le facteur prépondérant dans les rendements de rosée, or ici elle décroît progressivement après la mousson jusqu’en décembre pour remonter jusqu’en mai et la mousson suivante. Les directions Sud et Ouest condensent environ 20% d’eau en plus par rapport aux faces Nord et Est. Ceci malgré une brise nocturne orientée sud-ouest (face aux condenseurs), une orientation qui devrait au contraire diminuer les rendements selon Beysens *et al.* (2003) et les résultats de simulations du Chapitre II. L’explication se trouve dans des événements de brouillard et sera détaillée au paragraphe suivant (Chapitre III. 3).

(a)



(b)

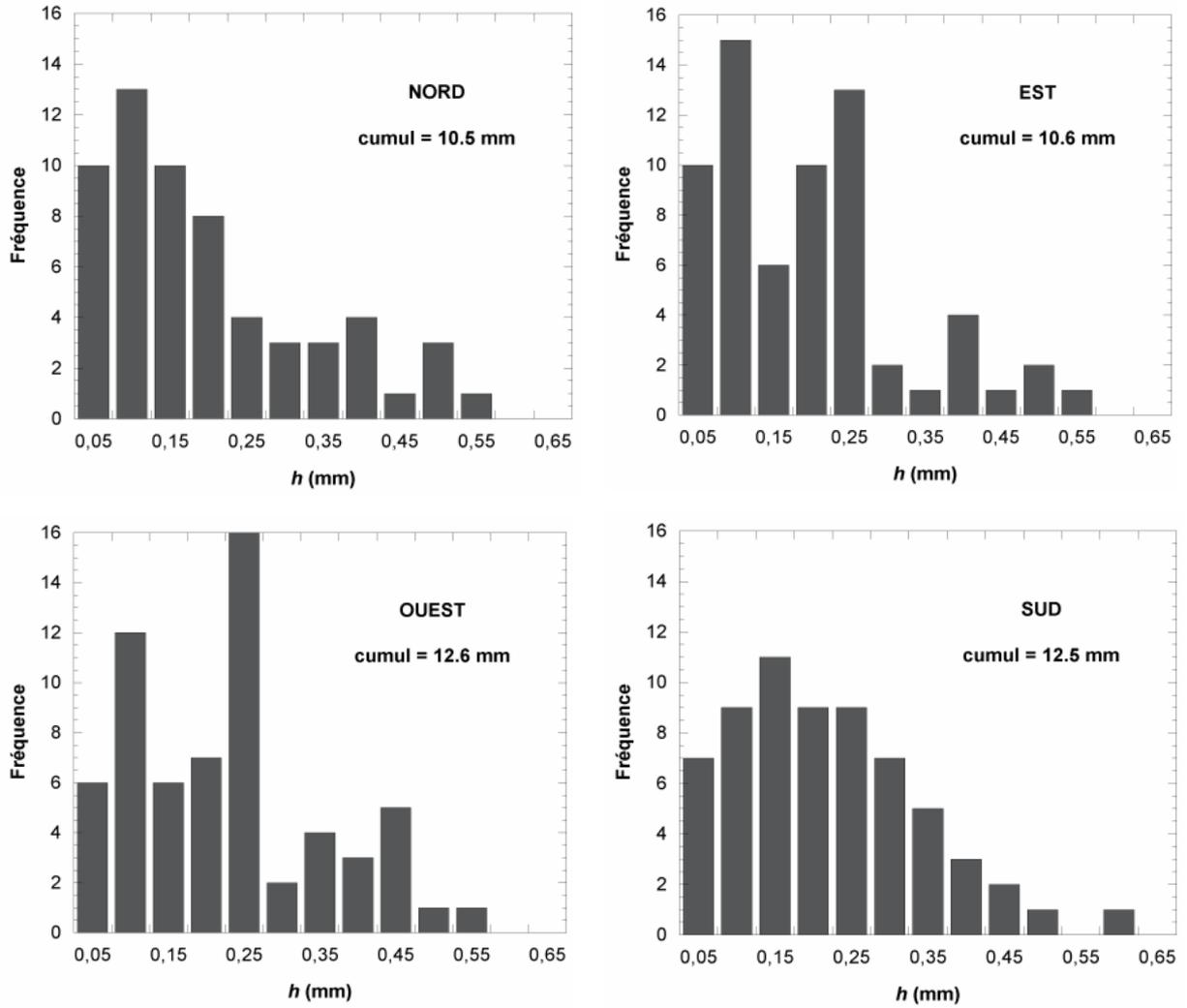


Fig. III.16. (a) Rendements de rosée du 8/10/05 au 17/04/06 (192 jours. Il n'y a pas eu d'événements de pluie dans la période. Les rendements sont la moyenne des quatre mesures (N, E, S, O).

(b) Distribution des rendements de rosée pour les quatre directions de mesure du 8/10/05 au 17/04/06.

III. Ressource rosée

Jours de rosée 8/10/05 – 17/04/06 192 jours	NORD	EST	SUD	OUEST
pluie (cumul, mm)	0	0	0	0
rosée (cumul, mm)	10,5	10,6	12,5	12,6
Rosée Min. (mm)	0,010	0,020	0,005	0,01
Rosée Max. (mm)	0,550	0,524	0,566	0,532
Rosée moyenne (mm/événement)	0,181	0,171	0,201	0,203
% de jours de rosée	30,2	32,3	32,3	32,3
Ressource rosée (mm/jour)	0,055	0,055	0,065	0,066

Tableau III.3. Grandeurs représentatives des événements de rosée sur le site de Panandhro et pour les quatre orientations de condenseurs.

Les rendements maximums sont très importants à Panandhro avec une valeur de 0,566 mm relevée sur le condenseur exposé Sud le 23/03/06. La période mesurée ne couvre malheureusement pas l'ensemble de la saison sèche et des données complémentaires sont en attente. Mais, dès à présent, le rendement cumulé est appréciable avec 12,6 – 12,5 mm en faces ouest et sud, ce qui représente 6,65 % du cumul des précipitations annuelles de l'année précédente (le cumul de précipitations à Panandhro du 07/02/04 au 12/01/05 était de 189,5 mm). Durant la période de mesure, la fréquence en événements de rosée est de 32 % des nuits et les rendements moyens maximums (sud, ouest) sont de (0,201, 0,203) mm par événement.

Cela signifie que, dans cette région, un condenseur de 125 m² pourrait fournir la consommation totale d'eau minimum pour une famille de 5 membres un jour sur trois durant toute la saison sèche (la consommation minimum est considérée de 5 L/jour/personne, soit la moitié des besoins vitaux recommandés par la Organisation Mondiale de la Santé qui prend en compte l'ensemble des besoins, incluant la consommation, l'hygiène, etc...).

III.2.4 Yelagiri Hills (Tamil Nadu, Inde)

i. Site de mesure

Le second site instrumenté en Inde (03-05-06) est situé sur un plateau montagneux appelé Yelagiri Hills à 1010 m d'altitude (latitude 12°35' N, longitude 78°38' E). L'installation s'est déroulée à l'invitation des responsables du Bics Info Tech Don Bosco Centre Athanavor, de Y. Hills, situé dans l'état du Tamil Nadu (Figure III.17a), à environ 170 km de la ville de Bangalore (direction ESE) et environ 200 km du golfe du Bengale (direction E).

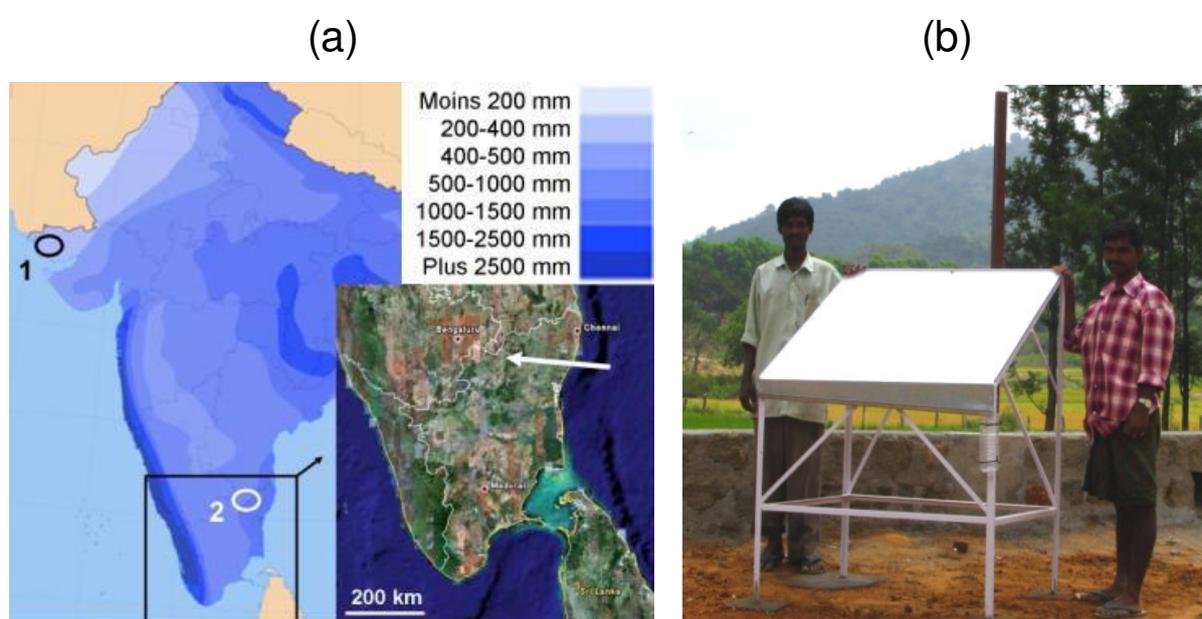


Fig.III.17. (a) Carte présentant les moyennes annuelles du cumul de précipitations du sous-continent indien. Cercle (1) : localisation de l'usine de rosée de Panandhro (précipitations, 200-400 mm/an) ; cercle (2) : Yelagiri Hills (précipitations annuelles 500-1000 mm). Flèche blanche (zoom) : Yelagiri Hills dans l'état du Tamil Nadu. (b) Mise en place du condenseur de mesure (tôle + isolant thermique + peinture radiative). (Photo O.Clus)

La pointe sud du sous-continent indien se caractérise par un régime de mousson de flux ouest. Compte tenu du relief, les précipitations sont très intenses sur la côte ouest (Kerala, Karnataka) mais beaucoup plus raréfiées dans l'état du Tamil Nadu. Bien que crédité d'un cumul de précipitations de 500-1000 mm/an (Figure III.17a), l'essentiel des précipitations a lieu en période de mousson. Le Tamil Nadu, très densément peuplé, souffre d'un manque chronique de ressources hydriques qui peut devenir critique en fin de saison sèche, notamment sur un plateau montagneux tel que le site de Yelagiri Hills.

ii. Protocole expérimental

Le condenseur 1x1 m² mis en place (Figure III.17b) est équipé d'une tôle isolée thermiquement sous son dessous et recouverte de peinture radiative de notre formulation dont les avantages sont décrits au Chapitre III.1.1. Les volumes sont relevés quotidiennement par les étudiants du centre de formation. Il n'y a pas de données météorologiques disponibles, les étudiants remplissant une grille comprenant les volumes de rosée plus des binaire indiquant la présence/absence d'événements de pluie, de ciel clair et de brouillard.

iii. Résultats partiels

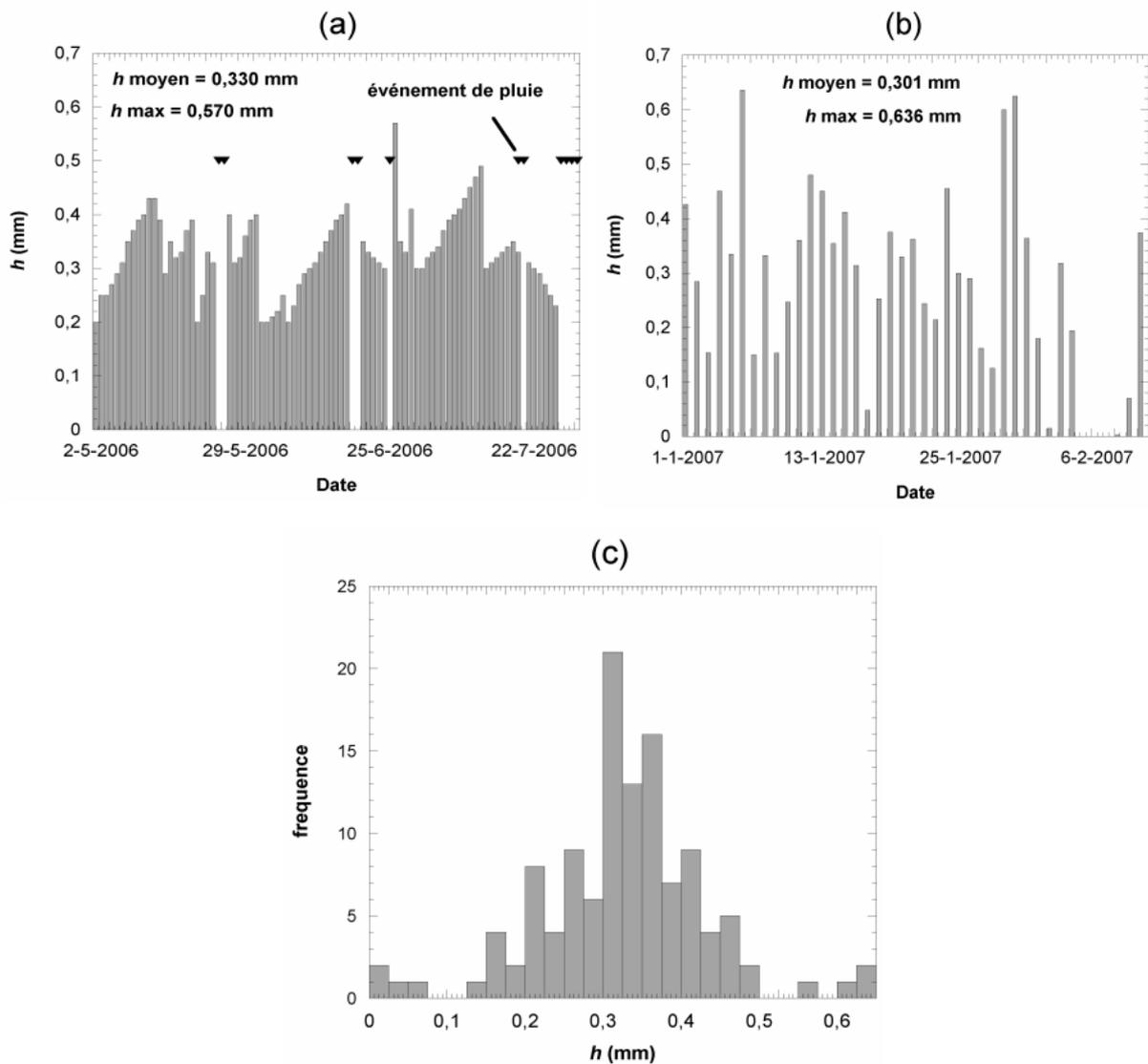


Fig.III.18. (a) Rendements de rosée du 1-05-06 au 30-07-06 (91 jours, cumul 26,79 mm), 11 événements de pluie ; (b) Rendements de rosée du 1-01-07 au 10-02-07 (41 jours, cumul 11,44 mm), 0 événements de pluie. (c) Distribution des rendements de rosée pour l'ensemble de ces deux périodes de mesure (132 jours).

La période de mesure (du 1-05-06 au 10-02-07) a été interrompue par une perte de donnée du 1-08-06 au 31-12-06. C'est pourquoi les résultats seront considérés comme partiels, avec deux périodes effectivement enregistrées, l'une incluant le mois de juillet (mousson), l'autre en saison sèche. Les valeurs relevées sont exceptionnellement prometteuses, avec un maxima (record mondial à ce jour) de 0,636 mm le 6-1-07 (Figure III.18b) et des rendements distribués principalement au-delà de 0,3 mm/ nuit (Figure III.18c). Les principales valeurs sont résumées dans le Tableau III.4.

III.2.5 Conclusion tous sites

	Tikehau sites 1 & 2 (PF) 15°07' S	Tahiti (PF) 17°34' S	Panandhro (Inde) 23°40' N	Yelagiri Hills (Inde) 12°35' N	Biševo (Croatie) 42°59' N	Ajaccio (France) 41°55' N	Jérusalem (Israël) 35°13' N
Période de mesure	21/6/05 - 7/10/05	16/5/05 - 14/10/05	8/10/05 - 17/04/06	1-05 / 30-07-06 1-01 / 10-02-07	14/04/05 - 31/08/06	26/05/05 - 15/11/06	06/03 - 06/04
Rosée Maximum (mm)	0,23	0,22	0,566	0,636	0,526	0,418	0,48
Rosée moyenne (mm)	0,102	0,068	0,203	0,321	0,181	0,111	0,19
pluie (cumul, mm)	247,8	176,2	0,0	/	840,1	585*	581*
rosée / pluie (%)	1,09	3,17	100	/	4,51	2,1	6,4
% de jours de rosée	23,9	53,5	31,8	90,2	43,1	21,5	48,2
Ressource rosée (mm/jour)	0,024	0,021	0,060	0,290	0,078	0,024	0,133
Ressource rosée en saison sèche (mm/jour)	0,024	0,021	Mesure partielle	Mesure partielle	0,094	0,021	0,139

Tab. III.4. Grandeurs représentatives des événements de rosée sur les sites de Tikehau et Tahiti (Polynésie Française) en climat tropical humide, Panandhro (Inde, Gujarat) en climat tropical (limite de mousson) semi-aride, Yelagiri Hills (Inde, Tamil Nadu) en climat tropical (mousson), Biševo (Croatie, île Dalmate) en climat méditerranéen. Deux autres sites méditerranéens ont été ajoutés pour comparaison : Jérusalem et Ajaccio (Berkowicz *et al.*, 2004 ; Mileta *et al.*, 2004). Les données de pluviométrie pour Ajaccio et Jérusalem notées (*) sont obtenues à partir des données mensuelles moyennes (sur une période de 30 ans) proposées par Météo France

En climat méditerranéen, la saison sèche est prise du 01-05 au 30-09. Les données de Ajaccio ont été collectées durant la période 26/05/05 - 15/11/06 sur un condenseur plan de 1 m² standard (style OPUR) suivant la procédure décrite au Chapitre III.3. Les données de Jérusalem ont été collectées sur le même condenseur de Juin 2003 à mai 2004 (Berkowicz *et al.*, 2004 ; Mileta *et al.*, 2004).

Les données essentielles sont résumées pour comparaison dans le Tableau III.4 et ont été précédemment commentées site par site. La ressource rosée durant la période sèche (quand la ressource d'appoint est intéressante) est la plus intéressante mais aussi très inégalement disponible. Même si la proportion de la rosée dans les précipitations cumulées reste relativement faible, elle peut aller jusqu'à 100 % en saison sèche dans les zones semi-arides (Panandhro, Jérusalem, Tamil Nadu). Dans ces régions, la population souvent pauvre n'a pas les moyens de différer la ressource (pas de moyens de traitement d'eau stagnantes ou stockées) mais conserve une culture de l'économie et donc consomme peu d'eau. La ressource rosée est donc bien adaptée pour leur consommation. Des variations importantes sont observées d'un site à l'autre, y compris pour un même type de climat (de 0,139 à 0,021 mm/jour de Jérusalem à Ajaccio, mais également 0,094 mm/jour à Biševo pour une latitude voisine proche de 44 °N). A l'échelle du microclimat, des écarts potentiellement supérieurs s'observent. Par exemple si l'on considère deux îles voisines de seulement 10 km, la ressource annuelle de rosée est de 0,015 mm j⁻¹ (Komiza, île de Vis, voir Mileta *et al.*, 2004) et de 0,078 mm j⁻¹ (Baie de Salbunara, île de Biševo, Tableau III.4).

Il est intéressant de mettre à profit les différentes mesures (paramètres météorologiques, mesure de radiométrie IR, etc...) accumulées au cours de ces expérimentations pour donner quelques éléments d'explication de ces écarts du gisement de rosée à partir d'exemples concrets.

III.3 Paramètres influant sur la production de rosée

La production de rosée varie suivant les effets conjoints des paramètres météorologiques climatiques (échelle de la couche limite atmosphérique, voir de l'atmosphère) et microclimatiques (échelle de l'ordre de la centaine de mètres ; Guyot, 1999) (voir Chapitre I.1) et le fonctionnement de la machine thermique condenseur (voir Chapitre II). L'efficacité des systèmes et les rendements de rosée instantanés varient en fonction des grandeurs RH , V , Dir , T_w , T_d , N et de la température T_c du condenseur (c'est à dire de sa forme et du bilan radiatif sur sa surface).

L'implication de chacune de ces variables dans le rendement ainsi que leur dépendance entre elles est complexe et les corrélations expérimentales sont utiles pour la compréhension des phénomènes. Prenons par exemple le cas des mesures effectuées sur le site de Panandhro (Inde), la Figure III.19 représente RH , V et Dir pour une durée de 1 année.

On constate une variation annuelle des paramètres météorologiques organisée de part et d'autre de la période de mousson (constatations également rapportées par Sharan *et al.*, 2007). Les tendances observées montrent que des relations de dépendance lient les paramètres météorologiques tels que la direction et la vitesse du vent, par exemple. Il est dès lors envisageable de limiter le nombre de variables à prendre en compte pour expliquer les rendements de rosée. Le point le plus intéressant est finalement de définir un nombre minimal de grandeurs, ces grandeurs devant être aussi simples que possible à collecter.

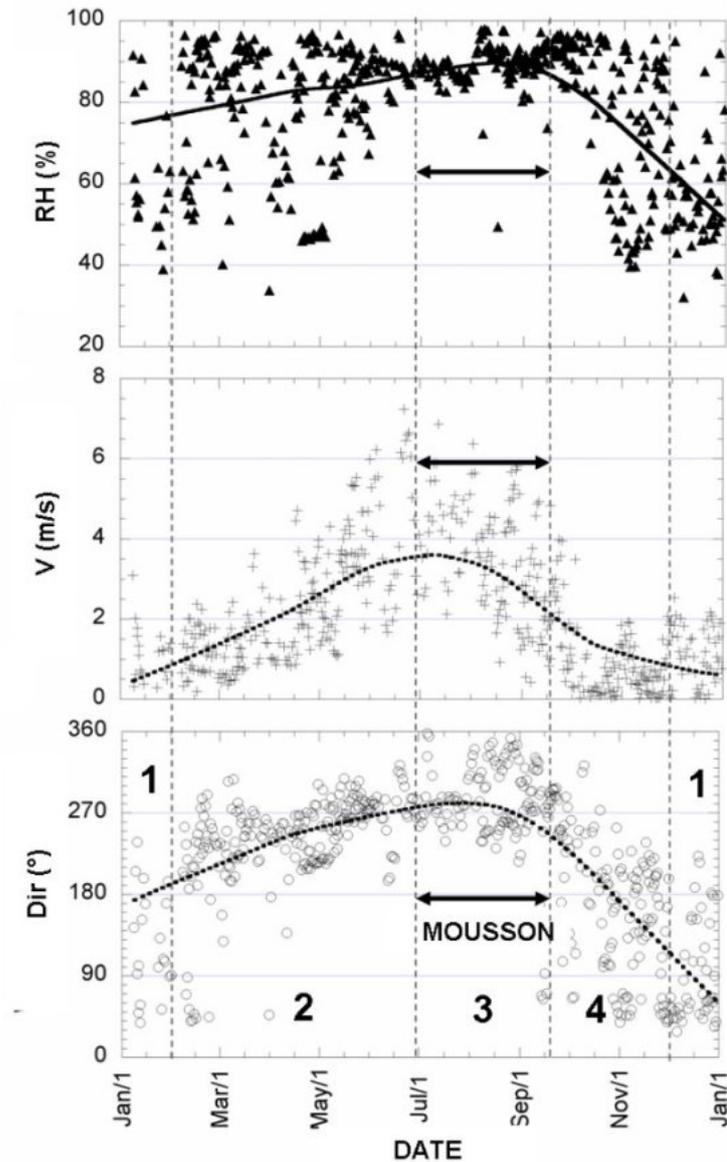


Fig. III.19. Humidité relative RH , (%), vitesse du vent V (m s^{-1} , extrapolée à 10 m) et direction du vent Dir ($^{\circ}$). Le nuage de points sont les données disponibles du 07/02/04 au 25/02/06. Les valeurs sont moyennées durant la nuit de 21:00 à 7:00 ; les courbes sont des pondérations à 50%.

Les nombreuses mesures physiques menées sur les sites d’Ajaccio (France ; Muselli *et al.*, 2006a) ; Zadar, Komiza et Biševo (Croatie ; Mileta *et al.*, 2006) ; Kothara (Inde ; Sharan *et al.*, 2007) ont été déjà corrélées par rapport à l’humidité relative RH ou plus précisément la grandeur directement proportionnelle $(T_d - T_a) = f(RH)$. Prenons l’exemple des données expérimentales collectées sur le site de Biševo et exprimons les rendements de rosée en fonction de $(T_d - T_a)$ sur la Figure III.20 :

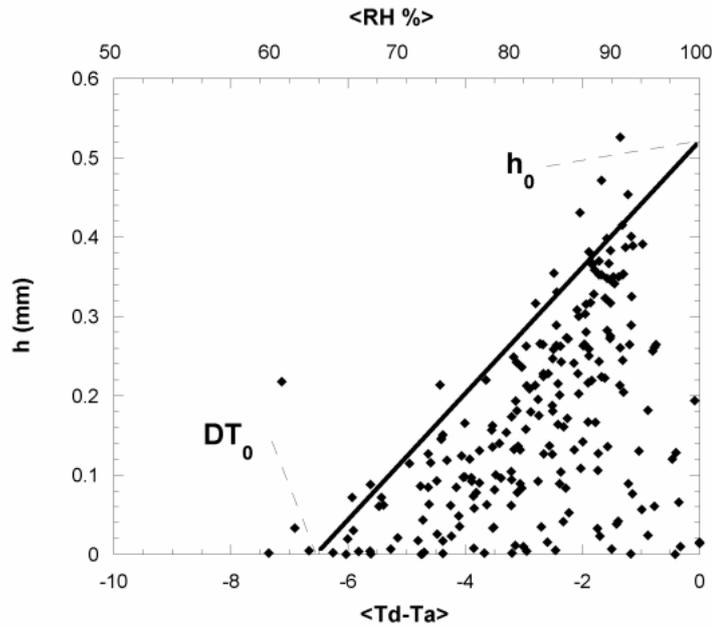


Fig.III.20. Rendements de rosée exprimés en fonction de $\langle T_d - T_a \rangle$ (abscisse inférieure, valeur moyenne de 21 :00 à 7 :00 en °C) ou RH (abscisse supérieure en %). Toiture de Biševo pour la période du 14/04/05 - 31/08/06.

La droite $h_M (DT_0, h_0)$, à l'exclusion de 6 données (sur 225 événements) représente l'enveloppe de la distribution des rendements. Les valeurs de DT_0 et h_0 ont à ce jour été déterminées pour de nombreux sites et l'enveloppe du nuage de points h_M présente globalement un profil linéaire dans les études menées par les précédents auteurs (Beysens *et al.*, 2005a ; Muselli *et al.*, 2006a ; Mileta *et al.*, 2006 ; Sharan *et al.*, 2007). La droite h_M représente le rendement maximal que l'on peut attendre pour un RH déterminé, elle s'écrit selon l'Eq. III(1) :

$$h_M = h_0 \left(1 - \frac{T_d - T_a}{DT_0} \right) \quad \text{III.(1)}$$

Avec cette formulation, la variation du rendement $h \in [0 ; h_M]$ pour un RH donné est fonction des conditions météorologiques de la nuit considérée (Dir, V, N) ainsi que la forme du condenseur et son environnement immédiat. Au cours de ces travaux, des observations ont été réalisées pour des climats très différents (tropical humide, méditerranéen, tropical aride à régime de mousson). Des données et observations précises issues de chacun de ces sites peuvent servir d'exemple afin d'illustrer l'influence de chacun des paramètres ($Dir, V, N, Forme$) sur le rendement.

III.3.1 Facteur de forme

Le facteur de forme f_F a été déterminé d'après le travail de simulations numériques (Chapitre II). Il représente l'efficacité relative d'un condenseur (matériaux, forme, superficie de condensation) par rapport à un condenseur de référence (réel sans dimension). Dans le cas initial, le condenseur plan de 1 m² et incliné à 30° de type OPUR est la référence et à l'heure actuelle f_F s'exprime en fonction de V à 10 m. Pour une vitesse de vent V_i , le facteur de forme $f_F(V_i)_i$ est égal au gain en température (déterminé au Chapitre II) et suit l'Eq. III.(2) :

$$f_F(V_i) = \left(\frac{(T_c)_i - T_a}{(T_{ref})_i - T_a} \right) \quad \text{III.(2)}$$

III.3.2 Direction du vent Dir (°)

i. La direction du vent intervient sur toute forme de condenseur qui n'admet pas de symétrie de révolution par rapport à un axe vertical. Dans ce cas, le facteur de forme précédemment décrit $f_F(V)$ aura été déterminé pour une direction de vent bien précise. Il est donc envisageable d'utiliser le facteur de forme non seulement pour comparer différents condenseurs entre eux, mais également pour simuler l'efficacité dans différentes orientations de vent d'un même condenseur par rapport à une direction de référence. L'Eq. III.(2) sera à nouveau utilisée où la variable $(T_c)_i$ correspondra à la température de surface pour une orientation particulière Dir_i par rapport à l'orientation de référence donnant la température T_{ref} . Le facteur de forme s'écrira alors $f_F(V, Dir)$.

ii. L'influence de la direction du vent $f(Dir)$ sur le gisement de rosée peut être étudiée par exemple à partir des mesures effectuées sur le site de Panandhro. Détaillons l'analyse des mesures de RH , V , Dir (moyennes de 21:00 à 7:00) effectuées à Panandhro et présentées sur la Figure III.19. Les données doivent être expliquées en prenant en compte la proximité de la Mer d'Arabie (au OSO de Panandhro, se rapporter à la carte, Figure III.14). La direction moyenne du vent de nuit Dir effectue une rotation particulière au cours de l'année.

- Période (1) : de décembre à début février sur la Figure III.19, le vent est continental (direction N à SE). V nocturne moyen est généralement inférieure à 2 m s^{-1} et RH est souvent voisine de 60 %.
- Période (2) : de février à juillet, Dir tourne progressivement Sud puis Ouest, V nocturne moyen est généralement inférieure à 2 m s^{-1} . Cette brise de mer apporte d'importants volumes de vapeur d'eau si bien que durant cette période de février à mai RH est généralement supérieure à 80 %. Cette période correspond bien aux distributions et intensités de rosée maximales observées précédemment sur la Figure III.16.
- Période (3) : de mi-juillet à mi-septembre, la période de mousson se caractérise par un fort vent dominant en provenance du NO avec une prédominance de jours nuageux (Sharan *et al.*, 2007). Durant la mousson, le vent fort et la couverture nuageuse limitent la formation de rosée.
- Période (4) : enfin de septembre à décembre, Dir varie en sens inverse avec alternance de vent humide orienté SO et de vent sec orienté NE. Cette période donne toutefois des événements de rosée importants.

En limitant la période d'étude à la saison sèche d'octobre à mai, le vent continental (direction comprise entre 0 et 170°) présente seulement 8 occurrences de RH supérieures à 70 % sur un échantillon de 329 nuits (Figure III.21b). Ce vent sec est défavorable à la condensation de rosée. Par ailleurs, V présente des valeurs généralement inférieures à $4,0 \text{ m s}^{-1}$ quand Dir est compris entre 0 et 270° (Figure III.21a). Ces conditions de vent sont favorables à la formation de rosée sur d'autres sites expérimentés (Muselli *et al.*, 2006a). Pour les directions O à N (de 270° à 360°), V augmente sensiblement ce qui malgré une humidité importante limite la condensation de rosée en limitant le refroidissement des condenseurs.

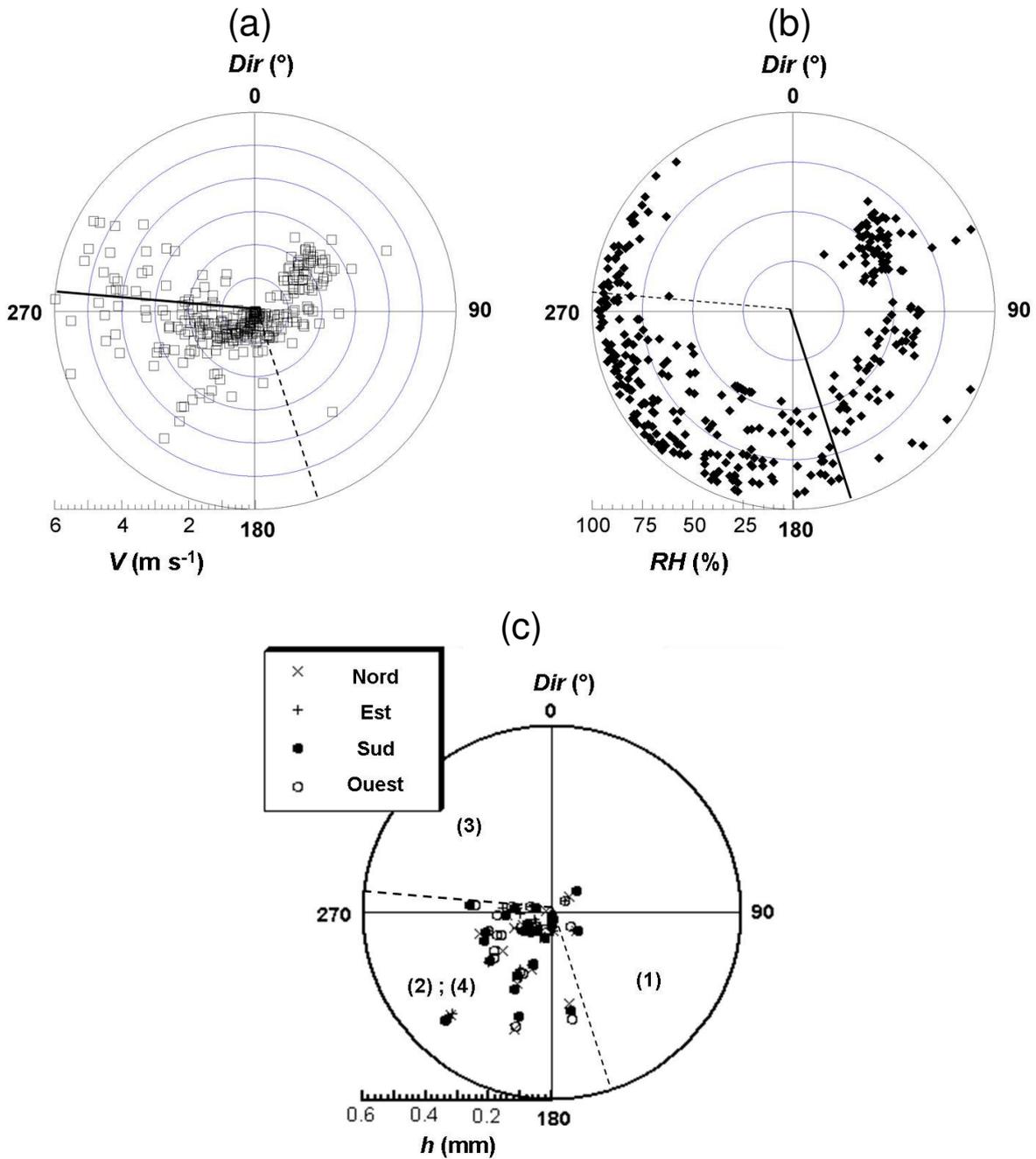


Fig. III.21. (a) V (m s^{-1} , extrapolée à 10 m) et (b) RH (%) représentés en fonction de Dir ($^{\circ}$) pendant la saison sèche (manque les données d'octobre, donc du 1^{er} novembre au 31 mai). Les données sont moyennées de 21:00 à 7:00. (c) rendements de rosée en fonction de Dir pour les quatre condenseurs orientés vers chaque point cardinal et pour la période de mesure du 08/10/05 à 17/04/06

L'observation de la Figure III.21c laisse à penser que les rendements de rosée sont directement corrélés à Dir puisque les événements se regroupent quasi exclusivement pour Dir de 170 à 270 $^{\circ}$. Cependant l'analyse précédente par périodes montre que pour ce site V et RH sont liés aux régimes de vent (Dir). Aussi, l'intensité de rosée h (mm) sera préférentiellement corrélée aux données V et RH aisément mesurables in situ et comparable

pour tous les sites plutôt qu'au paramètre direction Dir propre à chaque lieu géographique. En conséquence, l'influence de la direction du vent $f(Dir)$ sur le gisement de rosée sera incluse dans les valeurs relevées sur site des paramètres humidité relative RH (c'est à dire $T_d - T_a$) et vitesse du vent V qui sera traitée dans le paragraphe suivant.

Dès à présent, L'Eq. III.(1) peut s'écrire en incluant le facteur de forme $f_F(V, Dir)$:

$$h = h_0 \cdot f_F(V, Dir) \cdot \left(1 - \frac{T_d - T_a}{DT_0} \right) \quad \text{III.(3)}$$

III.3.3 Vitesse du vent V (m s^{-1}) à 10 m

i. Micrométéorologie et coupe-vent

A l'échelle du condenseur, la composante vélocité du vent $f(V)$ est très importante sur les rendements en rosée. Les simulations numériques ont montré précédemment (chapitre II ; Clus *et al.*, 2006b) que pour $RH \approx 85\%$ et $V \geq 3,0 \text{ m s}^{-1}$ l'apport thermique sur un condenseur 1 m^2 standard de type OPUR (face arrière au vent dominant) est suffisamment important pour empêcher la condensation de rosée. Cet ordre de grandeur est confirmé par de nombreuses mesures sur sites (Muselli *et al.*, 2002 ; Beysens *et al.*, 2003 ; Mileta *et al.*, 2004 ; Muselli *et al.*, 2006a). Il y a donc un effet « valeur de coupure » sur h (mm) qui pour un système donné (condenseur et environnement) associe une vitesse de vent limite V_0 au-delà de laquelle les rendements de rosée sont négligeables. Dans le cas de Tikehau, cette valeur V_0 est estimée expérimentalement (Figure III.23a) à $4,0 \text{ m s}^{-1}$ d'après les mesures expérimentales relevées sur l'aérodrome (site #1).

Dans le cas de l'étude du potentiel de rosée dans l'archipel des Tuamotu (Tikehau) en climat tropical humide, ce facteur vitesse de vent laissa rapidement présager des difficultés pour la mise en œuvre du refroidissement radiatif nocturne. En effet cette partie du globe est soumise au régime des vents Alizés. A titre d'exemple, le vent moyen nocturne (20:00-7:00) mesuré à 10 m sur l'aérodrome de Rangiroa (64,3 km, ENE de Tikehau, lat. $14^\circ 57'$ S, long. $147^\circ 39'$ O) de 2001 à 2005 durant la saison sèche était de $5,48 \text{ m s}^{-1}$ (écart type : $3,2 \text{ m s}^{-1}$, se reporter à la Figure III.23b). La durée moyenne durant laquelle V est inférieure à $2,0 \text{ m s}^{-1}$ représente seulement 9,8 % des nuits.

Initialement, le site #1 (aérodrome de Tikehau) avait été choisi ouvert sur le ciel et sans obstacles afin d'offrir les conditions d'un refroidissement radiatif optimum au condenseur, par opposition aux cocoteraies omniprésentes sur le reste du motu. Cependant, les conditions de vent à proximité de la piste ouverte dans l'axe des vents Alizés se sont montrées défavorables à la récupération de rosée comme le montre la Figure III.10a (fond blanc pour le site #1). Face à cette situation, il a été décidé de déplacer le condenseur dans le jardin d'un faré local (maison d'habitation). Le condenseur a été placé dans une clairière bordée par des cocotiers d'environ 6 m de hauteur sur les lisières S, O, N et de 8 m en lisière E, Figure III.22a). La clairière a des dimensions de 44 m x 43 m et elle est située en bout de piste de l'aérodrome, protégée du vent dominant par environ 12 rangées de cocotiers. Finalement, cet emplacement est plus représentatif des conditions rencontrées localement, en effet, sur ces atolls bas sur l'eau, la totalité des maisons est abritée des Alizés par des plantations de cocotiers.

Le bilan radiatif d'un condenseur installé dans un espace non dégagé doit être étudié afin que les rendements ne soient pas limités par une perte de refroidissement radiatif. Le programme mis au point au Chapitre II.2 pour intégrer le bilan radiatif d'un condenseur en fonction de sa géométrie (Clus *et al.*, 2006b) a été modifié ici pour évaluer le placement optimum du condenseur standard dans la clairière. Le condenseur (C, Figure III.22a) est placé dos aux Alizés, le bilan radiatif est intégré (trait plein, Figure III.22b) dans les trois dimensions sur le demi espace vu par la surface du condenseur. Pour un angle compris entre le zénith et la limite des arbres, l'émissivité angulaire du ciel ε_θ est donnée par l'Eq. A-I.(17) (Berger *et al.*, 2003) ; pour un angle solide élémentaire $d\Omega$ voyant les arbres ou le sol, $\varepsilon_\theta = 1$. Le bilan radiatif du condenseur est présenté par la Figure III.22b :

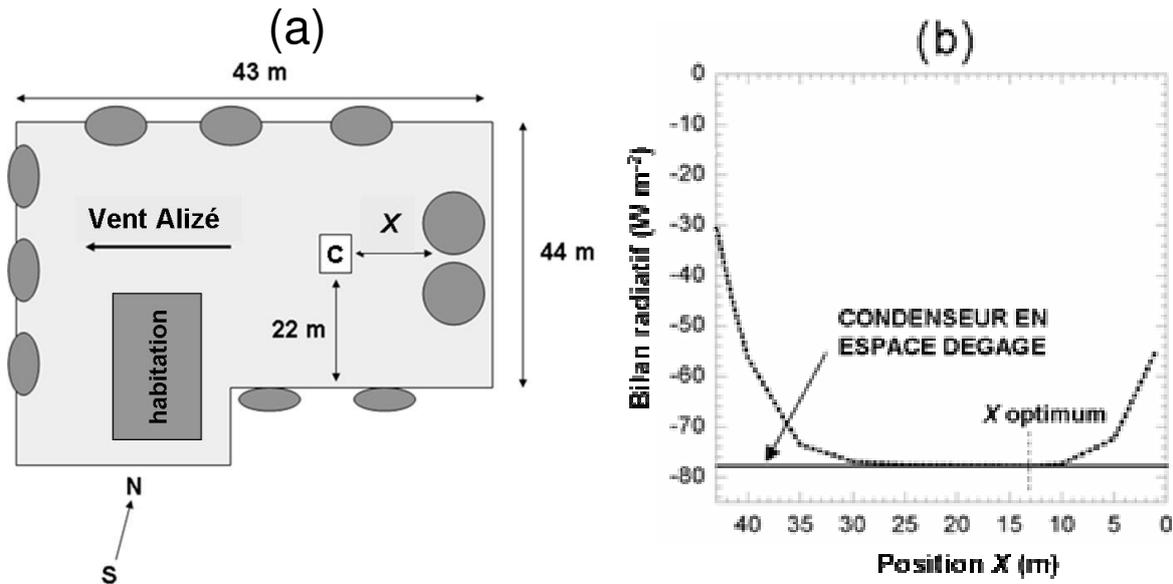


Fig.III.22. (a) Schéma d'implantation du condenseur sur le site #2 à Tikehau (échelle non respectée). C: condenseur incliné à 30° avec la face arrière exposée aux Alizés. X (m): distance condenseur – tronc des cocotiers). Cercles (grisés) : cocotiers hauts de 8 m. Ellipses : cocotiers hauts de 6 m. (b) Simulation du bilan radiatif sur C ($W m^{-2}$, trait pointillé) en fonction de X et pour $T_c = T_a$

La maison masque une bande de ciel inférieure à celle masquée par les arbres et elle peut être ignorée. Le bilan radiatif est intégré en fonction de X suivant un axe parallèle aux côtés S et N et distant de 22 m de chacun d'eux. La position $X = 13,5$ m est la plus favorable et présente la dissipation de chaleur maximale égale à $-77,75 W m^{-2}$. La même intégration réalisée pour un espace ouvert (trait plein Figure III.22b) donne une puissance dissipée de $-77,81 W m^{-2}$. La perte d'efficacité du refroidissement radiatif (rayonnement IR reçu émis par les arbres voisins) est donc négligeable en déplaçant l'expérience de l'aérodrome à la clairière.

La Figure III.23a donne les cumuls de volumes de rosée collectés sur les deux sites de Tikehau en fonction du vent météorologique moyen durant la nuit. En espace dégagé, (site #1), les événements de rosée se retrouvent presque exclusivement pour $V < 4 m s^{-1}$, comme attendu. Par contre, dans le cas où le condenseur est protégé par un coupe-vent (site #2), 62,5 % du cumul de rosée est condensé pour des vents moyens $V > 6 m s^{-1}$. La fréquence relative du vent nocturne à Rangiroa (en % du temps, Figure III.23b) montre que $V > 4 m s^{-1}$ près de 78 % du temps, dans ce cas, la présence du coupe-vent est importante.

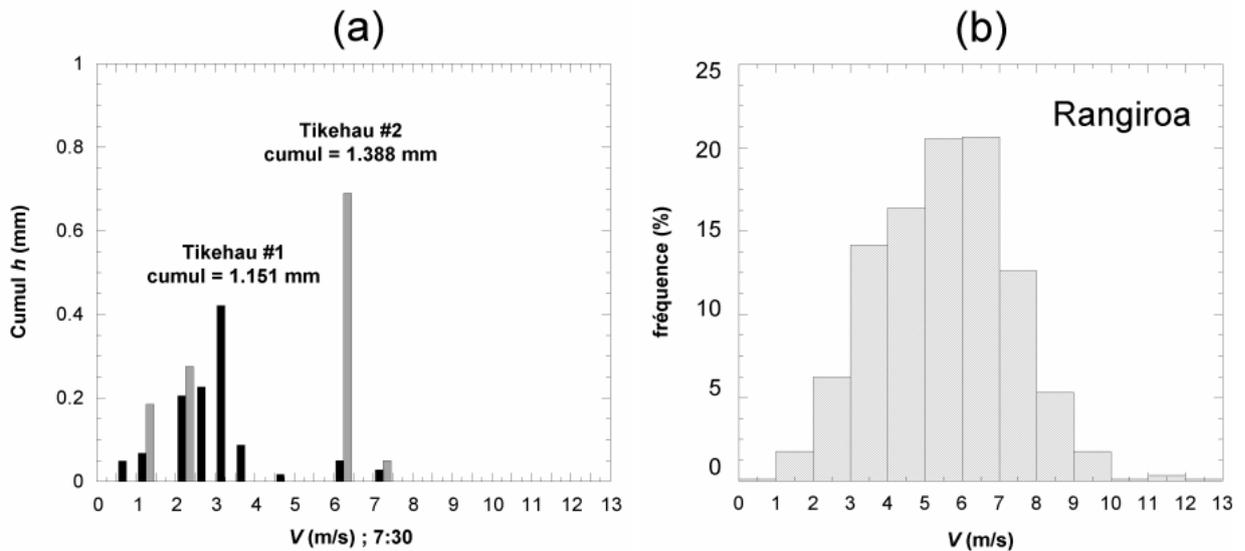


Fig.III.23. (a) Rendements de rosée cumulés à Tikehau en fonction de la vitesse du vent V (par classes de $0,5 \text{ m s}^{-1}$). Site #1: histogramme noir ; site #2: histogramme gris. (b) 5 ans (2001–2005) de moyennes de vent nocturne (en % d'heures nocturnes) à Rangiroa sont présentés pour comparaison. Seules les nuits de saison sèche sont considérées (20:00 - 07:00, mai à octobre).

Cette expérience montre que la valeur plafond V_0 pour l'observation d'événements rosée sur un condenseur plan de 1 m^2 est bien due à des effets thermodynamiques et à l'échauffement du condenseur avec l'accélération des flux convectifs à sa surface.

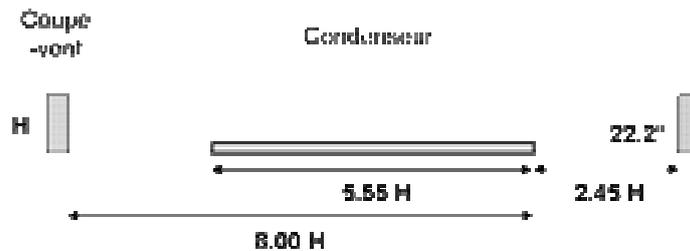
La mise en œuvre de coupe-vents à proximité des condenseurs, notamment pour les installations de type équipement de toitures existantes dont la géométrie est imposée et ne peut être adaptée, pourrait être une solution simple et bon marché pour augmenter la fréquence et l'amplitude des événements de rosée. Un brise-vent doit être perméable et avoir une porosité supérieure à 25 % pour permettre de conserver un flux laminaire en aval, de direction semblable au vent dominant mais de vitesse réduite. Pour une porosité optimum de 35 à 40 % (Melaragno, 1982 ; Guyot, 1999) le produit de la réduction moyenne du vent par la longueur de la zone protégée est maximum. Pour une hauteur H , la zone s'étendant jusqu'à $8H$ en aval du brise-vent est la plus protégée avec une réduction de V supérieure à 50 %. Durant le cycle nocturne, le ralentissement du vent favorise le refroidissement radiatif du sol entre $2H$ et $8H$.

Des expériences relatées par Guyot (1999) ont été menées sur un coupe-vent composite à base $2/3H$ poreuse coiffée par un élément $1/3H$ imperméable. Elles ont montré que ses effets étaient voisins de ceux d'un coupe-vent ayant la porosité de la base $2/3H$ sur toute la hauteur. Cette configuration représente très bien l'exemple précédent de Tikehau, avec une base très poreuse (trunks nus jusqu'à 5 ou 6 m) surmontée d'un feuillage très dense (5 à 8 m). En

comptant $H = 8$ m, la zone abritée de 50 % fait 64 m et s'étend bien au-delà de la clairière, expliquant les gains de rosée observés sur le site #2.

Pour un usage à d'autres sites, les coupe-vents les plus efficaces auront une porosité de 35 %, une faible épaisseur et une hauteur irrégulière (différentes essences d'arbres). Les coupe-vents végétaux peuvent avantageusement être remplacés par des filets à brouillard verticaux (tels que ceux développés par les Associations Global Nature www.fundacionglobalnature.org/colaboradores/aguacanarias.htm ou Fogquest, www.fogquest.org) sur des sites offrant des ressources mixtes en eau. Pour le calcul du bilan radiatif (Figure III.22b), la hauteur moyenne du condenseur de 1 m^2 incliné à 30° était de 0,7 m. Donc pour ce type de condenseur, le refroidissement radiatif n'est pas significativement diminué en masquant le ciel avec un angle de $22,18^\circ$ par rapport à l'horizontale, ce qui permet d'imaginer au sol la configuration suivante (Figure III.24a).

(a)



(b)



(c)



Fig.III.24. (a) Schéma d'implantation de condenseurs radiatifs en zone abritée par des coupe-vents. (b) condenseur standard 1 m² [C] dans la clairière de Tikehau (site #2). (c) condenseur de Yelagiri Hills vu de face avec coupe-vent en second plan. Flèches : direction du vent nocturne dominant (photos O. Clus).

En tenant compte de la longueur de la zone d'abattement de 50 % du vent ($8H$) et des propriétés radiatives nécessaires à un condenseur incliné à 30° , la zone idéale pour l'installation de condenseurs se situe à $2,45 H$ du coupe-vent sur une longueur de $5,55 H$ comme indiqué sur la Figure III.24a. Dès à présent, deux condenseurs ont été installés en prenant en compte la configuration du site et le régime de vent nocturne pour bénéficier de coupe-vent : Tikehau #2 et le condenseur de Yelagiri Hills, tous deux représentés sur les Figure III.24bc.

Peu de données expérimentales existent pour l'usage de coupe-vent en synergie de condenseurs radiatifs, néanmoins dans le cas de Tikehau #2, V_0 est portée au-delà de $6,0 \text{ m s}^{-1}$ dans la clairière. La poursuite logique de ce travail serait à l'avenir d'appliquer le programme de simulations numériques PHOENICS (Chapitre II) au couple {coupe-vent, condenseur}. Dès à présent et selon la littérature (Melaragno, 1982), il est possible de faire l'approximation que la zone abritée par le coupe-vent connaît un vent V' laminaire tel que $V' < V/2$. Si le condenseur est simulé dans ce nouveau référentiel en fonction du vent V' les résultats seront identiques à ceux de la Figure II.18 pour le condenseur de référence en fonction de V en espace ouvert et dégagé.

La Figure III.25a compare les deux cas (avec coupe-vent, trait pointillé) et en espace dégagé (trait plein) tous deux exprimés en fonction du vent réel V . Le gain en température pour le condenseur abrité est représenté en ligne pointillée sur le graphe (b) et sera maximal (un gain supérieur à 50 %) pour un vent réel compris entre 2 et 3 m s^{-1} . L'utilisation d'un

coupe-vent pourrait retarder la chute des rendements de rosée observée avec l'augmentation de V ainsi qu'augmenter sensiblement la valeur de coupure de V_0 à V'_0 sur la Figure III.25 a :

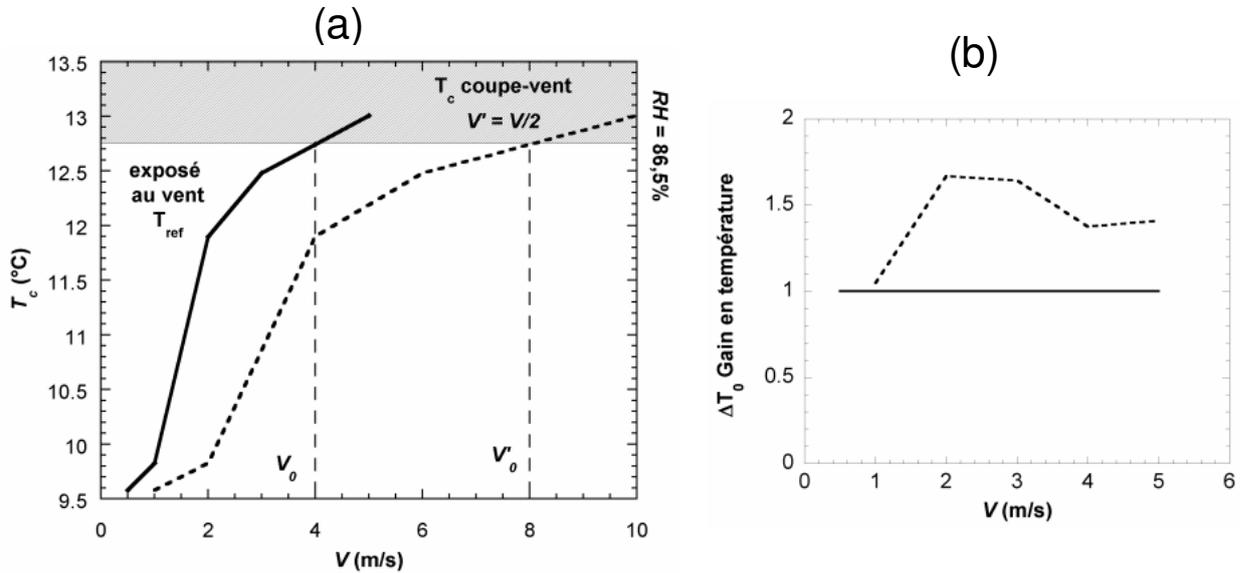


Fig.III.25. (a) Température de surface d'un condenseur standard de 1 m^2 et incliné à 30° en fonction de la vitesse du vent météorologique : en espace dégagé (trait plein, référence) et abrité par un coupe-vent (trait pointillé). (b) Courbe ΔT_0 : gain en température du condenseur abrité par rapport à la référence en espace libre.

ii. Vitesse de vent et humidité

A l'échelle de la basse atmosphère, l'influence de la vitesse du vent $f(V)$ peut également se traduire par une variation de RH mesurée localement et donc sur la température de rosée comme sur la condensation. La relation $RH = f(V)$ est caractéristique de chaque climat ou microclimat et devra être étudiée avec attention comme critère justifiant ou non de l'installation d'un coupe-vent en association du condenseur radiatif.

Le profil nocturne de la basse atmosphère est dans le cas général et en l'absence de vent en inversion de température (sous forme d'une couche d'air stable dans laquelle la température virtuelle augmente avec l'altitude). Cette stratification est due au refroidissement radiatif rapide du sol dès que le soleil décroît. Des mesures en Australie ont montré que l'épaisseur de cette couche limite augmente de moins de 100 m à la tombée du jour jusqu'à environ 500 m en fin de nuit. Cette épaisseur peut être estimée théoriquement (Jacobs *et al.*, 2002). C'est au voisinage du sol, dans les 15 premiers mètres que les écarts thermiques sont les plus importants. Certaines mesures (vallée du Rhône, Bretagne) ont montré qu'il est courant de mesurer des écarts thermiques de 6 à 8°C entre 1 et 11 m de hauteur. Un vent à 10 m de hauteur de 1 m s^{-1} peut suffire à homogénéiser les températures dans les 15 premiers

mètres (Guyot, 1999 ; Garrat and Segal, 1988). Ce phénomène est très important pour la formation de rosée car des variations importantes de la température de surface conduisent à de grandes variations de RH en raison de la relation qui lie la tension de vapeur saturante à la température (variation d'environ 35 % de RH pour un écart de 6-8°C ; Beysens *et al.*, 2005a).

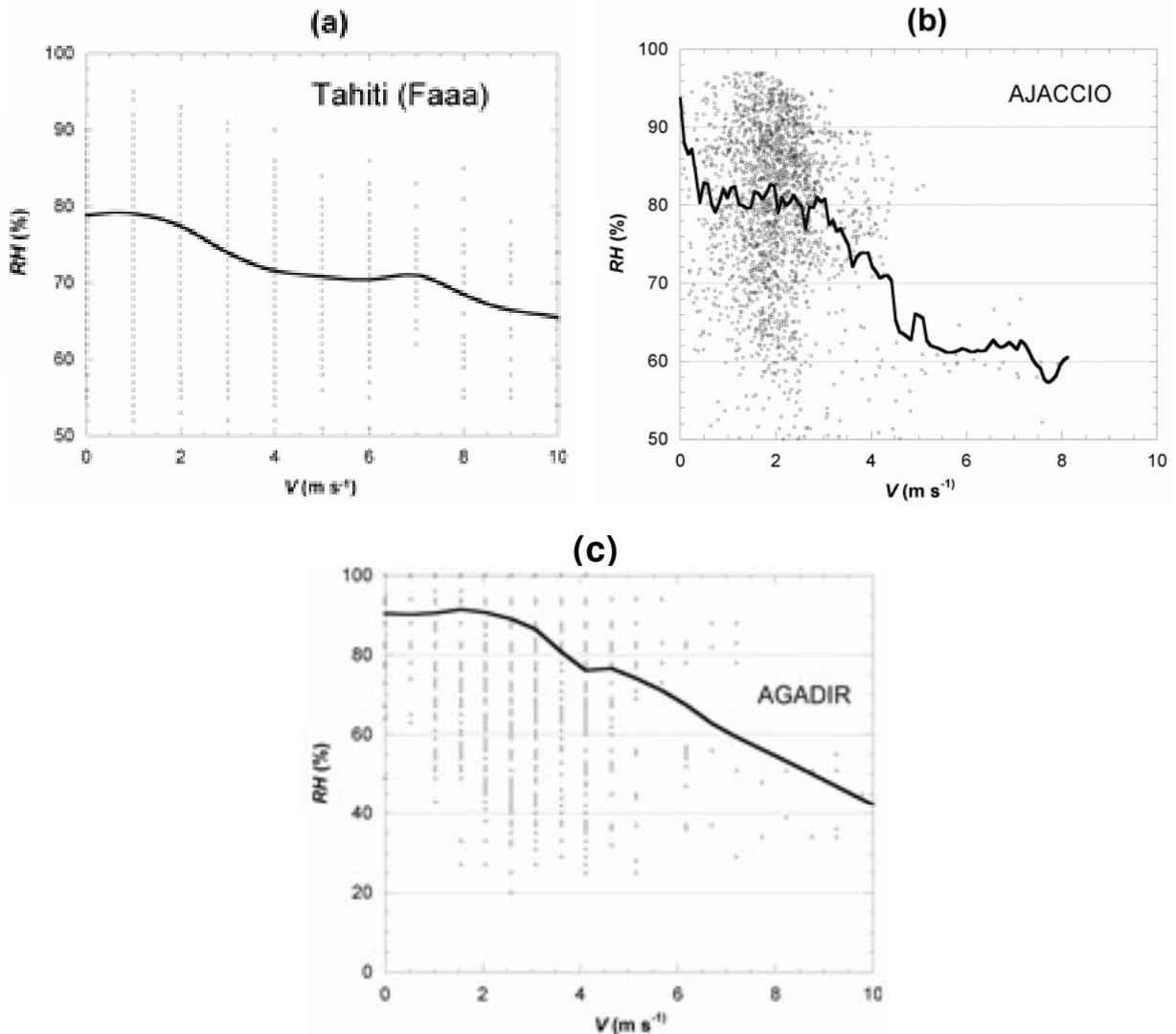


Fig.III.26. RH (%) corrélée avec V durant les nuits claires (avec la condition sur la couverture nuageuse $N \leq 2$). (a) Aéroport de Faaa, Tahiti, Polynésie Française, climat tropical humide, années 2001 à 2005. (b) Ajaccio, Corse, France, climat méditerranéen année 2004. (c) Agadir, Maroc, climat méditerranéen semi aride du 03/01/06 au 30/11/06 (données fournies par Lekouch I.).

Les sites de Tahiti et Tikehau ont une atmosphère tropicale très humide avec une valeur moyenne de la colonne de vapeur d'eau atmosphérique équivalente voisine de 50 mm, à comparer aux 16 mm mesurés dans le bassin méditerranéen (American Geophysical Union, 2006). Une vitesse de vent importante à 10 m (moyenne nocturne 5,48 m s⁻¹ sur l'aéroport de

Faaa) homogénéise la couche atmosphérique de surface (couche inférieure de la couche limite planétaire, épaisse de quelques dizaines de mètres en fonction de la rugosité du sol ; Guyot, 1999) et lui donne un profil de température de type adiabatique à proximité du sol. La Figure III.26a montre le RH nocturne moyen mesuré sur l'aéroport de Faaa (Tahiti, années 2001 – 2005) en fonction de V moyen pour les nuits claires (couverture nuageuse moyenne $N \leq 2$). Le fait de sélectionner les nuits claires permet d'exclure les événements de pluie et d'orages présentant à la fois des RH et V élevées.

A Tahiti, un des caractères du climat tropical humide est que des humidités relatives $RH > 70 \%$ élevées sont observables pour V jusqu'à $7,5 \text{ m s}^{-1}$ (mesure à 10 m de hauteur). A titre comparatif, la Figure III.26b présente la même étude effectuée sur le site d'Ajaccio, un site typiquement méditerranéen pour lequel $RH > 70 \%$ n'est observé que pour $V < 4,5 \text{ m s}^{-1}$. Cela correspond bien aux mesures de rosées qui indiquaient une forte décroissance pour $V > 3 \text{ m s}^{-1}$ et une quasi absence d'occurrences si $V > 4 \text{ m s}^{-1}$ (Muselli *et al.*, 2002). La condensation de rosée pour $V > 5 \text{ m s}^{-1}$ (c'est-à-dire pour $RH < 60 \%$ au vu de la Figure III.26b) nécessite un refroidissement de l'ordre de 8°C de la surface du condenseur, ce qui en regard de la puissance de refroidissement de l'ordre de 50 à 100 W m^{-2} ne permet pas d'envisager de hauts rendements de rosée, même avec la mise en place d'un coupe-vent en synergie du condenseur. Dans le cas d'Agadir (Figure III.26c), V n'agit pas comme un seuil de coupure net pour RH . En définitive il est préférable d'étudier pour chaque site la corrélation $RH = f(V)$ pour les pas de temps nocturnes où $N \leq 2$ avant d'envisager la réalisation (ou la plantation) d'un coupe-vent.

Les effets mesurés de la vitesse du vent V interviennent donc dans la valeur du rendement de l'Eq. III.(3) en au moins deux points principaux qui sont le facteur de forme et l'apparition d'un seuil de coupure V_0 .

V_0 peut être déterminé sur certains sites (Ajaccio par exemple) par un abatement de RH au niveau du sol en raison de la force du vent : $RH = f(V)$, facteur limitant dominant propre à chaque site quelle que soit la géométrie du condenseur.

Dans le cas contraire :

V_0 est voisin de $4,0 \text{ m s}^{-1}$ dans le cas d'un condenseur standard 1 m^2 en terrain dégagé et exposé face arrière au vent sur le site de Tikehau.

V_0 peut être sensiblement augmenté par la mise en place de coupe-vents appropriés. L'utilisation de la simulation numérique CFD peut permettre de déterminer par avance la valeur de V_0 pour des configurations sans retour d'expérience à ce jour.

III.3.4 Couverture nuageuse N (Octas)

i. L'influence de la couverture nuageuse sur la condensation de rosée a été succinctement énoncée au paragraphe précédent : la représentation qualitative des profils de T_a au voisinage du sol montre que T_a augmente avec l'augmentation de la nébulosité. En effet, le refroidissement radiatif du sol à l'échelle d'un territoire est diminué par l'effet de serre dû à la couverture nuageuse. RH diminuant avec l'augmentation de T_a , le paramètre $f_N(N)$ sera compris dans la différence $(T_d - T_a) \sim RH$ mesuré au sol.

ii. La couverture nuageuse N est également un facteur limitant majeur de la condensation de rosée par refroidissement radiatif. Cette dépendance des rendements à la nébulosité est bien montrée par les données collectées sur sites. A Tahiti par exemple, les rosées les plus importantes ont lieu principalement lorsque $N \leq 2$ octas (Figure III.27 ab). La distribution des valeurs de nébulosité moyenne durant les nuits de la même période montre une représentation importante des nuits de nébulosité supérieure à 2. C'est pourquoi, même si la fréquence d'événements de rosée est très élevée en Polynésie, le rendement moyen par événement est relativement faible (0,068 mm à Tahiti, Tableau III.4). Cela reflète le fait que le climat tropical est plus humide donnant lieu à de nombreux événements de rosée mais de faible rendement car le refroidissement radiatif est sensiblement diminué par la couverture nuageuse. Une situation identique a été rencontrée sur le site océanique de Pessac (Bordeaux, France) en comparaison des sites méditerranéens (Beysens *et al.*, 2005a).

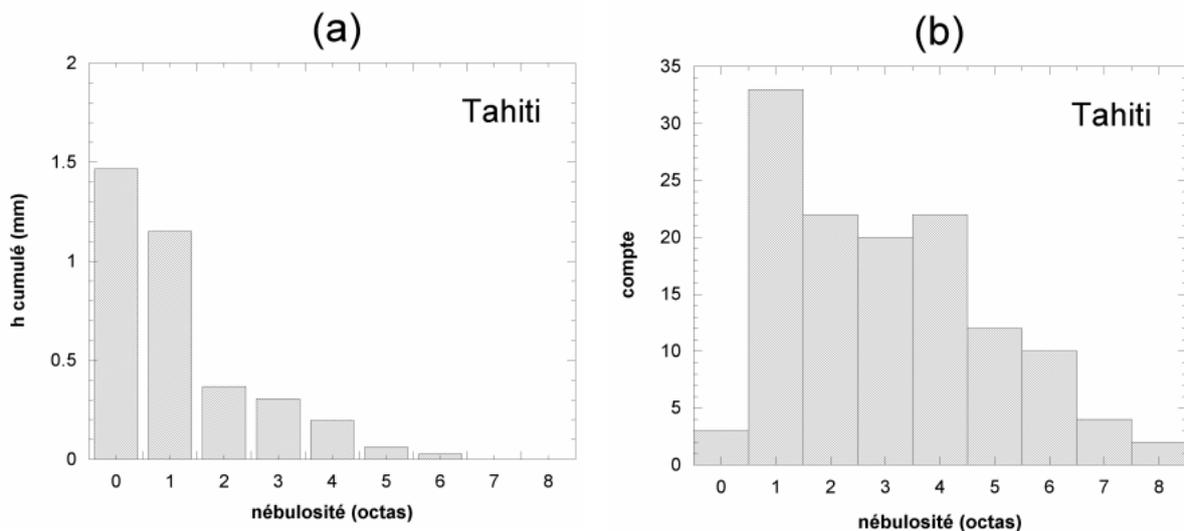


Fig.III.27. (a) Rendements cumulés de rosée sur le site de Tahiti représentés en fonction de la nébulosité moyenne (octas) durant la durée de condensation (obtenues sur le PTFE du 8-6-2005 au 14-10-2005). (b) Distribution des valeurs de nébulosité nocturne moyenne (20:00 - 8:00) durant la même période.

La température de la base d'un nuage (à basse altitude) est voisine de T_a au sol et avec une émissivité de 1 pour les gouttelettes d'eau en suspension, donc le bilan radiatif condenseur - nuage est considéré comme nul (Chapitre I.2). La puissance de refroidissement (proportionnelle au rendement de rosée) est donc généralement pondérée par le facteur « fraction de ciel clair » (Madeira *et al.*, 2002).

III.3.5 Rayonnement thermique du ciel

Afin d'évaluer la balance radiative réelle pour les grandes longueurs d'onde IR à la surface du condenseur, la radiance globale du ciel a été mesurée par deux radiomètres (décrits au Chapitre I.2.1) installés sur le toit du laboratoire à 5 m du sol. En toiture, leur horizon est dégagé et ils se trouvent à une distance de 20 m du condenseur.

La puissance absolue P_s (W) du rayonnement IR émis par le ciel et reçue à la surface du condenseur ne permet pas une comparaison directe de l'efficacité du refroidissement radiatif car c'est une valeur relative qui dépend de la température ambiante et de l'humidité absolue de l'air. Pratiquement, la puissance de refroidissement P_r qui est la différence entre les puissances radiatives du condenseur et du ciel peut s'exprimer de la manière suivante :

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon_c (T_c^4 - T_s^4) \quad \text{III.(4)}$$

ε_c est l'émissivité du condenseur, T_c la température du condenseur et T_s température équivalente du ciel. T_s se déduit de la loi de Stephan-Boltzmann :

$$T_s = (P_s / \sigma)^{1/4} \quad \text{III.(5)}$$

Dans cette étude, l'émissivité du condenseur est proche de l'unité et le refroidissement est limité à quelques degrés sous la T_a si bien que $T_c \approx T_a$. L'Eq.III.(6) devient:

$$P_r \approx \sigma (T_a^4 - T_s^4) \quad \text{III.(6)}$$

La température équivalente du ciel T_s représente alors la plus basse température que peut théoriquement atteindre le condenseur en l'absence d'apport de chaleur par conduction et convection à sa surface (Berdahl and Fromberg, 1982 ; Garcia, 2002). La différence ($T_a - T_s$) apparaît ainsi comme une grandeur représentative de la puissance disponible pour le

refroidissement radiatif et la condensation de rosée. Selon Martin and Berdahl (1984), un refroidissement radiatif significatif correspond à $T_a - T_s > 15$ K ($P_r > 50$ W/m²).

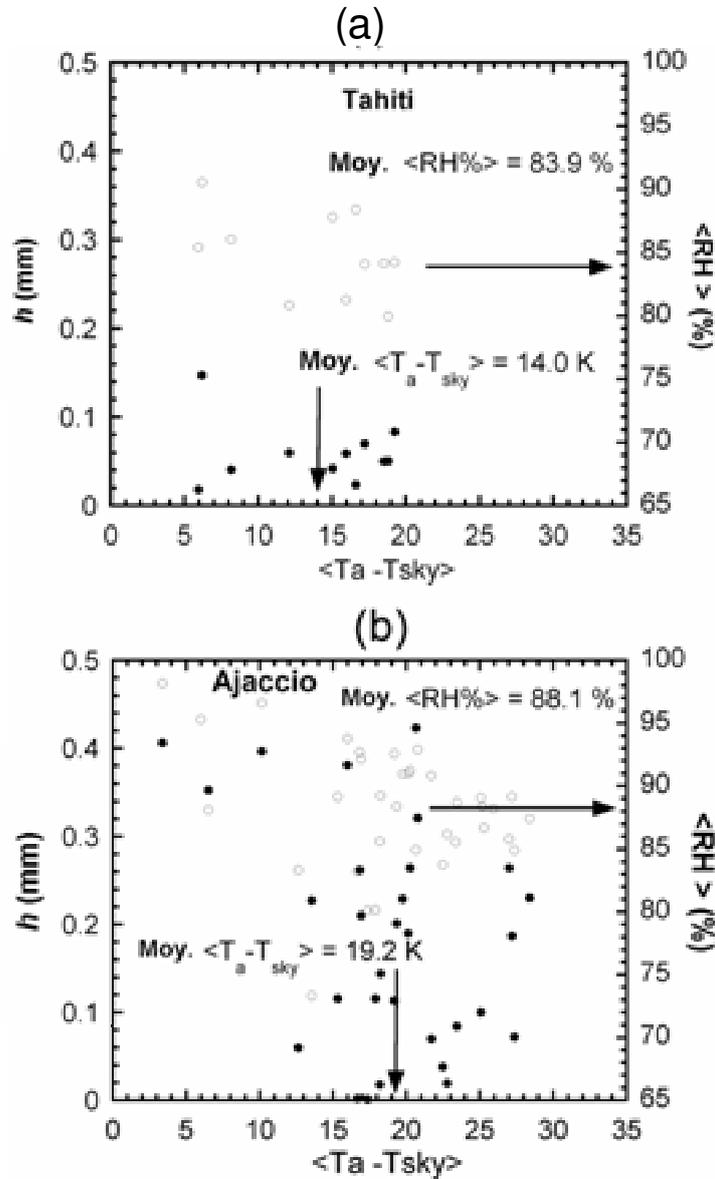


Fig. III.28. Rendements de rosée sur condenseur standard (points noirs, ordonnées à gauche) et humidité relative moyenne $\langle RH \rangle$ (cercles blancs, ordonnées à droite) en fonction de la valeur moyenne (pendant la durée de condensation) de la différence $\langle T_a - T_s \rangle$. (a) Site de l'Université de Polynésie Française (Tahiti), du 14/7/2005 to 14/10/2005. (b) site d'Ajaccio, île de Corse (France), du 20/9/2004 au 3/2/2005.

Sur la Figure III.28a (Tahiti) sont représentés les rendements de rosée ainsi que les humidités relatives RH correspondantes (moyennes durant la période de condensation où $T_c < T_d$, T_c est mesurée sur le condenseur plan type « balance »), en fonction de $T_a - T_s$, proportionnel à la puissance de refroidissement. A titre comparatif, les mêmes grandeurs sont

représentées sur le graphique (Figure III.28b) pour Ajaccio. Il en ressort que les rendements inférieurs obtenus à Tahiti par rapport à l'île méditerranéenne (Ajaccio) sont dus paradoxalement à une quantité d'eau supérieure dans l'atmosphère tropicale. L'effet de serre généré par l'importante humidité absolue de l'atmosphère tropicale empêche le refroidissement radiatif d'être aussi intense qu'en climat méditerranéen. Le $(T_a - T_s)$ moyen durant les événements de rosée est 14,0 K à Tahiti contre 19,2 K pour Ajaccio, ce qui montre bien que la puissance de refroidissement disponible pour la condensation est moindre en Polynésie qu'à Ajaccio pendant la saison de rosée.

Les rendements de rosée sont généralement moitié moins importants à Tahiti qu'à Ajaccio, correspondant donc à une valeur de RH inférieure. C'est la conséquence des différences de distributions et profil de vapeur d'eau dans l'atmosphère pendant les nuits claires. Dans le cas d'une atmosphère tropicale la vapeur d'eau est largement dispersée en haute altitude. Dans le cas d'Ajaccio, la quantité cumulée de vapeur d'eau est inférieure et se concentre dans les basses couches atmosphériques. L'effet de serre est plus faible et le refroidissement radiatif plus important au niveau du sol (Guyot, 1999). En conséquence, RH est plus élevée à Ajaccio pour une différence $(T_a - T_s)$ du même ordre qu'à Tahiti (Figure III.28). Le refroidissement maximal (nuits les plus claires) correspond à des valeurs de RH et donc de T_d inférieures à Tahiti, ce qui nécessite un refroidissement supérieur du condenseur. Cette puissance est perdue pour la condensation de vapeur et les événements de rosée présentent de fait des rendements moins importants bien que l'air soit paradoxalement plus humide.

III.3.6 Brouillard

Il est remarquable que sur le site de Panandhro, un résultat inattendu a été observé sur les quatre condenseurs orientés N, E, S et O. La Figure III.16 montre que les rendements de rosée maximums (événements et cumuls) sont mesurés sur les condenseurs orientés S et O qui font face au vent nocturne dominant. Cela apparaît également sur le Tableau III.3 avec des cumuls de 12,5 et 12,6 mm mesurés sur les condenseurs S et O respectivement. Ces résultats sont en contradiction avec l'ensemble des observations et études théoriques décrites précédemment (Beysens *et al.*, 2003 ; se reporter également au Chapitre II) pour lesquelles les meilleurs rendements étaient obtenus en opposant la face arrière du condenseur au vent dominant afin de réduire la vitesse de l'air le long de la surface de condensation.

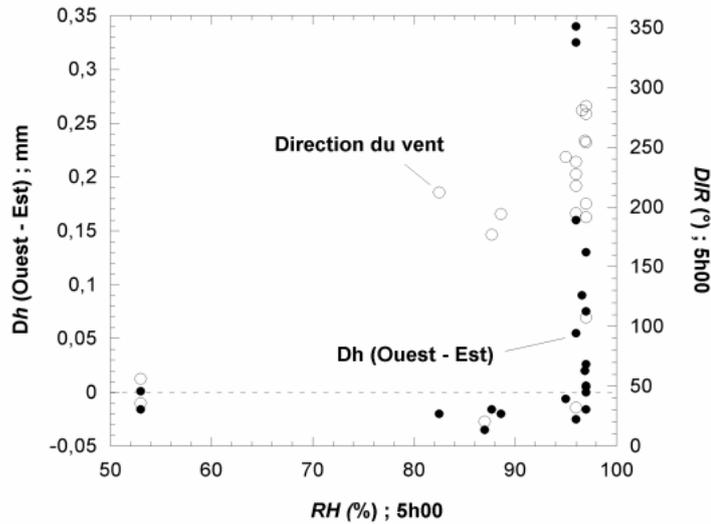


Fig. III.29. Rendements de rosée h (mm) comparés ($h_{\text{Ouest}} - h_{\text{Est}}$) exprimés en fonction de RH (%) à 5:00 du matin (points). Direction du vent Dir à 5:00 (en degrés, cercles)

La contribution du brouillard au rendement global pour certains événements mesurés est une hypothèse avancée pour expliquer ce résultat paradoxal. Sur la Figure III.29, certains événements de rosée ont été mesurés sous RH modérée (entre 80 et 90 %) et une direction du vent SSO (environ 200°). Dans ces conditions, le rendement sur la face Est (dos au vent) est supérieur aux mesures de rosée face Ouest (face au vent) comme il est attendu. Trois mois d'observation sur site permettent de préciser que les événements de brouillard ne sont pas rares à Panandhro. Les valeurs de RH maximales mesurées par la station météo de l'entreprise GEB voisine de 3 km sur l'ensemble de la période de mesure sont de 97 % qui peuvent donc être assimilées à $RH = 100$ % réels, soit à la saturation de l'air et à l'apparition de brouillard. C'est dans ces conditions d'air saturé et toujours pour un vent orienté SO que la comparaison des condenseurs devient favorable à la face Ouest faisant face au vent Figure III.29, les écarts sont alors considérables avec deux mesures ($h_{\text{Ouest}} - h_{\text{Est}} > 0,3$). Cela signifierait alors que la contribution du brouillard peut être importante; le protocole de mesure et d'observation sur place a dès à présent été complété afin de noter ces événements de brouillard.

III.4 Estimation quantitative du rendement de rosée sans mesure physique : application à la toiture de Bisevo

Nous avons vu au Chapitre III.1.3 que les capteurs d'arrosage foliaire sont utilisés pour l'obtention d'un signal binaire : présence (rosée, pluie) ou absence (surface sèche) de condensation ou précipitation sur le capteur. Deux capteurs d'arrosage foliaire ont été installés sur la toiture de Bisevo (voir Figures III.2 ; III.3 et III.7). Le capteur plan (AF1) sera utilisé pour la suite de cette étude afin de traiter le cas le plus général possible. L'objectif de cette mesure est d'obtenir un seuil de coupure expérimental à partir de leur état 0 (pas de condensation) ou 1 (conditions de nébulosité N et de vent V satisfaisantes pour la formation de rosée). Dans ce cas les facteurs limitants en N et V sont remplacés par un facteur binaire $AF_i = 1$ ou 0 avec un pas de temps de 15 minutes dans le cas de la toiture de Bisevo. h_0 est alors le taux de condensation maximum (mm h^{-1}) que peut atteindre ce système. l'Eq. III.(1) s'écrit :

$$h_i = h_0 \cdot f_F(V, Dir) \cdot AF_i \cdot \left(1 - \frac{T_{di} - T_{ai}}{DT_0}\right) \quad \text{III.(9)}$$

$$h = \sum_{24h} h_i \quad \text{si } h_i \geq 0,0 \quad \text{III.(10)}$$

Facteur de forme

La toiture de Bisevo a été modélisée en CFD suivant la méthode décrite au chapitre II pour les valeurs de vent 0,5 ; 1,0 ; 2,0 et 3,0 m s^{-1} et de direction perpendiculaire à la faîtière (voir Figure IV.6). Ces conditions sont considérées comme la référence pour ce système. Le gain en température moyen calculé à partir de la moyenne des températures des deux pentes du toit est donc fixé à $f_F(V ; 0^\circ) = 1$. Les résultats de la simulation pourront éventuellement être ultérieurement extrapolés à d'autres directions de vent Dir grâce à la détermination par simulation de $f_F(V ; Dir)$.

Rendement idéal h_0

La série de données collectées à Bisevo contient plus de 48 400 enregistrements (intervalle de 15 min) pour 190 événements de rosée. La valeur de h_0 est déterminée

graphiquement à partir des valeurs de taux de précipitation horaire (mm h^{-1}) relevées chaque 15 min et classées par ordre croissant (Figure III.30).

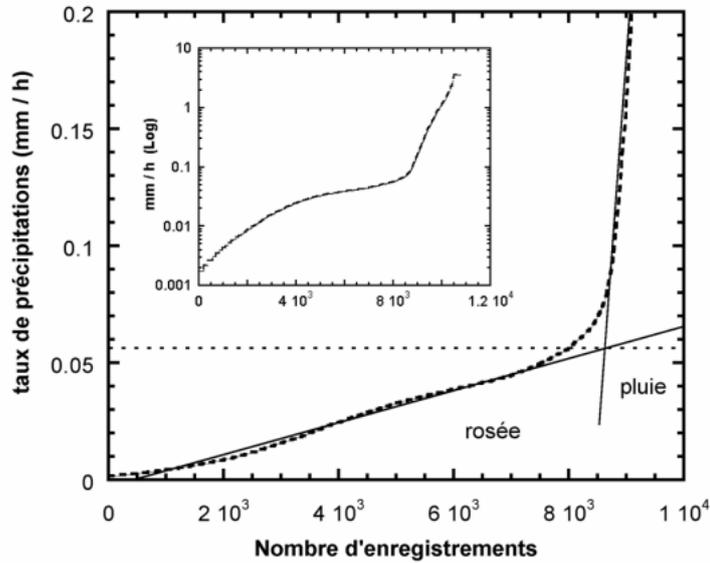


Fig. III.30. Taux de précipitation horaire mesuré à Bisevo du 16/06/05 - 31/08/06 (toutes précipitations). (insert), Vue d'ensemble en ordonnées logarithmiques. La date du 16-06-05 correspond à l'installation du transmetteur de données AF.

La variation de pente entre le taux de condensation horaire de rosée et le taux de pluie horaire est très marquée. Le point d'intersection des droites extrapolées de chacune des deux tendances de la courbe (rosée majoritaire puis pluie) donne le taux de condensation maximal $h_0 \approx 0,055 \text{ mm h}^{-1}$.

Détermination de DT_0

La valeur $DT_0 = 6,4 \text{ }^\circ\text{C}$ est le refroidissement radiatif maximal observable sur la toiture et donnant lieu à la formation de rosée. DT_0 est obtenu graphiquement sur la Figure III.20. La Figure III.31 compare les résultats simulés selon les Eq. III.(6) et III.(7) avec les mesures physiques. Les événements de pluie sont exclus grâce aux enregistrements du pluviomètre automatique.

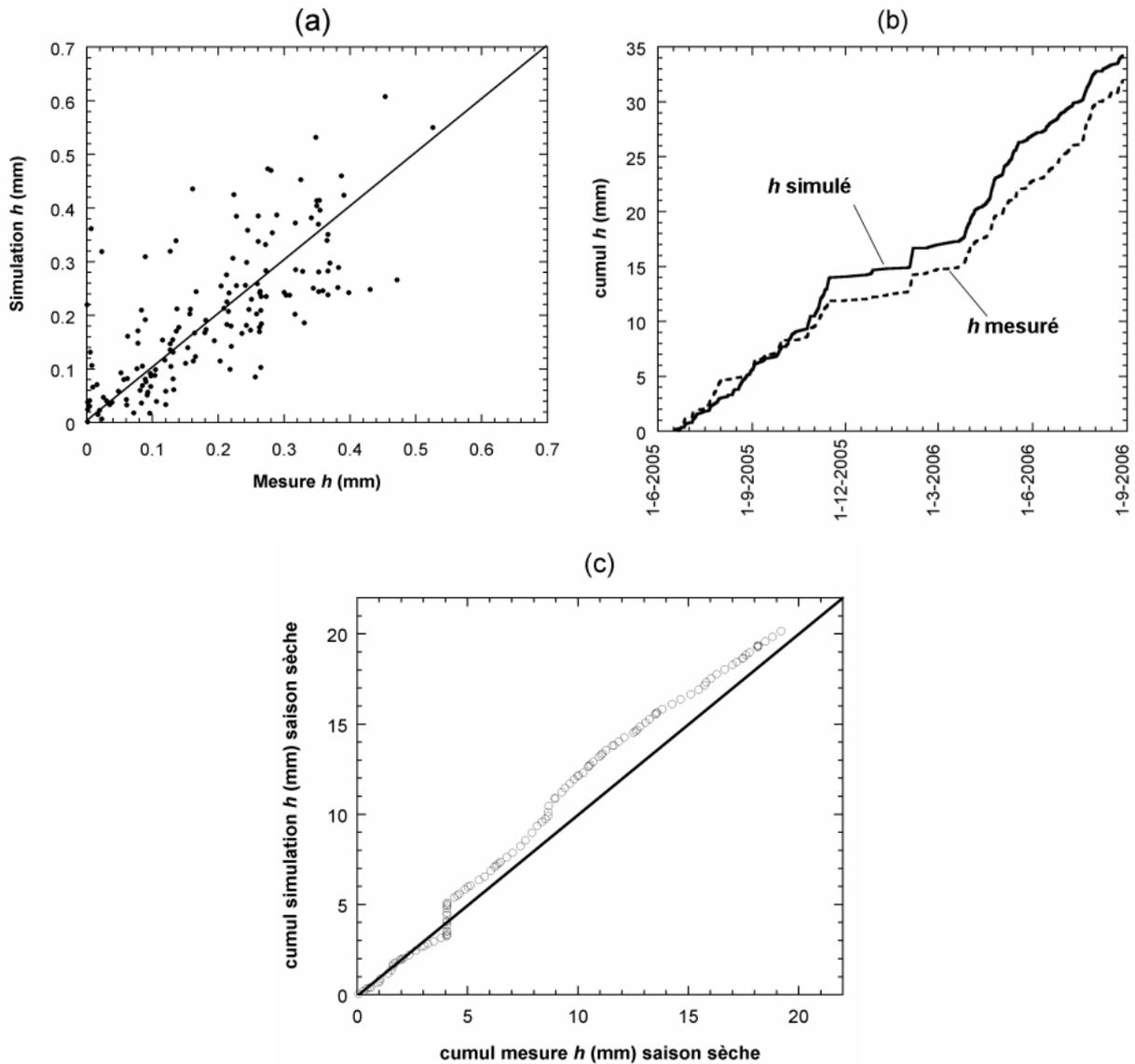


Fig. III.31. (a) Distribution des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées. (b) cumuls comparés des volumes simulés et mesurés sur l'ensemble de la période du 16/6/2005 au 31/8/2006. (c) idem pour les mois de saison sèche du 16/6/2005 au 30/9/2005 et du 1/5/2006 au 31/8/2006 en fonction de la disponibilité des mesures AF.

La Figure III.31 compare les résultats simulés avec les enregistrements des volumes d'eau condensée. La comparaison par événement (a) montre des écarts importants sur les valeurs individuelles. Cependant, compte tenu de la simplicité des paramètres utilisés (T_d ; T_a ; AF), il est remarquable que les ordres de grandeurs soient respectés avec des maxima peu éloigné de la bissectrice et un nuage de point équilibré de part et d'autre de l'axe de symétrie. Les cumuls sont plus représentatifs. Le graphique (b) montre pour 441 jours de mesure une évolution parallèle des valeurs cumulées de simulation et de mesure avec un écart de 7 % en faveur des simulations en fin de période (Tableau III.5). Il est toutefois possible de

différencier la saison sèche de la saison hivernale. Des mois 11/2005 à 4/2006, les simulations surestiment sensiblement les rendements de rosée. Le graphique (c) compare les cumuls de mai à septembre (saison sèche). La corrélation est très bonne et les simulations ne surestiment la ressource que de 5 % pour un total de 122 événements de rosée. Cela s'explique par la prévalence en été d'événements de rosée plus courts mais de grande amplitude due à une grande clarté de ciel. Ici, le comportement binaire du capteur AF est bien adapté au ciel clair. Durant l'hiver, les rosées sont très longues (jusqu'à 16 h pour le maximum du 02/02/06) mais avec une couverture nuageuse non négligeable et donc d'intensité moindre. Le capteur AF binaire surestime largement les valeurs dans ce cas.

180 jours de rosée 16/6/05 – 31/8/06	Simulation AF1	Mesures physiques
rosée (cumul, mm)	34,2	31,9
Déviaton à la mesure Physique (%)	7 %	0 %
Rosée Max. (mm)	0,607	0,526
Rosée moyenne (mm/événement)	0,183	0,168
Ecart type	0,130	0,124
Saison sèche (mai – septembre)		
rosée (cumul, mm)	20,2	19,2
Déviaton à la mesure Physique (%)	5 %	0 %
Rosée Max. (mm)	0,414	0,472
Rosée moyenne (mm/événement)	0,165	0,167
Ecart type	0,103	0,125

Tab. III.5. résultats de la simulation comparés aux mesures physiques

La simulation des rendements de rosée grâce aux données (T_d ; T_a ; AF) permet de s'affranchir des données N et V tout en donnant des résultats cumulés avec une surestimation de 7 % sur la période et seulement de 5 % pour la saison sèche. Cela peut être un atout important pour estimer la ressource de zones très reculées où les mesures de nébulosité ne sont pas disponibles et où l'installation d'un condenseur apparaît difficile.

QUATRIEME PARTIE

IV QUATRIEME PARTIE :

Systèmes innovants pour l'exploitation de la ressource rosée à grande échelle : toitures, usine à rosée

Les travaux exposés plus avant permettent de faire de la rosée une ressource alternative en eau potable effective pour certaines populations.

- la première avancée est technologique avec la formulation de matériaux radiatifs dédiés à la condensation passive de vapeur d'eau atmosphérique (films thermoplastiques et peintures). Un brevet devrait vraisemblablement clôturer cette phase de développement.
- le second moyen est la mise en place d'un outil de simulation numérique de la thermodynamique complexe des condenseurs radiatifs. Cet outil permet d'optimiser l'efficacité de condenseurs de grandes surfaces et de formes complexes.

Ces efforts ont abouti à l'installation de deux condenseurs de rosée produisant une ressource complémentaire pour des populations installées. Du fait de leur mise au point rationalisée scientifiquement, les condenseurs installés au cours de cette thèse constituent incontestablement une première mondiale en la matière.

- le premier système est une toiture de démonstration de 15,1 m² installée par nos soins en Croatie sur l'île de Biševo en mer adriatique (Beysens *et al.*, 2007a).
- le second est une usine à rosée réalisée par le Pr. G. Sharan (Indian Institute of Management, Ahmedabad, état du Gujarat, Inde) avec l'aide de notre expertise. La surface actuelle est de 850 m² et elle sera étendue prochainement à 15 000 m² pour produire jusqu'à 5 m³ d'eau pure par nuit. Deux autres systèmes sont en construction et cette technologie essaime dans cette région aride.

IV.1 Toiture de démonstration (Biševo, mer Adriatique)

Les sites choisis pour l'implantation de ce démonstrateur innovant ne doit rien au hasard. L'installation de ce condenseur à grande échelle a fait l'objet dans un premier temps d'une étude de potentiel sur des condenseurs standard de 1 m² (Mileta *et al.*, 2004). Dans le cas de Biševo, un condenseur était en place depuis 2003 sur la station météorologique de Komiža (5 km à vol d'oiseau, voir la carte, Figure III.12a). La population locale était bien au courant des rosées abondantes, favorisant la croissance des capriers. Nos mesures physiques des rendements de rosée ont confirmé le potentiel du site.

Le site de Salbunara Bay, le contexte de travail, les conditions météorologiques rencontrées ainsi que les mesures du potentiel de rosée ont été détaillées au chapitre III.1.2. Il convient toutefois de décrire plus avant le contexte humain et les ressources disponibles localement afin de mieux appréhender l'enjeu que représentent ces nouvelles techniques pour les centaines d'îles de la côte Dalmate. Compte tenu des complications entraînées par le montage en un lieu reculé d'un démonstrateur et de son système de mesure associé, trois facteurs principaux ont entraîné le choix de l'île de Biševo.

i. Situation géographique

Biševo est située dans le prolongement de l'île de Vis. Cette dernière est quotidiennement desservie par Ferry depuis le port de Split. Salbunara Bay (Biševo) est située à 5 km de mer du petit port de pêche de Komiža (Vis). La traversée s'effectue en environ une heure en « bateau-bus », ou « pruga-Bisevo », sorte de barque à moteur couverte de 36 pieds.

ii. Collaboration et support de démonstration

Un collaborateur local de l'Institut de Météorologie et d'Hydrologie de Croatie (MHIC, Zagreb, Croatie), Zivko Jonzic, est l'un des 14 habitants quasi-permanent de l'île. Il a mis à disposition le toit d'un cabanon situé à Salbunara Bay, tout proche de son habitation personnelle.



Fig.IV. 1. Cabanon à Salbunara Bay, NO de Biševo montrant le toit de 15,1 m² dans son état initial.
(Photo D. Beysens).

iii. Ressource en eau

La raison principale pour équiper un toit à Biševo est l'absence totale d'eau douce sur cette île de 5,84 km² et donc de l'intérêt particulier de la population pour l'installation du démonstrateur. Biševo (littéralement "le roc mangé par les vers") est l'une des quatre îles Dalmates composées de sable recouvrant une base géologique de calcaire fissuré (karsts). Bien que la pluie y soit abondante de Octobre à Février, la structure du sol ne retient pas l'eau d'infiltration. Cet environnement aride détermine l'écosystème de l'île : peu d'insectes, pas de mammifères sauvages, une profusion d'oiseaux dépourvus de prédateurs, le tout dans un paysage méditerranéen sec.

La présence humaine est possible du fait d'une pratique économe des ressources pluviales, tant pour la consommation que pour la culture des vignobles (il y aurait eu jusqu'à 300 habitants il y a moins de 50 ans). La Figure IV.2 montre une toiture (a) et différents types d'impluviums dispersés pour un usage agricole (bcd). A Salbunara Bay, la réserve d'eau disponible pour un couple en début de saison sèche est d'environ 30 m³. En conséquence, les habitants ont une longue culture de l'économie de l'eau ; la consommation d'eau quotidienne par personne étant comprise entre 10 et 25 L/hab./jour, soit à peine plus du minimum vital sur de longues périodes préconisé par l'OMS (WHO and UNICEF, 2005). De nos jours, avec une consommation quotidienne (sans douche) de 60 L par visiteur, le tourisme estival entraîne une pression importante sur la ressource en saison sèche et il est parfois nécessaire d'acheminer des bouteilles d'eau douce par bateau à partir de l'île de Vis.

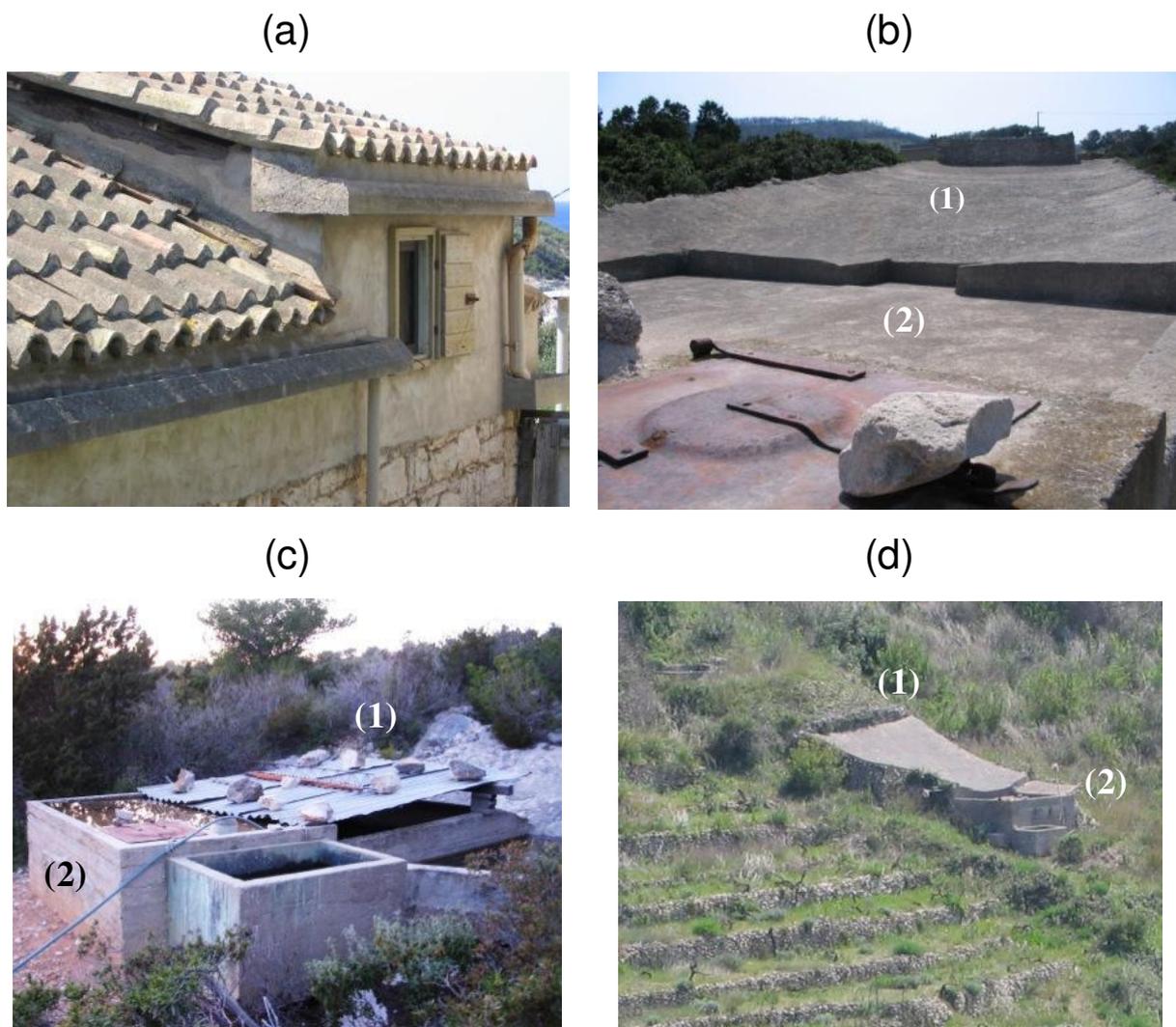


Fig. IV. 2. Chaque m² de toiture est équipé de gouttières de récupération s'écoulant dans des citernes maçonnées (a); des impluviums rustiques constitués d'amas de pierre cimentés en surface (1) collectent l'eau en des citernes (2). De tels systèmes alimentent les hameaux (b) ou les vignobles (c), (d). (Photo O. Clus)

Au-delà de la simple évaluation locale de la ressource rosée rapportée à la pluviométrie (chapitre III.2), l'objectif de cette toiture de démonstration est de montrer la réalité de cette ressource rosée hors protocole scientifique (qui resterait imperméable aux populations locales). C'est pourquoi il a été décidé d'avoir recours à un matériau de toiture disponible dans le commerce. Ce matériau a été choisi avec soin afin de satisfaire aux conditions optimum pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique. Cette expérience est la première application d'un matériau commercial spécialement sélectionné pour son émissivité IR, sa réflectance en UV-Vis-PIR et ses propriétés de mouillage (hydrophile).

IV.1.1 Sélection du matériau commercial

Les matériaux polymères semblent de loin les plus prometteurs pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique en raison de leur grande émissivité IR. Par ailleurs, ils sont généralement fins ce qui leur confère une faible inertie thermique. Une large recherche auprès de nombreux fabricants a permis de retenir 13 matériaux prometteurs et d'en obtenir des échantillons (LDPE ; PE ; PVC ; PC ; PMMA ; PTFE, sous forme de films, membranes tramées, plaques extrudées...).

i. Tests optiques

Les propriétés optiques de chacun de ces matériaux ont été mesurées sur deux spectromètres suivant la méthode utilisée pour la formulation de films et peintures radiatifs (chapitre I.4.1). L'émissivité intermédiaire ε^* a été déterminée ainsi que la réflexion solaire R_{sol} . Les matériaux les plus prometteurs se sont avérés être des plaques de polycarbonate (PC). Le premier est le PC « Suntuf Plus » transparent dans le visible d'épaisseur 0,8 mm traité antibuée en face interne (PALRAM). Il s'agit d'une onde « Omega » dont l'émissivité IR est de 0,949. Sa transparence dans le visible impose de mesurer la réflectance solaire du composite PC plus son isolant (Polystyrène expansé de 3 cm d'épaisseur). Le composite a alors $R_{sol} = 0,84$. Le second matériau retenu est un PC MAKROLON alvéolaire (multi-wall) de 10 mm d'épaisseur en deux alvéoles et traité antibuée en face interne (procédé BAYER). La face externe mesure 0,6 mm avec une émissivité IR de 0,943 (R_{sol} ne peut pas être mesurée de manière satisfaisante sur le PC alvéolaire). Ces mesures ont été effectuées à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) au cours des travaux de thèse.

ii. Tests en conditions réelles

Les matériaux PC sont intéressants car conçus pour l'usage en toiture. Ils sont par ailleurs autorisés pour la mise en contact avec des produits alimentaires et sont bien moins nocifs pour l'environnement que d'autres matériaux également très répandus tels que les PVC chlorés. Les PC ondulés et alvéolaires transparents dans le visible présentent tous deux l'avantage d'être traités « anti-gouttelettes » ou « antibuée » en face intérieure. Cela signifie qu'un traitement rendant la surface hydrophile permet d'observer une condensation de type film qui

conserve la transparence du matériau (se rapporter au chapitre I.1). Afin de bénéficier de ce caractère hydrophile, les toitures seront donc installées à l'envers par rapport à leur usage habituel, surface intérieure face au ciel. Il est cependant à prévoir que la dégradation au rayonnement UV sera accélérée.

De septembre 2004 à mars 2005, trois condenseurs standards 1x1 m² côte à côte et calibrés par le même film radiatif (produit par OPUR) ont été utilisés afin de comparer l'efficacité des matériaux (Cf. Figure III.12a). La comparaison des températures de surface sur la Figure IV.3a montre que le PC alvéolaire plan qui a une surface développée par m² de toiture inférieure au PC ondulé (onde Oméga) est plus efficace pour des vitesses de vents inférieures à 2,8 m s⁻¹ à 10 m. En effet, sa température mesurée est inférieure, ce qui assure un taux de condensation horaire plus important. Les mesures physiques sur la période du 25-01-2005 au 10-02-2005 montrent que le PC alvéolaire plan a condensé 7,0 % de rosée supplémentaire.

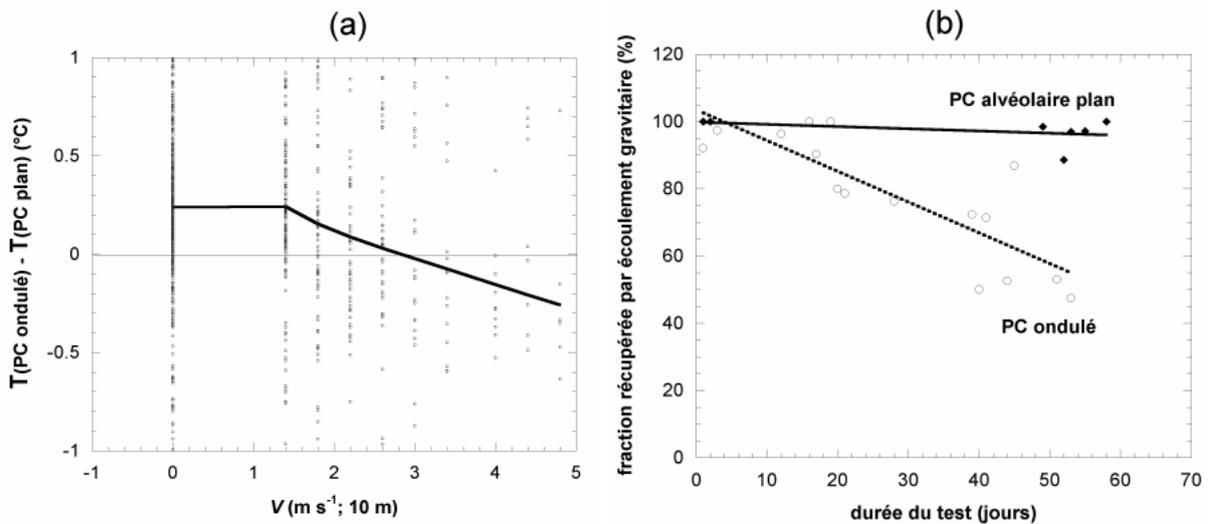


Fig.IV.3. (a) Différence des températures mesurées en surface : $T(\text{PC ondulé}) - T(\text{PC alvéolaire})$ en fonction de la vitesse du vent mesurée à 10 m. Seules les nuits claires sont considérées du 25-01-2005 au 10-02-2005 (13 occurrences). Trait plein, courbe pondérée à 50 %. (b) Evolution du pourcentage d'eau condensée récupérée par écoulement gravitaire (avant radage).

L'évolution dans le temps du pourcentage d'eau condensée récupérée par écoulement gravitaire (Figure IV.3b) montre la résistance du traitement hydrophile « anti-buée » lorsqu'il est utilisé contre nature, à savoir la face intérieure exposée au soleil et aux intempéries. Sur environ 50 jours, le traitement « no drop » Bayer, appliqué par projection de solvant plus additifs minéraux fonctionnalisés, s'avère plus résistant. Après 50 jours, près de 95,3 % d'eau

est toujours récupéré par simple gravité. Dans le même temps, le tensio-actif pulvérisé à chaud en sortie de l'extrudeuse du procédé Palram ne permet plus que la récolte de 55,2 % d'eau par gravité. En conséquence, le PC alvéolaire plan, bien que d'un coût élevé, 20 € m⁻², a été retenu pour équiper la toiture de Biševo, associé à 40 mm de polystyrène expansé comme isolation. Une plaque identique de 1 m² de surface a été exposée en extérieur à Ajaccio, de latitude comparable (Biševo: 43° N; Ajaccio: 42° N) afin de suivre en temps réel la tenue du traitement hydrophile et la résistance du PC aux UV. La Figure IV.4 montre l'installation en toiture d'un tel matériau.

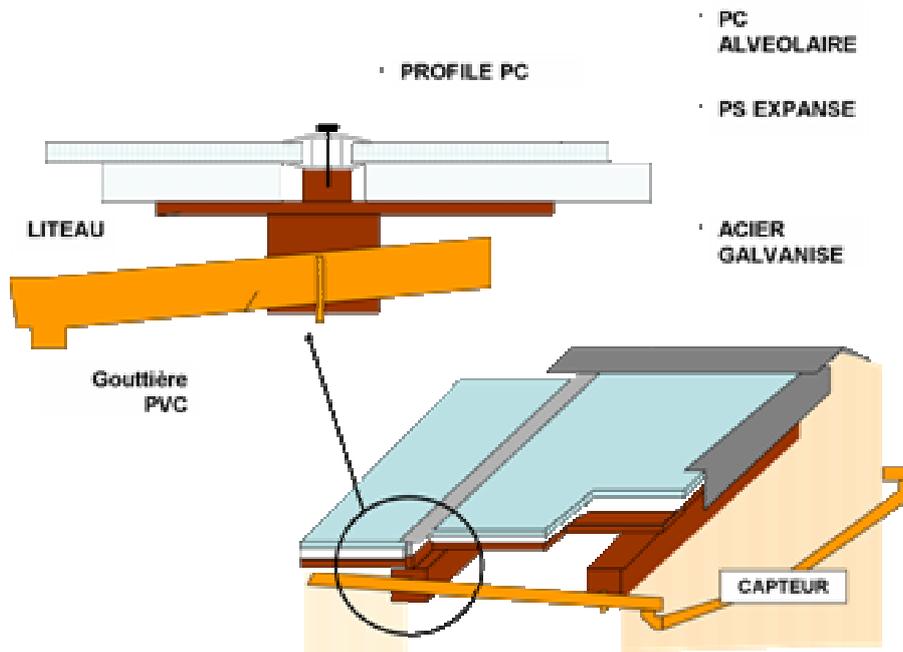


Fig. IV.4. Installation du PC alvéolaire en toiture.

IV.1.2 Simulation numérique du condenseur de Biševo

La toiture présente deux pentes symétriques inclinées à 24,5° (voir Figure IV.1), ce qui induit des écoulements thermodynamiques différents des condenseurs plans standard de 1 m² couramment utilisés. Ces écoulements varient en fonction de la température de surface et du vent. Bien que la géométrie du système ne soit pas modifiable pour l'installation, la méthode de simulation numérique CFD développée au cours de ce travail (chapitre II) a été appliquée à la toiture. L'idée n'est donc pas d'améliorer la forme du système mais plutôt d'estimer par anticipation un ordre de grandeur de l'efficacité à attendre par rapport aux systèmes connus. Pour cette raison, un seul cas est traité (vent perpendiculaire à la faîtière) pour des vitesses de

vent de 0 à 3 m s⁻¹ à 10 m de hauteur. La Figure IV.5a montre les régions du toit (vert) dont la température est inférieure à la température de rosée.

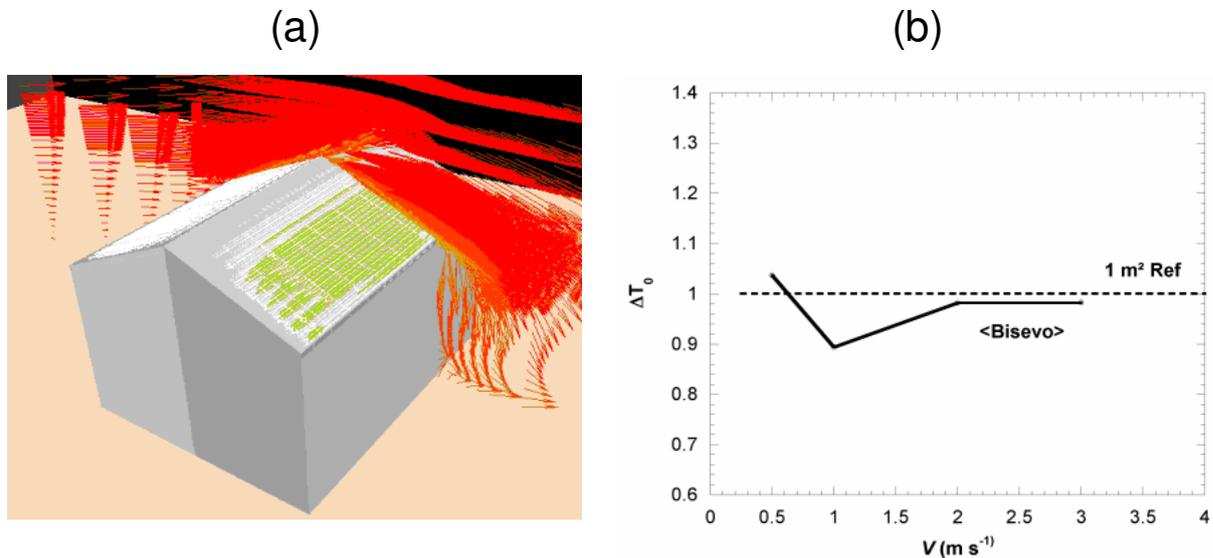


Fig. IV.5. (a) simulation 3D de la distribution des températures montrant (vert) les zones refroidies sous la température de rosée (pour $T_a = 15^\circ\text{C}$ et $RH = 80\%$). Les vecteurs représentent les flux d'air localisés, le vent en entrée est de 0.5 m s⁻¹ à 10 m. Le vent souffle de la gauche vers la droite de la figure. (b) Gain en température ($\Delta T_0 = (T_c - T_a)/(T_{ref} - T_a)$) ; se reporter au Chapitre II) simulé pour le condenseur de Biševo. T_c considérée est la température moyenne du toit pour les deux faces.

Le gain en température montre que les rendements de rosée sur cette toiture réelle devraient être très proches de ceux observés sur un pilote standard de 1 m² dans des conditions météorologiques équivalentes. Une baisse de rendement n'excédant pas 10 % est détectée pour des vitesses de vent de l'ordre de 1 m s⁻¹. Ce léger affaissement d'efficacité apparaît sur la plage (1 à 2 m s⁻¹) sur laquelle le condenseur de référence exposé dos au vent est sous l'influence d'un vortex de recirculation du même ordre de grandeur que la convection libre. Il est donc possible que l'écart observé soit à imputer qualitativement au comportement thermodynamique du condenseur de référence (Cf. chapitre II).

IV.1.3 Installation de la toiture

La toiture et l'instrumentation associée a été installée du 3 au 23 avril 2005. L'ensemble des opérations consistait en l'acheminement de l'ensemble du matériel (toiture, acquisition de données et outils), la mise en place de la toiture, l'installation de l'acquisition de données et de l'intégration de l'expérience dans l'environnement humain du hameau de Salbunara Bay.

L'installation mobilisa trois personnes, V. Nikolayev durant la phase initiale (équipe mixte CEA-CNRS-ESPCI ESEME), O. Clus (université de Corse) et un habitant, Pavaž Marinkovič, rémunéré par le MHIC pour la durée de la mise en place.

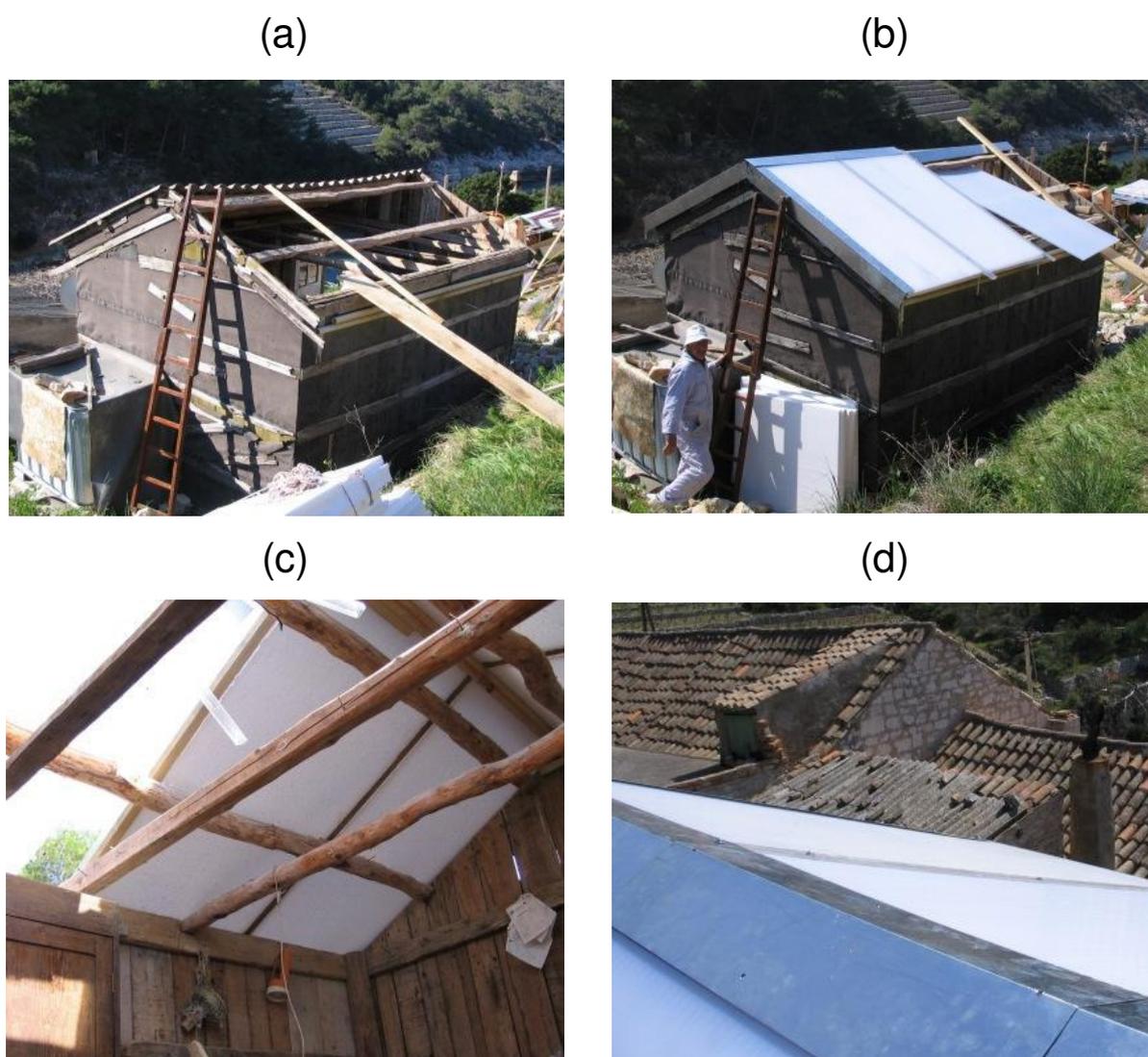


Fig.IV.6. (a) Démontage de l'ancien fibrociment ; (b) installation des nouvelles plaques de polycarbonate ; (c) positionnement de l'isolation de Polystyrène expansé ; (d) éléments de faîtière en acier galvanisé. (Photo O. Clus)

La Figure IV.6 montre les différentes étapes de l'installation du condenseur en toiture. La première étape (a) fut de démonter l'ancienne couverture de fibrociment. Ensuite, la charpente a été rénovée et consolidée avant de mettre en place la couverture isolante (Polystyrène expansé) plus PC alvéolaire de 16 mm d'épaisseur (b, c). Les profils d'étanchéité en acier galvanisé (d) ont été posés en dernier en faîtière et sur les arêtes du toit. Le 9 avril, la couverture était en place. La fin du séjour fut mise à profit pour la mise en place des gouttières et de l'ensemble du système de mesure et de sauvegarde des données.

La procédure d'acquisition et de rapatriement des données mise en place spécifiquement pour cette expérience en site isolé (station météorologique, ordinateur de sauvegarde et modem GSM, sauvegarde papier...) a été largement décrite au chapitre III.1. La vue d'ensemble du démonstrateur de Bisevo apparaît sur la Figure IV.7 :



Fig.IV.7. Vue d'ensemble du collecteur de rosée de démonstration en toiture à Bisevo : condenseur, gouttières et station d'acquisition des données. (photo O. Clus).

IV.1.4 Résultats, volumes condensés et ressource en eau

Ce démonstrateur est le premier toit optimisé pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique par refroidissement radiatif. Les rendements détaillés de l'installation ont été donnés et expliqués en détail en fonction des conditions climatiques dans le Chapitre III.2.2, en tant que potentiel de rosée du site. Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons

essentiellement à la ressource d'appoint effectivement disponible pour les habitants lorsque le besoin se fait le plus sentir. La Figure IV.8 illustre la perception qu'ont les habitants de Biševo de la ressource rosée grâce à ce démonstrateur de 15.1 m². Tandis que les condenseurs standard 1 m² nécessitent un effort particulier d'imagination pour rapporter la ressource à une toiture réelle, le démonstrateur permet aux habitants d'apprécier de manière tangible l'apport que peut constituer cette ressource en période de sécheresse grâce à un système simple et fiable (pas de panne possible).

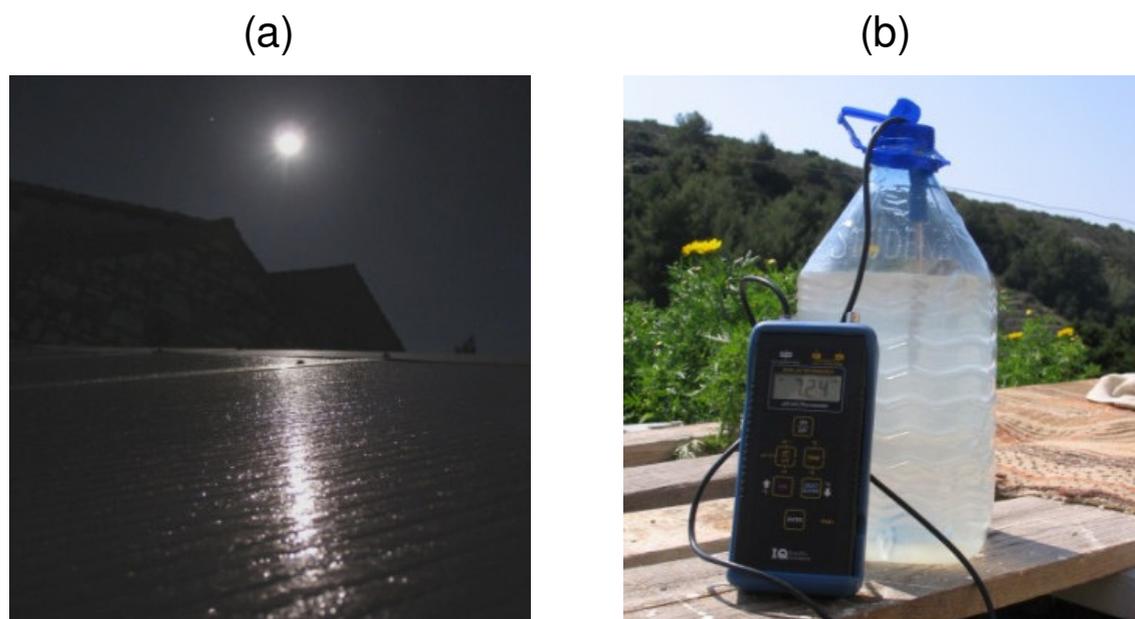


Fig. IV.8. Événement de rosée courant à Biševo : (a) condensation nocturne et écoulement continu dès 20 h sur le toit ; (b) mesure du pH pour environ 4,5 L de rosée condensée sur 15,1 m² dans un bidon de 5 L le 19 avril 2005. (photo O. Clus)

Si l'on s'en tient à la saison sèche (avril à septembre) qui est la période durant laquelle la pénurie peut se faire sentir, l'étude de potentiel (chapitre III.2.2) donne des événements de rosée de rendement moyen 0,181 mm (années 2005 - 2006), correspondant à une ressource de presque 0,1 mm/jour.

La Figure IV.9a montre les ressources pluie et rosée cumulées (en L) sur la saison sèche. Les valeurs sont les événements moyens obtenus sur 258 jours (01/05/05 – 30/09/05 et 01/05/06 – 31/08/06). La courbe de rosée montre une production relativement régulière tout au long de la saison y compris pour les mois 08 et 09 pour lesquels les événements de pluie se font très irréguliers et qui correspondent à la période pour laquelle la probabilité que les citernes soient vides est maximale. La condensation totale de rosée est d'environ 160 L à la fin septembre (cumul sur la saison sèche, Figure IV.9a) et un foyer de Biševo dont la citerne

serait au niveau du trop plein début avril pourrait disposer de 10 % de ressource hydrique en plus une année normale (pas de sécheresse) grâce à une toiture à condensation passive.

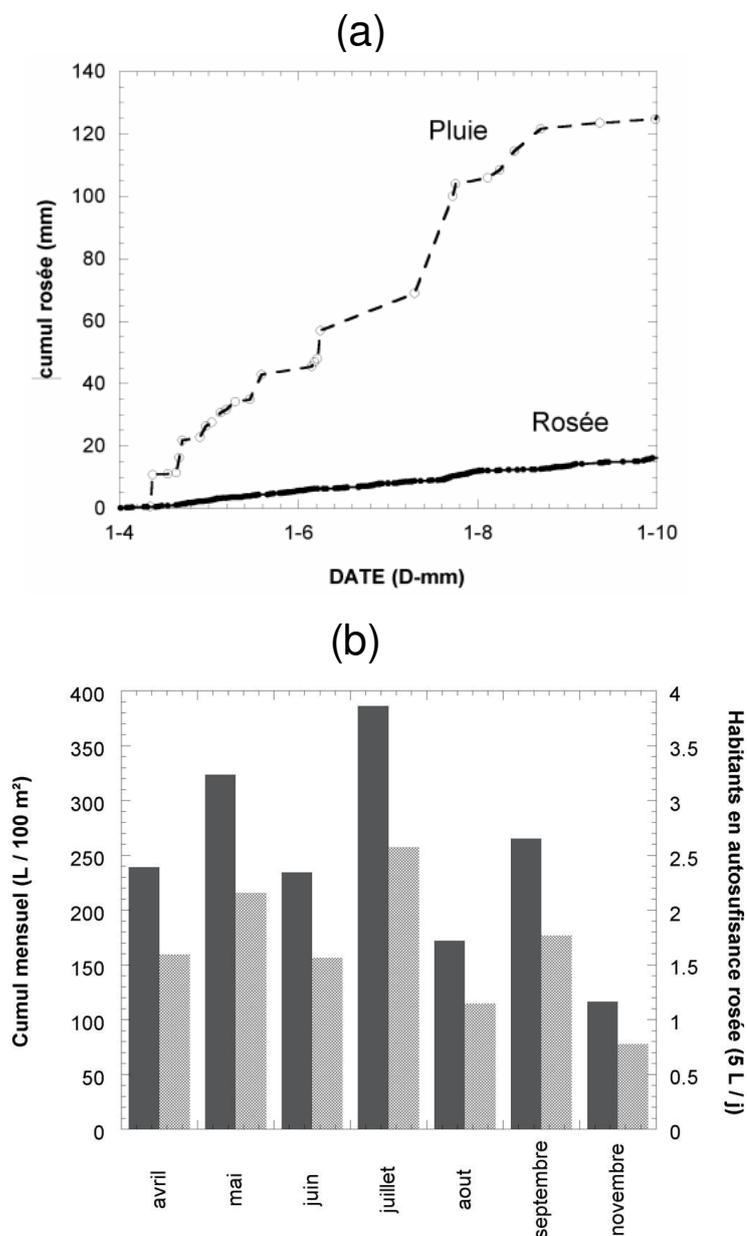


Fig. IV.9. (a) comparaison des ressources cumulées rosée et pluie pour deux saisons sèches (valeurs moyennes, années 2005 et 2006) ; (b) production mensuelle pour une toiture de même type et de surface 100 m² (habitation réelle). Gris foncé : cumul mensuel (L) ; gris clair : nombre de personnes pouvant vivre grâce à la seule ressource rosée (5 L/jour/personne) grâce à cette toiture.

La Figure IV.9b donne la ressource rosée qui serait produite par une toiture de 100 m² identique à celle du démonstrateur pour les potentiels mesurés au cours de cette expérience. Par rapport aux standards de l’OMS (vie, 5 L/jour/personne ; survie, 2 L/jour/personne), les histogrammes gris clairs montrent qu’en cas de sécheresse totale, une telle toiture peut

produire 100 % de la consommation quotidienne d'un couple d'adultes et pourrait permettre à une famille de 5 personnes de survivre sans ravitaillement extérieur.

IV.1.5 CONCLUSION

Il y a plusieurs années, Pavao Marinković (Figure IV.10) a peint son toit afin de limiter la rétention d'eau par les tuiles romaines poreuses lors de petites averses. Le propriétaire avait pu ainsi observer la condensation de rosée qui, sans cela, aurait été absorbée ou se serait évaporée au lever du soleil. Cette anecdote illustre à quel point la population locale est sensible à la moindre ressource supplémentaire d'eau douce pouvant faciliter le quotidien sur ces îles arides.

L'accueil du condenseur de démonstration a donc été très favorable, sa réputation de « première mondiale » dépassant rapidement le petit territoire de Biševo pour gagner les îles voisines, par la rumeur aussi bien que par la presse. Les habitants sont très favorables à l'utilisation de peintures radiatives incolores dans le visible telles que celles développées au cours de ce travail (chapitre I.2) qui leur permettraient de conserver l'aspect visuel de leur patrimoine insulaire. La surface hydrophile de nos peintures expérimentales est nécessaire à l'écoulement gravitaire de l'eau condensée sur ces toits à faible pente ; par ailleurs, la possibilité pour les habitants d'équiper eux même leurs toitures par une simple mise en peinture permettrait une diffusion rapide de cette technologie. (Une étude sociologique est en cours à l'Université de Split).



Fig.IV.10. Toit de tuiles romaines de terre cuite typique des maisons construites sur la côte dalmate.
(photo O. Clus)

IV.1.6 Projet de démonstrateur « type Bisevo » en Polynésie Française

Le partenariat de recherche liant l'U. de Polynésie Française avec l'U. de Corse et le CEA sur la période avril 2004 - novembre 2005 avait pour but l'évaluation de la ressource rosée en climat tropical et spécifiquement dans l'archipel des Tuamotu (Figure IV.11). L'étude détaillée des mesures physiques de rendements en fonction des paramètres environnementaux (météorologiques et radiatifs) a été longuement détaillée aux Chapitres III.1 et III.2. Les résultats en terme de rendement ainsi que les analyses chimiques de l'eau de rosée effectuées montrent un potentiel intéressant pour la rosée comme ressource d'appoint en eau de qualité pour les atolls de Polynésie Française. Le succès du condenseur de démonstration de Bisevo pourrait inciter à l'équipement prochain d'une toiture sur l'atoll de Tikehau.

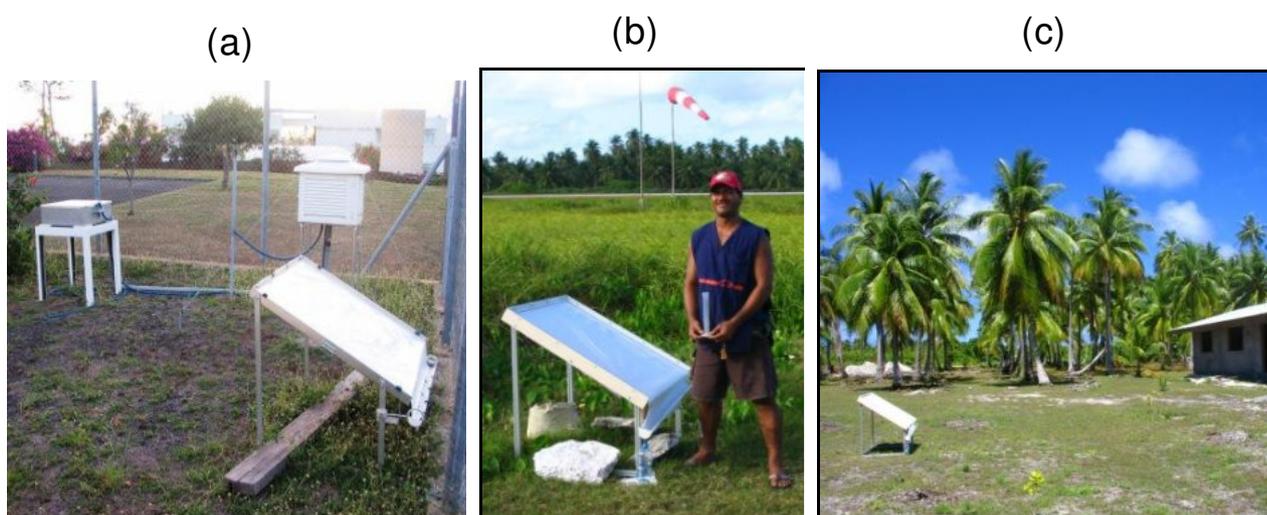


Fig.IV.11. (a) Condenseur standard (1m²) sur le site de l'UPF et instruments de mesure ; (b) Condenseur de Tikehau-1 (aérodrome) ; (c) Condenseur de Tikehau-2 (dairière).
(photo O. Clus)

i. Qualité des eaux de rosée et pluie

Des analyses chimiques et biologiques ont été effectuées sur des eaux de pluies et de rosée de l'UPF et de Tikehau (plus de 20 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 (Beysens *et al.*, 2006a ; Muselli *et al.*, 2006c). La Figure IV.12 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 de source commercialisées sur le territoire. Bien souvent, les concentrations sont comprises entre celles de l' « Eau Royale » (plus minéralisée) et celle de l' « Eau Vaimato » (moins minéralisée).

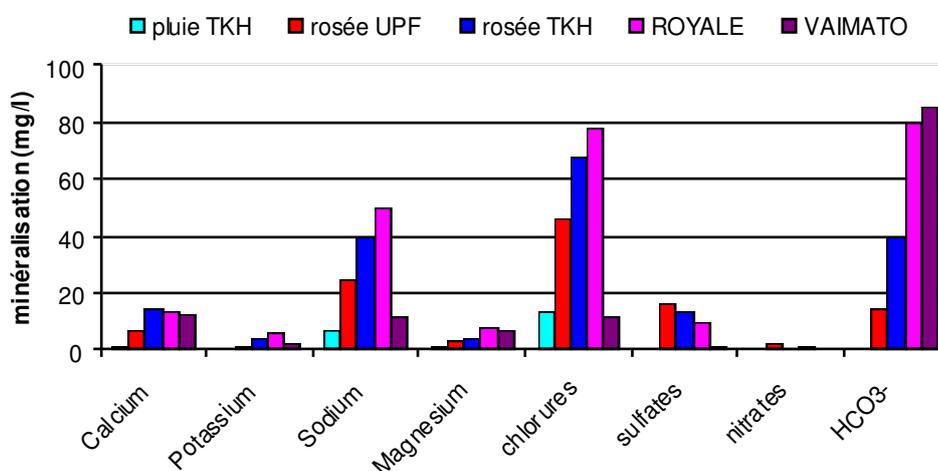


Fig.IV.12. Vue d'ensemble de la minéralisation analysée sur des échantillons de (de gauche à droite) : Pluie (Tikehau) ; rosée (UPF) ; rosée (Tikehau) ; eau « Royale » ; eau « Vaimato ».

La rosée de Tikehau est légèrement plus minéralisée (dépôts d'aérosols marins et de CaCO₃ issu des dépôts de résidus calcaires coralliens). Bien que plus concentrée en nitrates, la rosée de l'UPF reste cependant bien en deçà des 25 mg L⁻¹ autorisés. 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 montre une très faible minéralisation des eaux de pluie consommées actuellement dans les Tuamotu, phénomène qui a dû s'accroître avec l'avènement des citernes plastiques (non échangeuses d'ions). La ressource rosée est donc d'une qualité tout à fait intéressante pour la consommation humaine, notamment comparée à l'eau d'origine pluviale qui est habituellement consommée par la population des atolls.

ii. Evaluation quantitative de la ressource rosée en Polynésie Française

La saison sèche 2005 s'étant montrée très pluvieuse, les résultats présentés dans le Tableau IV.1 sont 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 (du 18-08-2005 au 11-09-2005).

Les estimations (Tableau IV.1) sont données pour une toiture de type « Fare MTR » (surface standard au sol de 54 m² pour 92 m² de toiture) qui est une maison anticyclonique en kit très répandue en Polynésie française. Ces valeurs tiennent compte des propriétés hydrophiles de surface de la peinture expérimentale qui permettent une récupération des gouttes de rosée 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).

paramètre	Estimation fare MTR 54 m ² habitables à Tikehau avec peinture expérimentale	Données expérimentales toiture Croatie (14/04-10/08)
surface développée en toiture	92 m ²	15,1 m ²
<Vol rosée> moyen par nuit de rosée pour 92 m ²	10,90 L	11,82 L
Vol rosée maximal pour 92 m ²	15,71 L	36,05 L
<Vol rosée> moyen pour 30 jours secs pour 92 m ²	191 L (6,40 L/jour)	279 L (9,30 L/jour)

Tab. IV.1 Estimation des volumes attendus sur un fare MTR de 54 m² équipé, comparés avec une toiture expérimentale existante (Croatie)

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 couverture nuageuse moyenne au matin (4,8) bien supérieure aux données moyennes de Takaroa (atoll distant de 300 km où la couverture nuageuse est enregistrée depuis de nombreuses années ; $N < 3,0$). Il est donc probable que pour une année de sécheresse (par exemple l'année 2004), des événements de rosée aient une intensité largement supérieure (on observe en Croatie des rendements supérieurs d'un facteur deux). 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.

Par ailleurs, 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'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 IR qu'elle reçoit du sol. Nous pouvons donc raisonnablement proposer une appréciation suivante de volumes pour un mois de grande sécheresse:

- 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.
- 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 celle rencontrée à Tikehau lors de ces mesures.

iii. Projet en développement

Les habitants rencontrés sur l'atoll de Tikehau se sont montrés intéressés par ce système pouvant apporter un appoint en eau pendant les périodes de sécheresse mettant en défaut l'autonomie dont ils disposent grâce à leurs citernes, durée qu'ils évaluent grossièrement à 4 mois en rationalisant leur consommation.

En l'état actuel des recherches et dans le but de valider les estimations dans un cas 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 (i) peindre le toit en tôle (92 m²) d'un « fare MTR » dont la situation correspond à celle d'une habitation type des Tuamotu, (ii) y adjoindre des capteurs et un système de rapatriement des données pour étude, sur le modèle de la toiture instrumentée de Bisevo. Une telle installation pourrait avantageusement être installée sur une maison MTR (Figure IV.14), ce qui serait un objectif cohérent avec les objectifs d'un démonstrateur : bonne reproductibilité en raison de la très

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



Fig.IV. 13. (a) Montage d'un fare MTR (Tikehau, 2005); (b) Fare MTR et citerne de stockage des pluies attenante. (photo O. Clus)

IV.2 Usine à rosée dans la région du Kutch (état du Gujarat, Inde)

Un système de collecte des eaux de rosée et pluie à grande échelle a été construit en mars 2006 à Panandro dans la zone semi-aride du Kutch (NO de l'Inde). Il s'agissait de montrer que la condensation de rosée pouvait s'avérer une ressource en eau complémentaire. Une première campagne préliminaire de mesures sur le site a été effectuée dès le début de la saison sèche (192 jours de octobre 2005 à mai 2006) avec 4 condenseurs standard de 1 m² à 30° (voir Figure III.16b). Les rendements mesurés sont appréciables et ont été détaillés au Chapitre III.1.3 comme représentatifs de la ressource rosée disponible dans cette région de l'Inde (voir carte Figure III.15). La valeur de 0,566 mm relevée sur le condenseur exposé Sud le 23/03/06 est proche du rendement maximum jamais mesuré à ce jour, 0,636 mm à Yellagiri Hills. Durant la période de mesure, la fréquence en événements de rosée est de 32 % des nuits et le rendement moyen maximal est de 0,203 mm par événement (condenseur exposé face à l'Ouest). Cette étude préliminaire favorable a entraîné l'installation de la première usine à rosée en vue de l'embouteillage et de la commercialisation d'un minimum de 1000 L d'eau pure par événement de rosée.

i. Ressource en eau dans la région

Comme précisé au chapitre III.2, la zone du Kutch se trouve en climat tropical semi-aride avec un cycle annuel de mousson (juillet, août, septembre) mais avec un seulement 3 à 4 jours de pluie. Des retenues d'eau faites de simples levées de terre sont érigées dans le but de fermer toutes les dépressions et de créer des bassins de rétention ou réservoirs. L'eau douce est aussi pompée dans de profonds puits tubés. Deux dangers guettent néanmoins la ressource actuelle. Premièrement, les pluies perdent de leur régularité et certaines zones n'ont pas reçu une goutte de pluie depuis 2 ans. Cela entraîne le plus souvent une surexploitation des forages, si bien que les intrusions d'eau salée ne sont pas rares dans les nappes du Kutch les plus proches de la mer. L'eau des réservoirs est souvent utilisée pour l'agriculture dans le but d'assurer la récolte annuelle dans la période limitée de la mousson. Après quoi, la livraison d'eau aux habitants se fait par des rotations de camions. L'eau est distribuée dans la plupart des villages sans traitement préalable. Elle est utilisée directement pour la consommation et l'usage domestique même dans le cas où elle est quelque peu saumâtre ou qu'elle a été stockée longtemps en barrage. L'eau est stockée un ou deux ans en réservoir à ciel ouvert en fonction de la fréquence des précipitations de mousson. Cette eau nécessite un post-traitement pour correspondre aux recommandations internationales de l'OMS, mais en raison de coût, la majeure partie de la population ne peut accéder à ce standard de qualité. Un important barrage est situé 7 km à l'Ouest du village de Panandhro. Il fournit l'eau douce pour la mine de lignite de la GMDC, la centrale thermique de la (Gujarat Electricity Board) GEB, le village de Panandhro et la « colonie » de Verma Nagar ou lotissement des employés de la mine. En 2006, le réservoir se trouva vide à partir du 20 avril et tout ce bassin hydrique entra en pénurie critique, jusqu'à la prochaine mousson.

Le climat du Kutch est sous l'influence du cycle des moussons avec une longue saison sèche de près de 10 mois par an. Les événements de rosée apparaissent fréquemment de fin septembre au début mai, avec une période particulièrement sèche et chaude vers le mois de juin. Dans un tel climat, l'objectif est d'installer un système de récupération des eaux de rosée et de pluie pouvant fournir de l'eau potable tout au long de l'année. A terme, l'usine devrait développer 15 000 m² de condenseur afin de délivrer un volume compris entre 1 et 5 m³ d'eau par événement de rosée. Il est également prévu d'installer une petite unité d'embouteillage après filtration de l'eau récoltée pour en éliminer la turbidité due aux dépôts d'aérosols et de poussières. Par sécurité, un procédé de désinfection devrait aussi être installé afin de prévenir toute contamination bactérienne (Beysens *et al.*, 2006a, Muselli *et al.* 2006b).

ii. Maître d'œuvre, collaboration

Depuis 2003, le projet rosée dans le Gujarat est piloté à l'initiative du Pr. G. Sharan du laboratoire des technologies environnementales en milieu aride de l'Indian Institute of Management d'Ahmedabad (IIMA). Les premiers tests ont été menés d'après les travaux des équipes ESEME (CEA-CNRS-ESPCI, équipe mixte de recherche sur les fluides supercritiques appliqués à l'environnement, les matériaux et l'espace), associée au CNRS-Université de Corse, équipe Energies Renouvelables du laboratoire des Sciences Physiques de l'Environnement.

Plusieurs toits existants ont été équipés près de Kothara pour la condensation passive de rosée (Sharan, 2006). L'objectif est de produire l'eau de rosée : (i) sans investissement financier, à l'exception du prix des gouttières, comme cela a été installé sur un toit de 300 m² (tôle galvanisée) d'un hangar à Suthari, au SO de Kothara ; (ii) avec une couverture à bas coût composée d'une isolation de polystyrène expansé recouverte de film radiatif tel que développé au cours de ce travail.

Le projet implique par ailleurs la «Gujarat Mineral Development Corporation » (GMDC) qui propose le site d'installation et met à disposition des machines de terrassement ainsi que la main d'œuvre pour la réalisation. Nous avons collaboré à ce travail en réalisant la simulation numérique de la future usine à rosée, en contribuant au design du nouveau type de condenseur et participant activement aux choix techniques et à la mise en œuvre pratique.

IV.2.1 Construction de l'usine à rosée

i. Site

L'emplacement alloué par la GMDC au projet de condenseur est situé sur la zone autrefois exploitée d'une mine de lignite à ciel ouvert d'une surface totale de 1740 ha. Cette zone a été comblée et devrait retourner à un aspect naturel grâce au programme de plantation du Département Environnement de la mine. Une pente d'inclinaison 15° sur une longueur de 40 m a été aplanie le long d'une colline sur une distance de crête de 300 m (Figure IV.15). L'orientation est donnée pour la pente faisant face au 300 °, ce qui correspond à la direction ONO).



Fig.IV.15. Vue d'ensemble latérale du site expérimental présentant une pente de 40 m de long pour une inclinaison de 15°.

ii. Réalisation

De petites collines ou de grands talus stables peuvent être utilisés pour l'installation de condenseurs de très grande surface. Le Kutch est une zone riche en minerais et les importants remblais de résidu d'excavation offrent de nombreux sites aux expositions variées. L'orientation initiale de la pente sur le site de Panandhro (300°) a été décidée en fonction des résultats précédemment collectés à Kothara et qui ont montré des rendements de rosée supérieurs pour les condenseurs exposés face aux directions Nord et Ouest (Sharan *et al.*, 2007), résultats confirmés par les simulations numériques telles que décrites au Chapitre IV.2.2.

L'adaptation des structures aériennes existantes telles que des toitures pour la condensation de rosée a prouvé son efficacité. Sur ce point, l'étude menée par Muselli *et al.* (2006) concluait sur le fait qu'un condenseur suspendu plan de 30 m² condensait environ 14% de plus que son homologue bâti au sol (type « dune »). Cependant, l'érection de nouvelles structures dédiées offrant plusieurs milliers de m² pour la condensation par refroidissement radiatif serait très coûteuse. C'est pourquoi il a été décidé que la surface de condensation serait mise en place à même le sol, une fois celui-ci mis en forme et compacté.

La Figure IV.16 détaille pas à pas l'installation du condenseur sur un monticule dont la pente fait un angle de 15° avec l'horizontale. L'usine à rosée se compose d'éléments de

condenseur de type « tranchée » à section trapézoïdale développant 2,5 m de longueur linéaire, chacun long de 34 m et développant une surface de condensation de 85 m². La surface de condensation est un film radiatif bon marché de fabrication indienne selon la formulation proposée par Nilsson, (1994) et enrichi d'anti UV. Le film radiatif est tendu sur les plaques d'isolant et la mise en œuvre technique est volontairement choisie aussi bon marché, simple et robuste que possible. A titre d'exemple, l'utilisation de sacs remplis de terre afin de maintenir le film en place, puis enroulés par le surplus de film plastique permet de faire des économies tout en restant démontable.

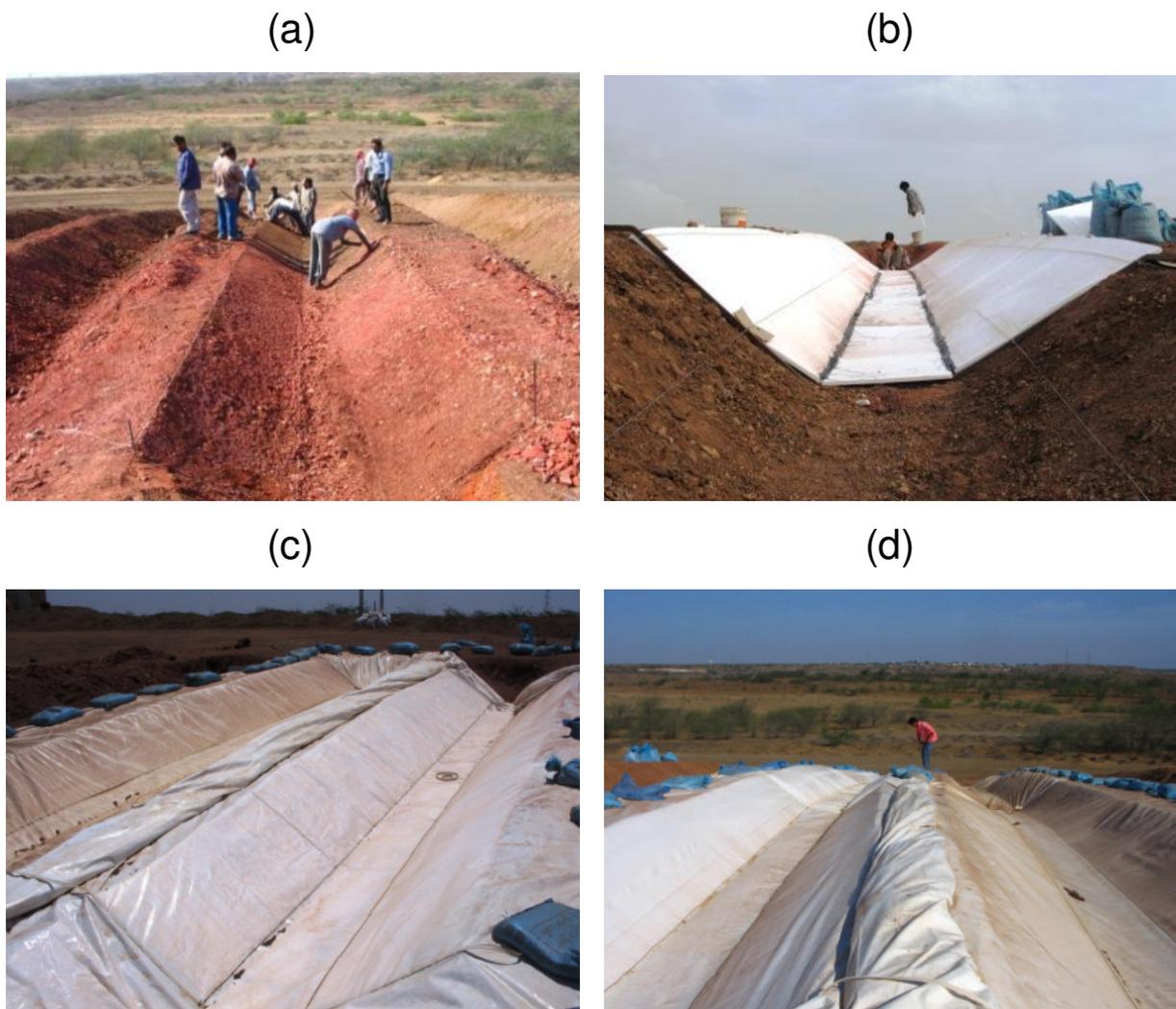


Fig. IV.16. Vue d'ensemble de l'installation des deux premiers canaux. (a) mise en forme du sol meuble ; (b) maintien du polystyrène expansé entre les armatures ; (c) Mise en place du film radiatif ; (d) vue d'ensemble à partir du point haut de la pente. (photo O. Clus)

Le condenseur actuel est composé d'une succession de crêtes parallèles dans le sens de la pente. Le design a été choisi pour bénéficier de la pente du terrain (15°) pour l'écoulement central de la rosée. Plus encore, les principales surfaces de condensation sont inclinées de 30°

(pente voisine de la limite de stabilité d'un sol meuble type sable) dans le but d'augmenter la proportion de gouttes récupérées par écoulement gravitaire (Beysens *et al.*, 2003). Les éléments seront installés côte à côtes à la manière d'un toit ondulé. La Figure IV.17 présente l'aspect final des 10 premières crêtes installées à Panandhro :



Fig.IV.17. (a) Perspective sur les 10 premières rangées complétées (soit 850 m²). (b) détail sur le réseau de collecte des eaux de chaque rangée. (photo S. Singh).

IV.2.2 Simulation numérique

Les simulations numériques ont été réalisées sur le programme de CFD Phoenics selon la méthodologie détaillée au Chapitre II dans le but de déterminer la meilleure mise en œuvre du condenseur et tout particulièrement son orientation en fonction de la direction nocturne du vent. La vitesse du flux d'air le long de la surface, la température de surface et la proportion de surface de température inférieure à celle du point de rosée ont été étudiées (Clus *et al.*, 2006b).

L'usine à rosée de Panandhro a été modélisée en 3 dimensions telle que représentée sur la Figure IV.18. Seuls 3 éléments parallèles de condenseur ont été simulés afin de limiter le nombre de cellules pour ne pas surcharger le calcul. Les valeurs de température de surface et de vélocité de l'air ne seront relevées que sur le condenseur central.

L'axe de la trame cartésienne est parallèle à la pente dans le but de réduire le nombre de trames nécessaires. Le vecteur gravité g_0 sera donc corrigé en conséquence suivant les axes Y et Z ($g_Y = g_0 \cos 15^\circ$; $g_Z = g_0 \sin 15^\circ$).

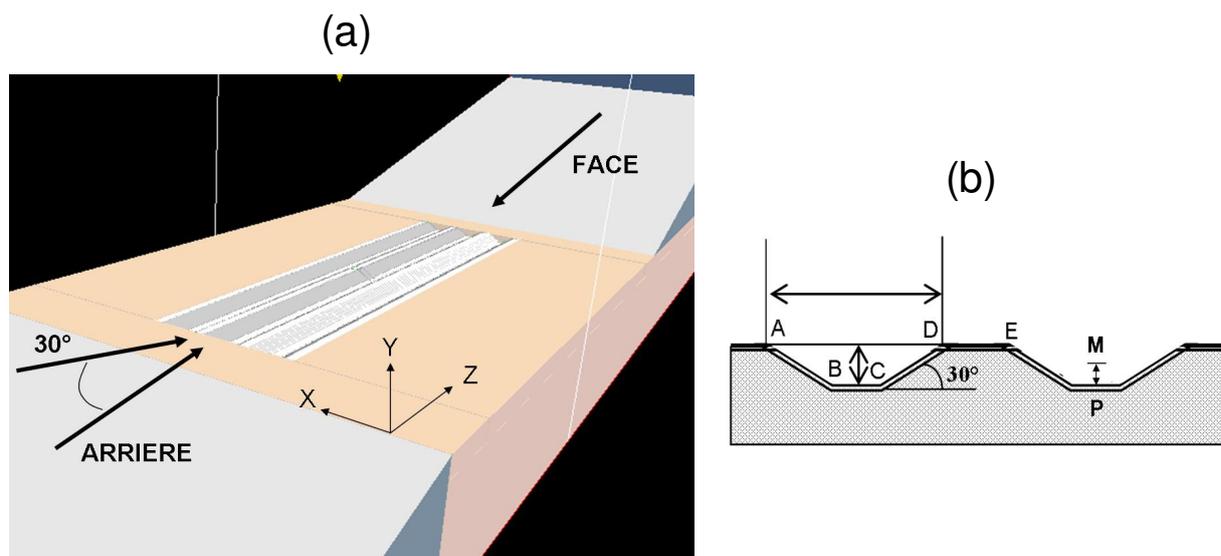


Fig.IV.18. (a) Vue d'ensemble du modèle numérique de l'usine à rosée. Les données sont mesurées sur la tranchée centrale ; trois directions de vent sont testées : Vent arrière (référence) ; vent de face ; Vent oblique 30°. (b) 2 tranchées du condenseur (coupe) : $AB = 1 \text{ m}$; $BC = DE = 0,5 \text{ m}$; $MP = 0,25 \text{ m}$

Le but de l'expérience numérique est de comprendre le comportement du condenseur lorsqu'il est soumis à des variations de vitesse et de direction du vent. Le paramètre mesuré est la température de surface du condenseur T_c le long du condenseur « tranchée » (axe Z). La température est moyennée sur les deux faces inclinées à 30°. Les trois directions testées sont un vent arrière (Figure IV.20a, soufflant depuis le sommet de la colline suivant Z et - Y), un vent face au condenseur (Figure IV.20b, soufflant depuis le pied de la colline suivant - Z et Y). Enfin, un cas intermédiaire qui ne soit pas particulier, un vent oblique à 30° (Figure IV.20c, soufflant depuis le sommet de la colline suivant Z et -X formant un angle de 30° avec le vent arrière de référence).

i. Vitesse de l'air

Le coefficient de transfert thermique est dépendant de la vitesse de l'air à proximité de la surface du condenseur. Cet écoulement est dû à la conjugaison des forces de convection libre et forcée. Dans le souci d'étudier cet aspect, la Figure IV.19 présente les résultats de simulations réalisées pour différentes vitesses et directions de vent (vent arrière, vent de face et oblique de 30°). $\langle V_{0,25} \rangle$ représente la vitesse moyenne le long de la pente et de la ligne de courant passant dans le plan de symétrie du condenseur « tranchée » et situé à 25 cm du fond

du condenseur (Figure IV.18b). Les données sont des valeurs absolues ; l'amplitude de la convection naturelle est mise en évidence pour $V_{10} \rightarrow 0$. La valeur $\langle V_{0,25} \rangle = 0,85 \text{ m s}^{-1}$ obtenue pour $V_{10} = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ est représentative de cette limite.

En configuration de vent arrière, il est remarquable que la convection libre demeure prépondérante pour tout le spectre des valeurs de vent étudiées et simulées. La diminution de la vitesse d'écoulement du fluide pour des valeurs de vent élevées peut se comprendre comme la conséquence de la formation d'un vortex derrière le sommet de la colline qui contrebalancerait en partie la convection libre car de direction contraire. Cette situation a été observée dans le cas voisin d'un plan incliné (voir Beysens *et al.*, 2003).

La configuration en vent oblique à 30° donne un résultat voisin du vent arrière, ce qui semble logique puisque les deux vents soufflent du sommet de la colline. Cependant pour $V_{10} < 1 \text{ m s}^{-1}$, le couplage vent – convection libre renforce l'écoulement de l'air.

La configuration simulant le vent de face conduit naturellement à une augmentation de $\langle V_{0,25} \rangle$ proportionnellement à V pour $V_{10} > 1 \text{ m s}^{-1}$, quand la convection libre devient négligeable face au flux de vent en compression contre la colline. Pour des faibles vitesses de vent ($V_{10} < 1 \text{ m s}^{-1}$), la convection libre est en opposition avec le vent météorologique et il en résulte une diminution paradoxale de la vitesse d'écoulement du fluide au voisinage du condenseur.

Si l'on s'intéresse plus particulièrement à la vitesse de vent moyenne pour laquelle les événements de rosée sont observés à Panandhro sur les condenseurs standards de 1 m^2 ($1,5 \text{ m s}^{-1}$), les configurations vent arrière et oblique 30° présentent sensiblement les mêmes écoulements, proche de la convection libre et en contraste marqué avec le flux simulé pour un vent de face.

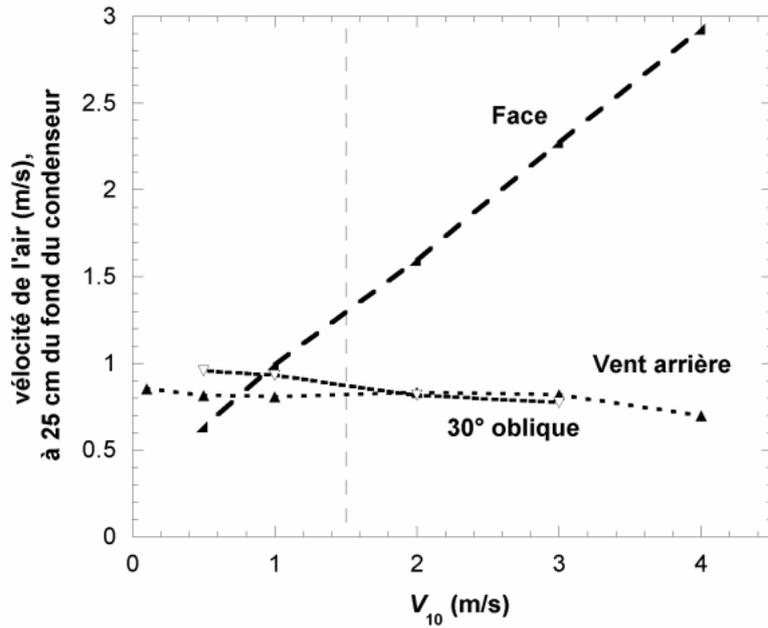


Fig.IV.19. Vitesse moyenne du flux d'air $\langle V_{0,25} \rangle$ au centre du condenseur, en M (voir Figure IV.18b) à 25 cm du fond du condenseur, en fonction du vent V_{10} (m s^{-1}). Les données sont une valeur absolue moyennée tout le long du condenseur. La droite verticale en pointillés correspond à la valeur moyenne calculée d'après les données météorologiques du vent durant les événements de rosée.

ii. Refroidissement

L'efficacité du refroidissement logiquement suit les mêmes caractéristiques que le flux d'air. Sur la Figure IV.20 sont représentées les variations de la température de surface T_c du condenseur central. La valeur retenue est la moyenne des deux faces inclinées à 30° et opposées, voir Figure IV.18b : $T_c = 1/2 [T_c(AB) + T_c(CD)]$. T_c varie de manière importante à proximité des extrémités de chaque rangée ($Z = 0$ et 35 m) et dépend grandement de la direction du vent. Les effets de bord sont importants pour les cas particuliers de vent arrière ou de face, ils correspondent essentiellement à l'extrémité inférieure du condenseur pour laquelle l'air se trouve ou bien piégé car plus lourd, ou bien sous l'influence d'un vortex de recirculation.

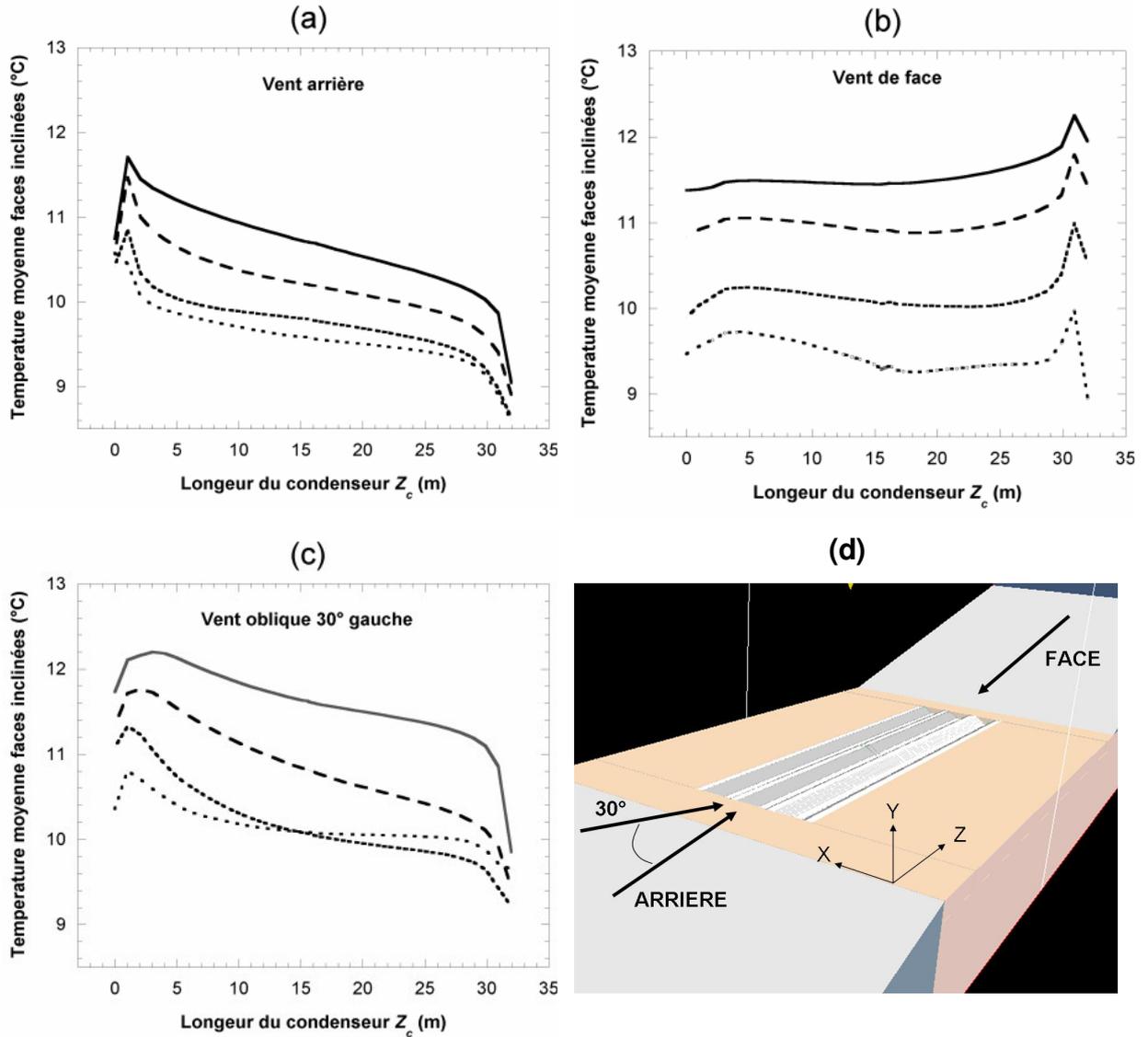


Fig.IV.20. Variation de la température T_c (moyenne des températures des deux faces inclinées de la tranchée centrale) en fonction de la longueur d'une "tranchée" du condenseur (suivant Z). $T_a = 15^\circ\text{C}$ et 4 différentes valeurs de V_{10} ont été simulées (points espacés, $0,5\text{ m s}^{-1}$; points en gras, $1,0\text{ m s}^{-1}$; ligne pointillée : $2,0\text{ m s}^{-1}$; ligne continue : $3,0\text{ m s}^{-1}$). (a) Vent arrière ; (b) Vent de face ; (c) Vent oblique à 30° gauche du vent arrière. (d) Vue d'ensemble de l'espace simulé avec les trois directions de vent testées.

A présent, intéressons nous à la température du condenseur $\langle T_c \rangle$ moyennée pour l'ensemble d'un condenseur. La Figure IV.21 représente le gain en température des directions vent de face et vent oblique en comparaison de la référence au vent arrière. En accord avec ce qui avait été précédemment remarqué pour les vitesses d'écoulement de fluide, trois régions peuvent être caractérisées en fonction des vitesses de vent :

(i) $V_{10} = 0$. Les valeurs ont été calculées par la simulation pour $V_{10} = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ et extrapolée ensuite à $V = 0 \text{ m s}^{-1}$. Il est manifeste que toutes les configurations de vent doivent entraîner la même efficacité. L'échange thermique est ici induit par le seule convection libre (vitesse moyenne $V_{0,25} = 0,85 \text{ m s}^{-1}$, voir précédemment).

(ii) $V_{10} \geq 1,5 \text{ m s}^{-1}$. La convection libre devient négligeable devant le vent atmosphérique, le refroidissement de la surface devient alors plus ou moins proportionnel à la vitesse du vent. Le vent oblique à 30° et le vent de face ont un gain en température très proche, résultat qui peut être compris en observant la Figure IV.19 (amplitude). La vitesse d'écoulement le long de la surface est du même ordre de grandeur dans les deux configurations. L'exception concerne la configuration en vent arrière où la vélocité du vent est sensiblement réduite le long du condenseur, il s'ensuit un refroidissement jusqu'à 15 % plus efficace (Figure IV.21). Ce gain en température correspond approximativement au gain en rosée (voir chapitre II.3).

(iii) $0 < V_{10} \leq 1 \text{ m s}^{-1}$. Sur cette plage, le vent atmosphérique est du même ordre de grandeur que la convection naturelle ($\approx 0,85 \text{ m s}^{-1}$, comme noté précédemment). L'efficacité du refroidissement dépend de l'exacte direction du vent. Pour le vent arrière, la convection naturelle et le vent se renforcent dans la même direction et le refroidissement décroît doucement et avec la vitesse du vent. Le comportement pour le vent oblique à 30° présente un accident. Il n'y a pas de refroidissement sensible entre $0,5$ et 1 m s^{-1} , résultat qui peut se comprendre par l'accélération de l'écoulement par convection naturelle. Un résultat quelque peu s'observe pour la configuration en vent de face pour laquelle le système se montre plus efficace qu'en vent arrière autant que pour l'absence totale de vent. Dans ces conditions particulières, la convection naturelle et le vent atmosphérique sont exactement opposés, il en résulte un gain d'efficacité d'environ 5 %.

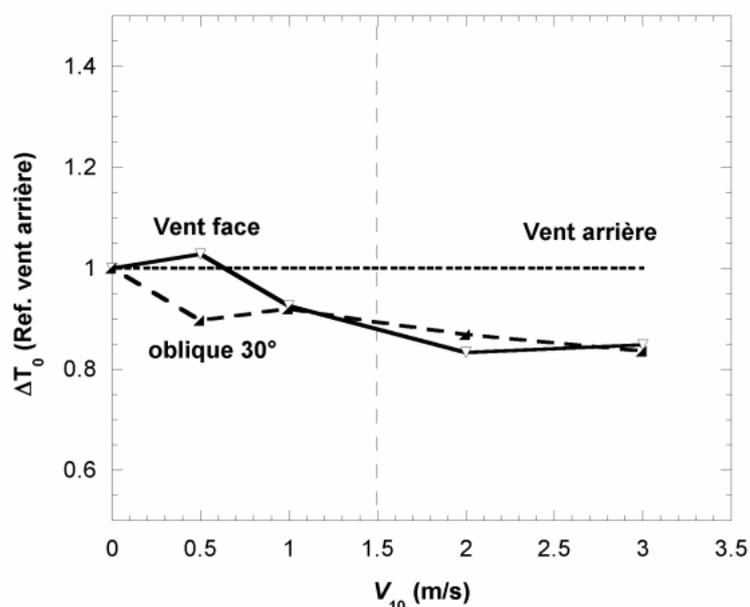


Fig.IV.21. Gain en température des surfaces T_c en configurations vent de face et oblique à 30°, par rapport à la référence donnée par le vent arrière (se reporter au chapitre II).

Il apparaît que la configuration en vent arrière est la plus favorable et permet d'envisager un gain d'efficacité supérieur à 10 % pour un vent de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ correspondant au vent moyen durant les événements de rosée. Ce résultat était déjà montré pour des surfaces planes (Beysens *et al.*, 2003). Les mesures de rendements effectuées sur le site avec mise à disposition des données météorologiques à partir de la station de la GEB ont montré une direction optimale des vents durant les événements de rosée à 213° (moyenne des directions pondérées par le rendement de la nuit). La meilleure disposition à Panandhro sera donc sur le flanc d'une colline dont la crête sera orienté $123 - 303^\circ$, avec le condenseur exposé sur la pente NE à 33° .

IV.2.3 Mesures partielles de rosée

Au cours de cette mission, les données ont dans un premier temps été collectées durant 29 jours du 23-03-2006 au 20-04-2006 sur la première rangée de 35 m (85 m^2) opérationnelle. 21 événements de rosée ont été dénombrés avec un volume cumulé de 260 L correspondant à un rendement de 9 L / jour sur la période complète et 12,4 L / événement de rosée.

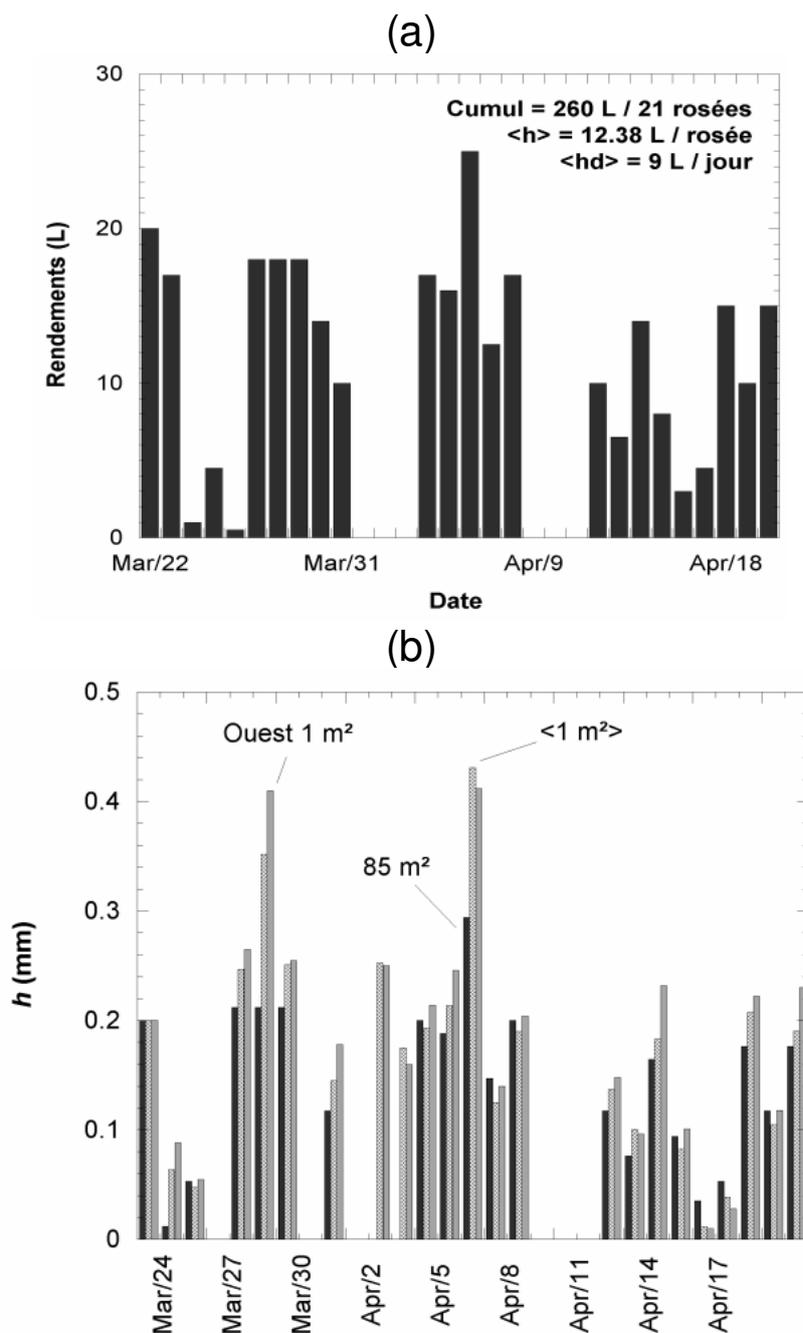


Fig. IV.22. (a) rendements de rosée pour un première rangée de condenseur de 85 m² (29 jours de mesure). (b) Rendements de rosée quotidiens mesurés sur le condenseur de 85 m² (barres noires) et comparés aux rendements moyennés pour les 4 condenseurs de 1 m² (barres grises).

Le rendement par m² cumulé sur le condenseur « canal » de 85 m² représente 77,6 % du rendement moyen cumulé des 4 condenseurs standard de 1 m² et 72,3 % du rendement cumulé du condenseur exposé à l'Ouest. Pendant les événements de rosée d'amplitude modérée, on observe une bonne correspondance des rendements observés sur le condenseur canal et sur les condenseurs standard aériens (Figure IV.22). Cependant, pour les événements de grande

amplitude, le condenseur canal est moins performant que les condenseurs standards. Cela ne s'observe que sur 4 événements, dont deux qui correspondent manifestement à un défaut de mesure du personnel sur place (manque de données pour les 2-3 avril, tandis que des rendements supérieurs à 0,2 mm sont observés sur les condenseurs 1 m²). Les deux autres mesures qui consacrent de grands écarts de rendements concernent les deux événements mesurés à plus de 0,4 mm. Il se pourrait qu'à nouveau l'hypothèse d'événements de brouillard qui apporterait une contribution supérieure sur un condenseur à structure aérienne puisse être à l'origine de cet écart voisin de 0,15 mm (se reporter au chapitre III.2.).

IV.2.4 CONCLUSION

Les premiers rendements mesurés sur l'usine à rosée de Panandhro confirment l'intérêt de tels condenseurs passifs développés à grande échelle dans la région du Kutch pour procurer une ressource complémentaire en eau douce aux populations locales. Plus généralement, cette « première » a déjà essaimé puisqu'un second projet est en cours d'installation au village de Satapar, toujours dans le Kutch. Dans un contexte de raréfaction des ressources en eau traditionnelles pour des zones géographiques souffrant dès à présent des dérèglements du réchauffement climatique mondial, il est évident que cette technologie est amenée à se développer là où la ressource rosée apparaît importante.

De nouvelles techniques ont été développées pour mettre en place ces condenseurs à un moindre coût. Le coût local d'une rangée (85 m²) était très approximativement estimé à 10 000 rps (soit 200 €) par les responsables du service environnement de la GMDC. Avec un coût local du litre d'eau embouteillée et traitée par osmose inverse à 10 (0,2 €) voir 12 rps, il semble envisageable d'espérer produire de l'eau de rosée aux environs de 6 rps par litre (0,12 €), soit un prix de vente 40 % inférieur au marché local actuel.

Le volume condensé moyen par événement de rosée était de 12,4 L /rangée et le cumul durant les premiers 29 jours de fonctionnement était de 260 L, ce qui promet un retour sur investissement relativement rapide pour l'installateur. A ce jour, 10 rangées de condenseur ont été érigées développant une surface de 850 m². Jusqu'à 300 L ont été condensés en une nuit sur cette surface et l'entreprise est décidée à étendre l'usine à 15 000 m² pour produire jusqu'à 5 m³ d'eau pure par nuit.

La collaboration avec l'Indian Institute of Management Ahmedabad qui assurait la réalisation de ce projet a été très profitable. Pour cette première, notre présence tout au long de la première phase de l'installation (3 mois) a permis aux maîtres d'oeuvre de bénéficier de l'expertise de l'équipe française ainsi que des avantages de la simulation numérique CFD sur des petits cas simples non décrits ici mais qui ont permis d'avancer sur des points techniques avec une réactivité de l'ordre de 24 h. La participation à la mise en place pratique a été de même très importante tandis que les résultats détaillés des simulations numériques seront une aide précieuse à la mise en place de prochains projets du même type.

Dans notre situation, le retour sur l'expérience de Panandhro est essentiel. En effet, alors qu'un projet de brevet pour des matériaux radiatifs innovants est en cours, et alors que l'expertise de l'équipe en évaluation de la ressource est reconnue, le développement d'outils de simulation de condenseurs de forme complexe et de grande taille permet de se présenter comme partenaire intéressant pour tout nouvel acteur de cette ressource. La maîtrise pratique de l'installation de projets à grande échelle tels que l'usine de Panandhro est un atout indéniable pour le positionnement à venir de l'équipe dans le secteur de la condensation passive de la vapeur d'eau atmosphérique.

Conclusion

CONCLUSION

CONCLUSION

Tous les bilans sur l'accès à la ressource en eau potable à l'échelle mondiale sont à l'heure actuelle alarmistes, qu'ils soient dressés par des organisations internationales (ONU, OMS, UNESCO...), des Organisations Non Gouvernementales ou bien des institutions d'état. Plus de 1,1 milliard de personnes à l'heure actuelle souffrent d'un manque d'accès à l'eau potable alors même que l'accélération du réchauffement climatique se mesure scientifiquement laissant présager de besoins croissants en ressources en eau complémentaires. Il est manifeste que les technologies innovantes permettant la condensation de vapeur d'eau atmosphérique comme ressource alternative en eau sans apport d'énergie sont promises à un développement certain, bien évidemment pour certaines populations et dans des zones géographiques et climats qui s'y prêtent. Nous avons vu que ces zones peuvent être aussi diverses que des îles calcaires méditerranéennes, des zones côtières arides marocaines, la région semi-aride du Kutch ou encore le Sud montagneux du sous-continent indien, voir des atolls coralliens en climat tropical humide.

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de plus de dix ans de recherches sur le phénomène physique de condensation de vapeur d'eau ayant débouché sur des tests de condenseurs radiatifs pilotes développant jusqu'à 30 m² de surface. Son intitulé « condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce » laisse le champ libre à de nombreuses investigations. Le fait est que nous furent amenés à aborder des problématiques très diverses, l'objectif étant de mettre à disposition des populations une ressource inexploitée dont le potentiel est désormais bien apprécié des scientifiques. Il s'agissait donc de créer les conditions d'un transfert des connaissances et des technologies du pilote scientifique au condenseur réel.

La première étape fut de formuler des matériaux radiatifs et hydrophiles répondant aux exigences d'une utilisation et diffusion à grande échelle (Chapitre I). De nouveaux matériaux polymères composites ont été formulés. Le travail de mise au point a été repris à la base et sur de nouvelles charges minérales, en prenant en compte aussi bien les critères physiques (émissivité

Conclusion

IR, propriétés de mouillage) que d'usage par les populations (coût, robustesse, facilité de mise en œuvre, non-toxicité...). Trois types de sélectivité optique (blanc opaque, blanc diffusant, incolore) ont été formulés en fonction de leur usage final. Chaque type est ensuite formulé aussi bien en films thermoplastiques qu'en peintures pour offrir une solution technique adaptée à chaque installation. Une toiture expérimentale de 40 m² va prochainement être montée. Elle proposera 4 surfaces de couverture parmi les plus répandues (tuiles de terre cuite, fibrociment, tôle ondulée et tôle « bac acier ») afin de tester et de comparer en système réel l'efficacité des matériaux innovants formulés au cours de ce travail. Pour une efficacité radiative en IR équivalente, le coût des matières premières de certains nouveaux matériaux a été abaissé jusqu'à 18 % du coût de l'ancienne formulation. La protection des formulations sous le régime des brevets garantissant leur propriété intellectuelle est actuellement en cours d'étude.

En plus de l'utilisation de matériaux adaptés, l'efficacité du procédé de condensation de vapeur d'eau atmosphérique dépendra de l'efficacité du refroidissement radiatif en surface du condenseur (Chapitre II). Le gain en température mesurant cette efficacité variera en fonction de la réponse en température du condenseur aux écoulements convectifs sur sa surface, donc de sa géométrie. L'étude théorique de la thermodynamique du système a donc été nécessaire. De nombreuses observations avaient été jusqu'à présent réalisées au sein de nos laboratoires sur des condenseurs radiatifs plans (1 et 30 m² de surface). Un outil de simulation numérique CFD (logiciel Phoenics) a été programmé pour son application aux condenseurs radiatifs. Le but était d'extrapoler les ordres de grandeur des rendements mesurés sur les pilotes expérimentaux aux structures beaucoup plus complexes et étendues des condenseurs réels. L'outil a été validé par comparaison aux résultats obtenus sur 3 condenseurs plans de 0,16 ; 1 et 30 m² ; sur un condenseur conique de 7,3 m² et sur trois condenseurs « canal » parallèles développant 255 m² de surface. Cet outil de simulation est disponible pour l'aide à la décision et il a été utilisé afin de diriger les choix techniques d'installation de la première usine à rosée dans la région du Kutch (état du Gujarat, Inde). Elle développe à ce jour une surface de 850 m² et sera étendue progressivement à 15 000 m².

L'efficacité du procédé de condensation de vapeur d'eau atmosphérique dépend également de l'environnement du condenseur, du climat ainsi que des paramètres météorologiques. La

Conclusion

variabilité importante des rendements de rosée en fonction des données locales implique une mesure de potentiel sur site. Quatre nouveaux sites ont été étudiés au cours de ces travaux : l'île de Biševo (Croatie), les îles de Tahiti et Tikehau (Polynésie Française), les sites de Panandhro et Yellagiri Hills (Inde). Au-delà des résultats bruts qui se sont montrés très concluants sur certains sites (moyenne de 0,321 mm par événement pour un maximum de 0,636 mm à Y. Hills), les observations expérimentales ont permis de retirer quelques éléments de compréhension de la variabilité des rendements pour différents climats et phénomènes météorologiques.

Par ailleurs, une formulation permettant d'introduire dans les modèles théoriques de condensation de rosée un facteur de forme issu des résultats obtenus par simulations numériques a été proposée. Il devrait permettre de prendre en compte quantitativement les variations induites dans le modèle par la géométrie du condenseur, son orientation ou la présence d'un coupe-vent.

Enfin, un important savoir faire a été accumulé au cours de ce travail de thèse. Tout d'abord, de nouvelles procédures et systèmes de mesures automatisés en l'absence de contrôle humain ont été mis au point. Une telle station a été installée en autonomie sur l'île de Biševo avec rapatriement des données par modem GSM pour une durée de près de deux ans. L'utilisation de condenseurs standard de tôle peinte (peinture radiative expérimentale) sur laquelle plus de 92 % du volume s'écoule par entraînement gravitaire permet de mesurer la condensation nocturne instantanée sur la surface du condenseur si l'on y adjoint un débitmètre relié à une station automatique. Un tel montage devrait être installé à Mirleft (Maroc) au mois d'avril 2007.

Un savoir faire essentiel a également été accumulé par la participation active à deux premières mondiales en terme de développement de la condensation de rosée par refroidissement radiatif. Le premier système est une toiture de démonstration de 15,1 m² installée par nos soins en Croatie sur l'île de Biševo en mer adriatique ; pour la première fois, une toiture pérenne a été installée en associant une optimisation des propriétés radiatives, de mouillage et d'isolation thermique. Des rendements moyens de 0,181 mm pour un maximum de 0,526 mm montrent que le démonstrateur est aussi performant que les pilotes expérimentaux précédents.

Le second est une usine à rosée réalisée par l'Indian Institute of Management Ahmedabad (état du Gujarat, Inde) avec l'aide de notre expertise. La surface actuelle est de 850 m² et elle sera étendue progressivement à 15 000 m² pour produire jusqu'à 5 m³ d'eau pure par nuit. Les

Conclusion

premiers rendements (jusqu'à 300 L par nuit) mesurés sur l'usine de rosée de Panandhro confirment l'intérêt de tels condenseurs passifs développés à grande échelle dans la région du Kutch afin de produire une ressource complémentaire en eau douce aux populations locales. Plus largement, cette première mondiale a déjà essaimé puisqu'un second projet est en cours d'installation au village de Satapar, toujours dans le Kutch.

Les condenseurs radiatifs de rosée sont sans aucun doute amenés à se développer à moyen terme dans un contexte de raréfaction des ressources en eau traditionnelles pour des zones géographiques de plus en plus étendues. A travers ses recherches et projets, l'équipe a désormais acquis une certaine maîtrise de l'ensemble des aspects ayant trait à l'exploitation de cette ressource : technologie et matériaux dédiés, expertise de sites et simulation des rendements, mise en œuvre concrète sur le terrain de pilotes et systèmes réels.

La maîtrise pratique de l'installation de projets à grande échelle est un atout indéniable pour le positionnement à venir des équipes de l'Université de Corse et de l'ESPCI ESEME-CEA dans le secteur de la condensation passive de la vapeur d'eau atmosphérique. De nombreuses régions dans le monde pourraient être intéressées par ces applications (Maroc, Djibouti, Inde, Afrique sub-saharienne, Australie...). Les outils développés ainsi que les savoir faire accumulés durant ce travail de thèse seront essentiels pour initier et accompagner ces développements à venir.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

American Geophysical Union web site: http://www.agu.org/sci_soc/mockler.html

Awanou Cossi N., (1991). Study of heat exchange radiatively in 7-14 μm band. Renewable Energy 1 (3/4), 335-344

Awanou Cossi N. and Hazoume R.P., (1997). Study of natural condensation of atmospheric humidity. Renewable Energy 10 (1), 19-34

Awanou Cossi N., (1998). Clear sky emissivity as a function of the zenith direction. Renewable Energy 13 (2), 227-248

Bari E., Noël J.-Y., Gomini G., Cortella., (2005). Air cooled condensing systems for home and industrial appliances. Applied Thermal Engineering 25, 1446 - 1458

Baturkin V., (2005). Micro-satellites thermal control – concepts and components. Acta Astronautica 56, 161-170

Berdahl P., Fromberg R., (1982). The thermal radiance of clear skies. Solar Energy 29 (4), 275-286

Berdahl P. and Martin M., (1983). Technical note: Emissivity of clear skies. Solar Energy 32 (5), 663-664

Berdahl P., (1995). Building energy efficiency and fire safety aspects of reflective coatings. Energy and buildings 22, 187 – 191

Berdahl P. and Bretz S. E., (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. Energy and buildings 25, 149-158 : <http://eetd.lbl.gov/coolroof/>

Berger X., Buriot D., Garnier F., (1983). About the equivalent radiative temperature for clear skies. Solar energy 32 (6), 725-733

Berger X., Bathiebo J., (1988). From spectral clear sky emissivity to total clear sky emissivity. *Solar & wind Technology* 6 (5), 551-556

Berger X., Bathiebo J., kieno F. and Awanou C. N., (1992). Clear sky radiation as a function of altitude. *Renewable Energy* 2 (2), 139-157

Berger X., Bathiebo J., (2003). Directional spectral emissivities of clear skies. *Renewable Energy* 28, 1925-1933

Berk A., Bernstein L. S., Anderson G. P., Acharya P. K., Robertson D. C., Chetwynd J. H., and Adler-Golden S. M., (1998). MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote sensing environment* 65, 367-375

Berkowicz S., Beysens D., Milimouk I. Heusinkveld, Muselli M., Wakshal E., Jacobs A., (2004). Urban dew collection under semi-arid conditions: Jerusalem. *Proceedings of the Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Cape Town, South Africa, October 11 - 15, 2004.*

Bernardi A., Becherini F., Bassato G., Bellio M., (2006). Condensation on ancient stained glass windows and efficiency of protective glazing systems: two French case studies, Sainte-Chapelle (Paris) and Saint-Urbain Basilica (Troyes). *Journal of Cultural Heritage* 7, 71–78

Beysens D., (1995). The formation of dew. *Atmospheric Research* 39, 215-237

Beysens D., Milimouk I., (2000). Pour les ressources alternatives en eau. *Sécheresse* 11 (4)

Beysens D., Milimouk I., Nikolayev V., Muselli M., Marcillat J., (2003). Using radiative cooling to condense atmospheric vapour: A study to improve water yield, *Journal of Hydrology*, 276, 1-11

Beysens D., Muselli M., Nikolayev V., Narhe R., Milimouk I., (2005a), Measurement and modeling of dew in Island, coastal and Alpine areas, *Atmospheric Research*, 73(1-2):1-22.

BIBLIOGRAPHIE

- Beysens D., Mylymuk I., (2005b). À la poursuite des fontaines aériennes. Les incroyables aventures de Français en Ukraine. Editeur : book-e-book/Collection : Zététique.
- Beysens D., Ohayon C., Muselli M., Clus O., (2006a). Chemical and bacterial characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bordeaux, France). *Atmospheric Environment* 40, 3710–3723
- Beysens D., (2006b). Dew nucleation and growth. *C. R. Physique* 7, 1082–1100
- Beysens D., Clus O., Mileta M., Milimouk I., Muselli M., Nikolayev V., (2007a). Collecting dew to improve water resources: the D.E.W. project in Bišev (Croatia). *Energy* 32, (6), 1032-1037
- Beysens D., Muselli M., Milimouk I., Ohayon C., Berkowicz S., Soyeux E., Mileta M. and Ortega P., (2007b). Application of passive radiative cooling for dew condensation. *Energy*, in press
- Bondoux A., (1991). Colorants et pigments. *Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites*, ref : AM 3 324
- Bourouni K., Martin R., Tadriss L., Tadriss H., (1997). Experimental investigation of evaporation performances of a desalination prototype using the aero-evapo-condensation process. *Desalination* 114, 111-128
- Brisson A., Le Borgne P., Marsouin A., (2000). Development of algorithms for Downward Longwave Irradiance retrieval at O&SI SAF Low and Mid Latitudes. *Météo-France / SCEN / CMS*, 22302 Lannion, France
- Brock T., Grooteklaes M., Mischke P., (2002). *Manuel de technologie des peintures et vernis*. Lavoisier, book, 400p
- Cabannes F., Gervais F., (1996). *Température de surface : Mesure Radiative*. *Techniques de l'ingénieur, traité mesures et contrôle*. Réf : R 2 735

Campen J. B. and Bot, G. P. A., (2002). Dehumidification in green houses by condensation on finned pipes. *Biosystems engineering* 82 (2), 177-185

Cengel Y. A. and Turner R. H., (2001). *Fundamentals of thermal fluid sciences*, international edition. Mc Graw Hill International Edition, book, 1047p

Chaptal L., (1932). La capitation de la vapeur d'eau atmosphérique. *Annales Agronomiques*, 4, 540-555.

Chartzoulakis K. S., Paranychianakis N. V. and Angelakis A. N., (2001). Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use, *Water Policy*, 3 (3), 193-205

Clus O., Muselli M., Beysens D., Nikolayev V., Ouazzani J., (2006a). Computational Fluid Dynamic (CFD) Applied to Radiative Cooled Dew Condensers. Proceedings of the fifth IEEE International Symposium on Environment Identities and Mediterranean area, Corte (France) 11th-13th July 2006.

Clus O., Ouazzani J., Muselli M., Nikolayev V., Sharan G., Beysens D., (2006b). Radiation-cooled Dew Water Condensers studied by Computational Fluid Dynamic (CFD). 2006 European PHOENICS User Meeting, Wimbledon (GB), Nov. 30th, Dec 1st, 2006

D'Agaro P., Croce G., Cortella G., (2006). Numerical simulation of glass doors fogging and defogging in refrigerated display cabinets. *Applied thermal engineering* 26, 1927-1934

DeArmitt C. and Rotheron R., (2002). Fillers and surface treatment. *Plastics Additives & Compounding*, May 2002

Diop S., Rekecewicz P., (2003). *Atlas mondial de l'eau : une pénurie annoncée*. Ed. Autrement, 63p

Dobson K.D., Hodes G., Mastai Y., (2003). Thin semiconductor films for radiative cooling applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 80, 283-296

Dupon J. F., (1987). Les atolls et le risque cyclonique, le cas des Tuamotu. *Cahier des Sciences Humaines* 23 (5-4), 567-599.

Faujas A., (2006). 17 % de l'humanité en manque d'eau potable. *J. Le Monde*, 10 Novembre 2006.

Gandhidasan P. and Abualhamayel H.I., (2005). Modelling and testing of a dew collection system. *Desalination* 180, 47-51

Garcia M. P. and De Luis F. J., (2002). Influence of site dependent effects on the assessment of the radiative cooling potential. *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 22 (1), 33–45

Garcia M. P., (2004). Simplified modelling of the nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications. *Ecological Modelling* 180, 395 – 406

Garrat J. R. and Segal M., (1988). On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-layer Meteorology*, 45, 209-236

Geymard C.A., (2001). Parametrized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71 (5), 325-346

Geymard C. A., Myers D. and Emery K., (2002). Proposed reference irradiance spectra for solar energy system testing. *Solar Energy*, 73 (6), 443–467,

Geymard C.A., (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy* 76, 423–453

Gindel I., (1965). Irrigation of plants with atmospheric water within the desert. *Nature*, 5002, 1173–1175.

Gioda A. and Acosta-Baladon A., (1991). “Les puits aériens de Théodosia, Montpellier et Trans”, *Sécheresse*, 2, 215.

BIBLIOGRAPHIE

- Giri A., Narasimham G. S. V. L., Krishna Murthy M. V., (2003). Combine natural convection heat and mass transfer from vertical fin arrays. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 24, 100-113
- Graham A.S., (1989). Atmospheric water condenser. UK patent application GB 2209683A ; 24-05-1989
- Guyer E.C., Brownell D.L., (1999). *Handbook of Applied Thermal Design*, 1st edition. Pub. Taylor and Francis. Book, 600p
- Guyot G., (1999). *Climatologie de l'environnement*, 2^d edition, Dunod France, book, 507p
- Hayakawa M. and Mitsuyoshi K., (2000). Photocatalytically hydrophilifiable coating composition. United States Patent 6165256, Dec. 2000
- Holdaway M.A., Ishiguro M., Nakai N., Matsushita S., (1996). Correlation Between Opacity and Surface Water Vapor Pressure Measurements at Rio Frio. ALMA memo series; MMA Memo 158, www.alma.nrao.edu/
- Hummel D.O., (1991). *Atlas of Polymer and Plastics Analysis*, volume 1, third Edition. Hanser Munich, book.
- Iqbal M., (1983). *An Introduction to solar radiation*. Academic press, book, 388p
- Jacobs A. F. G., Heusinkveld B. G., Berkowicz S. M., (2002). A simple model for potential dewfall in an arid region. *Atmospheric Research* 64, 285-295
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Berkowicz S., (2004). Dew and Fog Collection in a Grassland Area, The Netherlands. *Proceedings: Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, Cape Town, South Africa.
- Joukov, N.N., (1931). *Sur les constructions hydro-techniques anciennes dans les environs de Theodosia*: Traduction: Report CEA-SACLAY 1995, DIST Ref. 95002495.
- Kelly A. and Zweben C., (2000). *Comprehensive Composite Materials: Volume 1 & Volume 2*. Elsevier, book

BIBLIOGRAPHIE

Kiehl J. T. and Trenberth K. E., (1997). Earth's annual global mean Energy Budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 78 (2), 197-208

Kieser M., Edler G., Daponte T., Leon F., Verschaeren P., Corneel M., (2002). Agricultural method and materials for screening solar radiation. US Patent 6441059, Aug 2002

Knapen, M.A., (1929). Dispositif intérieur de puits aériens Knapen, Extraits des mémoires de la Société des Ingénieurs civils de France (bulletin de Janvier-Février). Imprimerie Chaix, Paris.

Kounouhewa B. and Awanou C. N., (1999). Evaluation of the amount of the atmospheric humidity condensed naturally. Renewable Energy 18, 223-247

Kroschwitz Jacqueline I., (1998). Concise Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. Wiley-Interscience; New Ed. book, 1341 p

Laurent V., Maamaatuaiahutapu K., Maiau J., Varney P., (2004). Atlas climatologique de la Polynésie Française. Météo France, book, 201p.

Libradtran, (2007). "The Libradtran homepage": www.libradtran.org/

Liu J., Aizawa H., Yoshino H., (2004). CFD prediction of surface condensation on walls and its experimental validation. Building and Environment, 39, 905-911

Martin M., and Berdahl P., (1984a). Summary of results from the Spectral and Angular Sky Radiation Measurement Program. Solar Energy, 33 (3/4), 241-252

Martin M., and Berdahl P., (1984b). Characteristics of Infrared sky radiation in the United States. Solar Energy, 33 (3/4), 321-336

BIBLIOGRAPHIE

Mayer B. and Killing A., (2005). Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and exemple of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855-1877

Melaragno Michele G., (1982). *Wind in architectural and environmental design*. Van Nostrand Reinhold Company, New York ; book, 698 p

Mileta M., Muselli M., Beysens D., Milimouk I., Berkowicz S., Heusinkveld B.G. and Jacobs A.F.G., (2004). Comparison of dew yields in four Mediterranean sites: Similarities and differences. *Proceedings: Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, Cape Town, South Africa.

Mileta M., Beysens D., Nikolayev V., Milimouk I., Clus O., Muselli M., (2006). Fog and dew collection projects in Croatia. *Proceedings of the “International Conference on Water Observation and Information System for Decision Support”*, Ohrid, Republic of Macedonia - 23, 26 May 2006

Monteith, J.L., Unsworth, M.H., (1990). *Principles of Environmental Physics*, Second ed, Chapman & Hall, New York, book, 291p

Morieras G. and Schaeffer G., (2002). Calcium carbonate in blown HDPE film – New developments to increase productivity and profitability. Omya AG, marketing segment plastics, technical documentation

Muselli M, Beysens D, Marcillat J, Milimouk I, Nilsson T, Louche A, (2002). Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France), *Atmospheric Research* 64, 297–312

Muselli M., Clus O., Beysens D., (2004). *Condenseurs radiatifs de l’humidité atmosphérique : Radiomètre IR et simulations numériques. Rapport de Contrat ANVAR/Collectivité Territoriale de Corse*, N°J0205011H, 53 p.

Muselli M., Beysens D., Milimouk I., (2006a). A comparative study of two large radiative dew water condensers. *Journal of Arid Environments* 64, 54–76

BIBLIOGRAPHIE

- Muselli Marc, (2006b). Capter l'eau de l'air, Les systèmes de production d'eau douce utilisant la vapeur d'eau atmosphérique. *Stantari*, 5, 63-68
- Muselli M., Soyeux E., Beysens D., Clus O., (2006c). Is Dew Potable? Study of the physical, chemical and biological dew characteristics in Ajaccio (France). *J. of Environmental Quality*, in press.
- NASA U.S. Standard Atmosphere (1976): http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/us_standard.html
- Naudin C.A. et Cloza C., (1987). Charges. Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, ref : A3 220
- Nikolayev V., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J. P., (1996). Water recovery from dew. *Journal of hydrology* 182, 19-35
- Nikolayev V.S., Beysens D., Muselli M., (2001). A computer model for assessing dew/frost surface deposition. Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection, St John's (Canada) July 2001 Eds.R.S. Shemenauer and H. Puxbaum, IRDC, 333 – 336
- Nilsson T. M., (1994). Optical Scattering properties of Pigmented Foils for Radiative Cooling and Water Condensation: Theory and Experiment. Chalmers University of Technologie, Göteborg, Sweden. PhD
- Nilsson T., (1996). Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 40, 23-32.
- Nyquist R., Kagel R., Putzig C., Leugers M., (1996). Handbook of Infrared and Raman Spectra of inorganic Compounds and Organic Salts, four volume set, 1-4. Academic press, books, 1184p
- Oliveti G., Arcuri N., Ruffolo S., (2003). Experimental investigation on thermal radiation exchange of horizontal outdoor surfaces. *Building and Environment*, 38, 83 – 89.

Ohishi M., Shimono K., Adachi M., .Optical properties and radiative cooling power of white paint. Meisei Industrial Co., Ltd., Hosoe-cho, Inasa-gun, Shizuoka, Japan ; (web) note technique

OPUR, International Organization for Dew Utilization: www.opur.u-bordeaux.fr

Parker D. S., (2005). Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept. U. S. department of Energy, FSEC-CR-1502-05. available on line: www.fsec.ucf.edu/

Pied J.P., (1978). Method for increasing the productive yield of crops with polyolefin films. US Patent 4075784, feb 1978

Robinson N., (1966). Solar Radiation. Elsevier Publishing Company, book, 350p

Renewable Resource Data Center web site, (2007). Solar Radiation Resource Information: <http://rredc.nrel.gov/solar/>

Rüdiger W., (1998). Steep particule size distribution curves as a determining factor in the use of fine extenders in various coating systems. 1998 FSCT Annual Meeting Technical Program, New Orleans, LA/USA (Metric).

Seinfeld J. H. and Pandis S. N., (1998). Atmospheric Chemistry and Physics: from Air pollution to Climate Change. Wiley-Interscience; Édition : 1st (1998). book, 1203 p.

Sentelhas P.C., Gillespie T.J., Gleason M.L., Monteiro J., Eduardo B.A., Helland S.T., (2004). Operational exposure of leaf wetness sensors. Agricultural and Forest Meteorology 126, 59-72

Sharan G., Prakash H (2003) Dew Condensation on greenhouse roof at Kothara, Journal of Agricultural Engineering, 40 (4), 75-76.

Sharan G., (2006). Dew Harvest To Supplement Drinking Water Sources in Arid Coastal Belt of Kutch. Centre for Environmental Education, India. Book

BIBLIOGRAPHIE

Sharan G., Beysens D., Milimouk I., (2007). A Study of dew Water Yields on Galvanized Iron roof in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environment*, 69, 259–269

Skartveit A., Olseth J. A., Czeplak G., Rommel M., (1996). On the estimation of atmospheric radiation from surface meteorological data. *Solar Energy*, 56, 349-359

Smale N. J., Moureh J., Cortella G., (2006). A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *Inter. J. of Refrigeration*, 29, 911-930

Spalding DB, (1981). A general purpose computer program for multi-dimensional one and two phase flow. *J. Mathematics and Computers in Simulation*, North Holland ; 23, 2657-2676

Stuckey W. and Meshishnek M., (2003). Ground Testing of Spacecraft Material. *Crosslink*, The Aerospace Corporation, 4 (2), 36-41

Trujillo F. J., Lovatt S. ., Harris M. B., Willix J. and Pham Q. T., (2003). CFD modelling of the heat and mass transfer process during the evaporation of water from a circular cylinder. *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne Australia, 10-12 Dec. 2003

Tsilingiris P.T., (2003). Comparative evaluation of the infrared transmission of polymer films. *Energy Conversion and Management*, 44, 2839-2856

University of California, (2007). Institute for Computational Earth System Science, Santa Barbara ; “SBDART: A Practical Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's atmosphere”: www.ices.ucsb.edu/esrg/pauls_dir/

University of Chicago, (2007). Department of the Geophysical Sciences; Modtran, A Model of Infrared Radiation in the Atmosphere:

<http://geosci.uchicago.edu/~archer/cgimodels/radiation.html>

Vargas William E., Greenwood P., Otterstdt J.E., Niklasson G.A., (2000). Light scattering in pigmented coatings: experiments and theory. *Solar Energy*, 6, 553-561

Vargas William E., (2003). Optical properties of pigmented coatings taking into account particle interactions. *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 78, 187-195

BIBLIOGRAPHIE

Ventura C. and Papini M., (1999). Diffuse reflection spectroscopy study of granular materials and their mixtures in the mid-infrared spectral range. *Vibrational Spectroscopy*, 21, 17-26

Wahlren R.V., (2001). Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review. *Water Research*, 35 (1), 1-22

WHO and UNICEF, (2005). Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation. *Water for life : making it happen*. World Health Organization and UNICEF, ISBN 92 4 156293 5 (NLM classification:WA 675)

Wiseman B.K., Khan J.A., (2003). Evaluation of the radiative properties of a dispersed particulate medium for construction material applications. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 46, 2291-2303

Wojtysiak C.S., (2002). Radiative cooling Surface Coating. International application published under the patent cooperation treaty (PCT), WO 02/08996 A1

Zhang Y. and Gex I., (1995). A new method for determination of the optical constants and thermal radiation properties of semi-transparent films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37, 379-387

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

A_{Liq}	(m ²)	Aire de la goutte en contact avec l'air
A_{Mou}	(m ²)	Aire mouillée du substrat
A_{Sec}	(m ²)	Aire sèche du substrat
C_1	(W μm ⁴ m ⁻²)	$C_1 = 2\pi c^2 h = 3,742 \cdot 10^8$; paramètre diminué, équation de Planck
C_2	(W μm K)	$C_2 = ch k^{-1} = 1,439 \cdot 10^4$; paramètre diminué, équation de Planck
c	(m s ⁻¹)	$c = 2,996 \cdot 10^8$ m s ⁻¹ ; célérité des ondes électromagnétiques dans le vide
c_a	(kcal kg ⁻¹ K ⁻¹)	$c_a = 0,24$ chaleur spécifique de l'air (quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° C la température de 1 kg d'air à pression constante)
C_c	(J g ⁻¹ K ⁻¹)	capacité calorifique massique du substrat de condensation
c_i	(kg kg ⁻¹)	fractions massiques de vapeur respectivement dans l'air et sur la surface de condensation (c_{air} et c_c)
C_p	(J kg ⁻¹ K ⁻¹) (J L ⁻¹ K ⁻¹)	Capacité calorifique ($C_{p,m}$ Massique ; $C_{p,v}$ Volumique ; C_a de l'air)
C_w	(J g ⁻¹ K ⁻¹)	capacité calorifique massique de l'eau
D_{cool}	(m)	Distance de séparation entre ailettes verticales sur échangeur thermique
dE_C	(W)	émittance totale du corps radiatif (fonction de T_c et pour une surface élé dS)
dE_s	(W)	énergie reçue du ciel par une surface élémentaire dS placée horizontalement
$dE_{s, \theta, \varphi}$	(W)	énergie reçue du ciel par la surface dS dans l'angle solide élém. $d\Omega$
D_{im}	(m)	$D_{im} = (S_C)^{1/2}$ est la dimension du condenseur
Dir	(°)	Direction du vent
DT_0	(°C)	Différence ($T_d - T_a$) ~ RH maximale au delà de laquelle il n'y a plus condensation de rosée
dS	(m ²)	Elément de surface

NOMENCLATURE

dt	(s ; h)	Durée de condensation
dx_i	(m)	Dimension suivant X de l maille (i) (Phoenics)
dy_i	(m)	Dimension suivant Y de l maille (i) (Phoenics)
dz_i	(m)	Dimension suivant Z de l maille (i) (Phoenics)
$d\Omega$	(Str)	Angle solide élémentaire
E_{dif}	(W m ⁻²)	rayonnement diffus reçu au niveau de la mer
E_{glob}	(W m ⁻²)	rayonnement global reçu au niveau de la mer (rayonnements direct plus diffus E_{dif}).
e_{ins}	(m)	Epaisseur de l'isolant
E_s	(W m ⁻²)	radiance totale du ciel pour les longueurs d'ondes thermiques (5-100 μ m)
g	(m s ⁻²)	accélération moyenne de la gravité terrestre ; $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
GMT	(°C ; K)	Gain Maximal en Température
g_f	/	Coefficient de correction d'ordre 1 empirique (forme du condenseur)
Gr	/	nombre de Grashof
h	(mm) ; (L/m ²)	Volume de rosée condensé équivalent aux précipitations cumulé pour la nuit et rapporté à la surface du condenseur : $h = m_T/1000$. Par simplification, h sera qualifié de « rendement de rosée » (voir chapitre I.1.3)
H	(m)	Hauteur d'un obstacle ou coupe-vent
h_0	(mm)	Rendement maximum sur un système particulier (en mm ou mm h ⁻¹)
H_{abs}	(g m ⁻³)	Humidité absolue
h_C	(W m ⁻² K ⁻¹)	Coefficient de transfert thermique moyen sur la surface
h_{cond}	(mm)	rendement en rosée mesuré sur un condenseur quelconque
h_{max}	(mm)	Rendement maximum théorique (mm/nuit), typiquement 0,8 mm ; voir paragraphe I.1.3.
h_r	(W m ⁻² °C ⁻¹)	$h_r = 6,1 \varepsilon$; coefficient de transfert de chaleur radiatif
h_{ref}	(mm)	rendement en rosée mesuré sur un condenseur pris comme référence

NOMENCLATURE

h_p	(J s)	$h = 6,6255 \cdot 10^{-34}$ J s ; constante de Planck
I_0	(W m ⁻²)	flux solaire incident
k_a	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique de l' air
k_b	(J.K ⁻¹)	$k_b = 1,3805 \cdot 10^{-23}$; constante de Boltzmann
k_f	/	Coefficient de correction d'ordre 1 empirique (forme du condenseur)
k_{ins}	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique de l' isolant
k_w	(km ⁻¹)	Inverse de la hauteur de vapeur d'eau atmosphérique
k_λ	(cm ⁻¹)	Coefficient d'absorption des gaz atmosphériques, varie avec la longueur d'onde
L_C	(m)	longueur caractéristique de la surface
Le	/	Nombre de Lewis
m	(g)	cumul de la masse d'eau condensée en surface ; sans tenir compte de l'écoulement
M	(g)	Masse du condenseur (substrat)
m_c	(g)	masse d'eau présente en surface du condenseur en régime stationnaire ; valeur constante sur un condenseur incliné
m_λ	(g cm ⁻³)	Concentration massique quantité d'absorbant
m_T	(g)	masse d'eau condensée en surface cumulée pour la nuit ; $m_T = 1000h$
N	(octas)	Couverture nuageuse
Nu	/	nombre de Nusselt
Nu^*	/	nombre de Nusselt combiné (composantes convection libre et forcée)
Nu_F	/	nombre de Nusselt, convection forcée
Nu_L	/	nombre de Nusselt, convection libre
p	(mm)	Précipitations atmosphériques rapportées à la surface du collecteur projetée sur un plan horizontal.
p_a	(Pa)	pression atmosphérique
P_e	(hPa)	pression partielle de vapeur au sol

NOMENCLATURE

Pr	/	nombre de Prandtl
$P_{T,C}$	(W m ⁻²)	loi de dissipation d'énergie par un radiateur par unité de surface $P_{C,T} = f(T_c)$
$P_{T,V}$	(W m ⁻³)	loi de dissipation d'énergie par un radiateur par unité de volume
q_{CD}	(W)	transfert de chaleur par conduction
q_{COND}	(W)	transfert de chaleur due à la chaleur latente de condensation λ_c par unité de masse
q_{CV}	(W)	transfert de chaleur convectif et diffusif (solide - fluide)
q_{IR}	(W)	Transfert radiatif, puissance dissipée
q_T	(W m ⁻²)	transfert de chaleur global
r_0	(km)	$r_0 \approx 1,496 \cdot 10^8$ km distance Terre – Soleil.
R_d	/	réflexion diffuse
Re	/	nombre de Reynolds
RH	(%)	Humidité relative
r_s	(km)	$r_s = 6,9598 \cdot 10^5$ km rayon moyen du soleil
R_s	/	réflexion spéculaire
R_{vis}	/	réflectance spectre solaire
S_C	(m ²)	Surface du condenseur (du radiateur, d'échange...)
t	(h ; min ; s)	horloge
T	(K, °C)	Température
T_a	(K, °C)	Température ambiante
T_c	(K, °C)	Température de surface du condenseur (radiateur)
T_d	(K, °C)	Température de rosée
T_{dif}	/	transmission diffuse
T_{Ref}	(°C)	température de surface du système de référence
T_s	(K, °C)	Température équivalente du ciel

NOMENCLATURE

T_{spe}	/	transmission spéculaire
u_i	(m s ⁻¹)	composantes de vitesse suivant X (Phoenics)
V	(m s ⁻¹)	Vélocité de l' air, vitesse du vent
V'	(m s ⁻¹)	Vélocité du vent derrière le coupe-vent, pratiquement, $V' = V/2$
$\langle V_{0,25} \rangle$	(m s ⁻¹)	représente la vitesse moyenne le long la ligne de courant passant dans le plan de symétrie du condenseur et à 25 cm du fond (Phoenics)
v_i	(m s ⁻¹)	composantes de vitesse suivant Y (Phoenics)
w_i	(m s ⁻¹)	composantes de vitesse suivant Z (Phoenics)
X	(m)	Position du condenseur dans un espace clos (relativement aux bords)
x_i	(m)	coordonnée cartésienne d'un volume élémentaire (Phoenics)
y_i	(m)	coordonnée cartésienne d'un volume élémentaire (Phoenics)
z	(m ; km)	Altitude
z_c	(m)	Rugosité caractéristique du sol (typiquement 0,1 m)
z_i	(m)	coordonnée cartésienne d'un volume élémentaire (Phoenics)
α	(°)	Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale
α_t	(m ² s ⁻¹)	diffusivité thermique
β_{exp}	(K ⁻¹)	$\beta_{exp} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; coefficient d'expansion thermique pour l'air à 20°C
β_f	(W K ⁻¹ m ² s ^{1/2})	est un facteur empirique $\beta_f = 4$ pour un plan incliné
δ_{air}	(m ² s ⁻¹)	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air
ε	/	émissivité du radiateur pour l'IR thermique
ε^*	/	émissivité intermédiaire du matériau (obtenu à partir de la seule composante T_{spe}), ε^* permet d'évaluer les efficacités relatives comparées de chaque matériau
ΔT_0	/	gain en température (par rapport à une référence arbitraire)
$\varepsilon(\lambda, \theta)$	/	émissivité spectrale du ciel dans la direction θ (angle par rapport au zenith)

NOMENCLATURE

ε_0	/	l'émissivité totale du ciel pour un ciel clair
ε_s	/	Emissivité totale du ciel (longueurs d'ondes thermiques, 5-100 μm)
$\varepsilon_{s,\theta}$	/	émissivité angulaire du ciel
γ_T	($^{\circ}\text{C km}^{-1}$)	taux de décroissance verticale de la température dans l'atmosphère
λ	(m)	Longueur d'onde
λ_c	(J g^{-1})	chaleur latente de condensation de l'eau par unité de masse à 20°C
μ_a	(Pa s)	Viscosité dynamique de l'air
ν_c	($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	viscosité cinématique ($\nu_c = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ pour l'air à 20°C)
ρ	(g m^{-3})	masse volumique (ρ_a pour l'air)
ρ_0	(g m^{-3})	Densité de vapeur d'eau au niveau du sol
ρ_w	(g m^{-3})	Densité atmosphérique de vapeur d'eau (varie avec l'altitude z)
σ	($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)	$\sigma = 5,673 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ constante de Stefan Boltzmann
θ	($^{\circ}$; rad)	angle de visée par rapport au zénith
θ_c	($^{\circ}$; rad)	angle de contact goutte - substrat caractéristique du mouillage
θ_L	($^{\circ}$; rad)	angle limite d'ouverture sur le ciel à partir du zénith

ANNEXE I.

ANNEXE I.1

Rayonnements et modèles de ciel

Dans un premier temps, il convient de présenter les modèles décrivant le rayonnement atmosphérique incident à la surface du globe, rayonnement solaire d'une part, ainsi que de nature infrarouge thermique d'autre part. De ces propriétés du rayonnement incident seront alors précisées les conditions à mettre en œuvre afin d'exploiter le refroidissement radiatif de surfaces. Ensuite seulement seront abordées les études et le développement de nouveaux matériaux dédiés spécifiquement à la condensation de vapeur d'eau atmosphérique.

A-I.1 Loi des corps noirs, origine du rayonnement

En 1900, le physicien Max Planck présenta ses recherches décrivant l'émission et l'absorption de chaleur / lumière par les corps noirs. Toute molécule constitutive d'un corps émet un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est déterminée par la nature de la liaison chimique mise en jeu tandis que la puissance émise à cette longueur d'onde est fonction de la température du corps. En regard de ce principe, un corps noir est un matériau (théorique) particulier qui absorbe parfaitement toute l'énergie radiative qu'il reçoit. De même le corps noir est une source de rayonnement parfaite en vertu de quoi son absorption tout comme son émissivité (ε) sont égales à 1,0. Le corps noir émet une énergie dont la puissance $E_{cn}(\lambda)$ (en $W m^{-2} \mu m^{-1}$) et la distribution spectrale sont données par la loi de Planck (Seinfeld and Pandis, 1998 ; Guyer and Brownell, 1999) :

$$E_{cn}(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \quad \text{A-I.(1)}$$

λ = longueur d'onde (m)

T = température du corps noir (K)

$C_1 = 2\pi^5 c^2 h = 3,742 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$

$C_2 = ch k^{-1} = 1,439 \cdot 10^4 \text{ W } \mu\text{m K}$

$h_p = 6,6255 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; constante de Planck

$k_b = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; constante de Boltzmann

$c = 2,996 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; célérité des ondes électromagnétiques dans le vide

Les définitions des grandeurs utiles au long de ce chapitre (Absorption, Emission...) sont rappelées en Annexe I.2.

La majeure partie de l'énergie reçue par la Terre provient de l'irradiation solaire qui émet un spectre équivalent à celui d'un corps noir de température 5777 K (Iqbal, 1983). Or la température moyenne à la surface du globe peut être considérée comme relativement stable et constante à l'échelle des temps géologiques. Cela signifie que la Terre et son atmosphère qui émettent comme un corps noir à température ambiante (longues longueurs d'onde thermiques), dissipent à leur tour autant d'énergie radiative dans l'espace qu'elles en absorbent du soleil dans le même temps. Cela correspond environ à 70% de l'insolation moyenne reçue (l'albédo pour le spectre solaire à la surface terrestre étant considéré voisin de 0,3 ; voir à ce propos Kiehl and Trenberth, 1997). Les composantes du rayonnement thermique reçues au sol seront donc issues de deux types de spectres bien distincts (Iqbal, 1983) qui seront détaillés par la suite :

- un spectre de courtes longueurs d'ondes radiatives thermiques (UV-VIS-proche IR) centré autour d'une longueur d'onde de 0,501 μm pour laquelle la puissance est maximale pour le rayonnement solaire (corps noir à 5777 K), radiations diurnes uniquement.
- un spectre de grandes longueurs d'ondes radiatives thermiques (Moyen IR- Lointain IR) d'origine terrestre et centré autour d'une longueur d'onde voisine de 10 μm (corps noir voisin de 288 K), radiation diurne et nocturne.

A-I.2 Le spectre solaire

Source du rayonnement solaire

Au cœur de la sphère gazeuse qu'est le soleil, la réaction de fusion de 4 atomes d'hydrogène H en un hélium He accompagnée d'une légère perte de masse produit une énergie qui se propage aux couches externes essentiellement par transfert radiatif. Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre sur la face éclairée de notre globe est émis par les 500 km externes du soleil appelés la « photosphère » dont la température est proche de 6000 K (Seinfeld and Pandis, 1998).

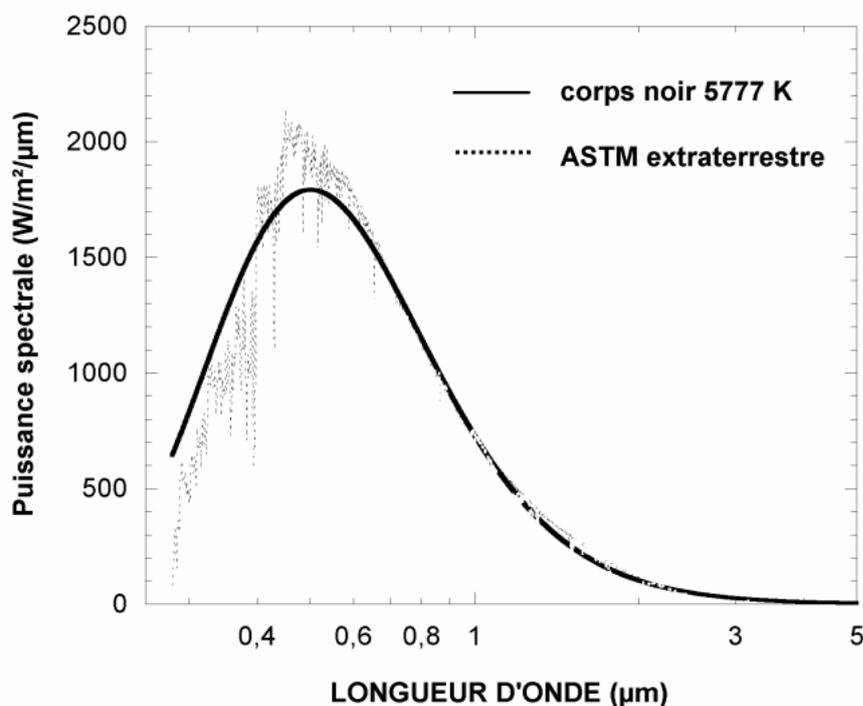


Fig. A-I.1. Trait plein, spectre théorique reçu par l'atmosphère si le soleil était un corps noir idéal avec une température de surface de 5777 K. Pointillés, spectre solaire extraterrestre reçu par l'atmosphère selon le standard ASTM G173-03.

La Figure A-I.1 présente en courbe pointillée l'intensité lumineuse spectrale telle qu'elle serait reçue hors atmosphère si le soleil se comportait comme un corps noir de température 5777 K (considérée comme la température « efficace » du soleil selon Iqbal, 1983). Cette intensité déduite de la loi de Planck est corrigée par le facteur $(r_s/r_0)^2$ pour tenir compte de l'éloignement Terre – Soleil. $r_s \approx 6,9598 \cdot 10^5$ km rayon moyen du soleil ; $r_0 \approx 1,496 \cdot 10^8$ km distance Terre – Soleil.

La courbe en trait plein représente le rayonnement solaire « extraterrestre » standard (c'est-à-dire reçu aux limites externes de l'atmosphère terrestre) tel qu'il est proposé par l'American Society for Testing and Materials (ASTM) sous la dénomination ASTM G173-03. Il est donné comme Spectre de Référence Terrestre pour l'Evaluation des Performances des systèmes Photovoltaïques (TRSPPE ; proposé en 2003 par le Renewable Resource Data Center, RReDC, <http://rredc.nrel.gov/solar/>; voir les travaux de Geynard *et al.*, 2002). Dans le cas réel, la température de surface du soleil n'est pas uniforme et est sujette à des variations sensibles qui entraîne des écarts du rayonnement extraterrestre effectif à celui d'un corps noir à 5777 K occupant une portion de ciel identique à celle occupée par le soleil. Toutefois, la puissance radiative reçue du soleil en limite externe de l'atmosphère a été confirmée par des

mesures spatiales précises poursuivies durant 24 ans (Geyraud, 2004). La constante solaire ainsi déterminée est de $1366,1 \text{ W m}^{-2}$.

Atténuation due à l'atmosphère

Au cours de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire incident est modifié par les phénomènes de diffusion et d'absorption qui en altèrent la puissance, la distribution spectrale ainsi que la direction. La diffusion atmosphérique du rayonnement incident est due à l'interaction des photons avec les molécules de gaz (diffusion de Rayleigh) et les aérosols en suspension dans l'air (diffusion de Mie). La diffusion de Rayleigh atténue les courtes longueurs d'onde ($< 0,55 \mu\text{m}$), ce qui confère au ciel sa couleur bleue. La diffusion de Mie sur les aérosols affecte l'ensemble du spectre solaire, ce qui donne par exemple aux nuages leur aspect laiteux. Au sol, la fraction diffuse du rayonnement solaire varie de 10 à 90 % selon que l'atmosphère est très pure ou très chargée en aérosols (la couverture nuageuse étant dans ce cas un facteur très important ; Guyot, 1999).

L'absorption atmosphérique est due à la nature des différentes phases gazeuses, certaines molécules pouvant absorber les longueurs d'onde correspondant précisément à l'énergie d'excitation de leurs liaisons chimiques constitutives. Les molécules gazeuses à l'origine de bandes d'absorption dans le spectre solaire reçu au sol sont essentiellement H_2O et CO_2 , suivies de O_3 et O_2 dans une moindre mesure. L'atténuation du rayonnement solaire par absorption est de l'ordre de 10 à 15 % du rayonnement extraterrestre.

Dans notre cas, nous nous intéresserons principalement au rayonnement global E_{glob} reçu au niveau de la mer sur une surface horizontale (rayonnements direct + diffus E_{dif}). De manière générale, les ordres de grandeur des éclairagements pour une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith sont fonction de la couverture nuageuse N du ciel (exprimé en 1/8 du demi-espace céleste ou octas) :

- ciel clair ($N = 0/8$) : $E_{\text{glob}} \approx 900 \text{ W m}^{-2}$ dont $E_{\text{dif}} \approx 200 \text{ W m}^{-2}$
- ciel demi-couvert ($N = 4/8$) : $E_{\text{glob}} \approx 800 \text{ W m}^{-2}$ dont $E_{\text{dif}} \approx 350 \text{ W m}^{-2}$
- ciel totalement couvert ($N = 8/8$) : $E_{\text{glob}} \approx E_{\text{dif}} \approx 300 \text{ W m}^{-2}$

Spectre solaire standard au niveau de la mer

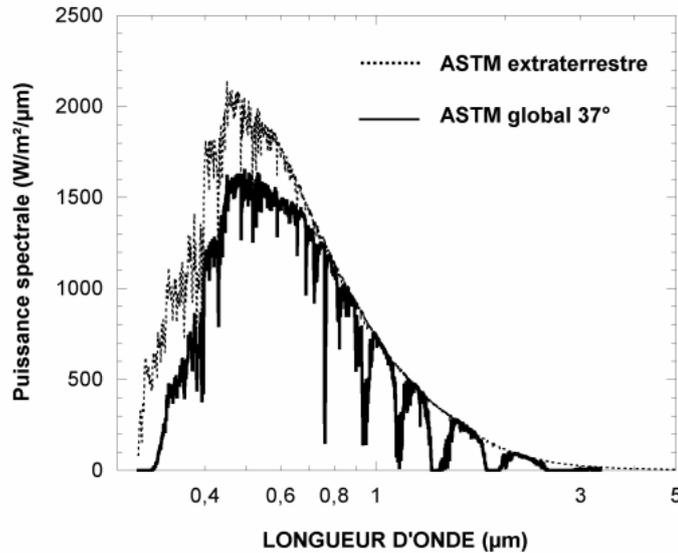


Fig. A-I.2. Trait plein, rayonnement global (direct plus diffus) reçu au niveau de la mer pour des longueurs d'onde de 0,280 à 4,0 μm selon le standard ASTM G173-03. Pointillés, spectre solaire extraterrestre reçu par l'atmosphère selon le standard ASTM G173-03.

La distribution de puissance présentée en Figure A-I.2. en fonction des longueurs d'onde donne une référence commune à l'ensemble des applications nécessitant une appréciation du rayonnement solaire global à la surface terrestre. Le spectre standard a été calculé par la mise en œuvre du modèle numérique de transfert radiatif qui décrit le phénomène d'extinction atmosphérique en fonction de la longueur d'onde incidente par pas variable de 0,5 μm (UV) à 5 μm (proche infrarouge). Il s'agit du modèle de transmission atmosphérique du rayonnement solaire SMARTS2 (Geymard, 2004).

Le paramétrage du modèle numérique est représentatif d'une moyenne raisonnable des conditions rencontrées sur l'ensemble des 48 états continentaux des USA durant une période de 1 an. Plus précisément, le spectre est celui reçu sur un plan incliné à 37° et exposé plein Sud, ce qui correspond au maximum d'ensoleillement mesuré sur une surface plane à une latitude voisine de 37° N (latitude moyenne pour les Etats-Unis d'Amérique) et pour des conditions atmosphériques spécifiques (Geymard *et al.*, 2002) :

- Les température (température au sol de 288 K), pression, densité et composition gazeuse de l'air, densité en aérosols, sont spécifiées pour 33 couches atmosphériques successives dans le standard publié conjointement par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the National Aeronautics and Space

Administration (NASA), and the U.S. Air Force (voir le site de la NASA ; “U.S. Standard Atmosphere 1976”: http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/us_standard.html).

- Une masse d’air absolue de 1,5 (pour un angle au zénith du soleil de $48,19^\circ$)
- Un ciel clair ($N = 0/8$ octas)
- Une colonne totale de vapeur d’eau équivalent à 14,16 mm, une humidité relative au sol de 45 %,
- Une colonne totale d’ozone équivalente à 3,44 mm

Les puissances reçues sur une surface plane sont pour ce standard de 1348 W m^{-2} pour le rayonnement extraterrestre, 1000 W m^{-2} sur un plan faisant face au soleil au niveau du sol (angle de 37° plein sud à nos latitudes). Ces puissances se mesurent à l’aide d’un pyranomètre dont la cellule plane (corps noir de l’UV au proche Infrarouge) mesure le rayonnement global émis dans le demi-espace auquel la cellule est exposée.

A-I.3 Nature du rayonnement IR thermique

Le rayonnement atmosphérique aux grandes longueurs d’onde (Moyen IR, Lointain IR) est émis par la surface et l’atmosphère terrestre en fonction de la température de chaque élément. Le rayonnement infrarouge est émis par les vibrations des liaisons chimiques constitutives du corps (Nyquist *et al*, 1996): vibration d’élongation (oscillations de deux atomes liés, dans l’axe de leur liaison) ou bien vibration de déformation (oscillations de deux atomes liés à un troisième, produisant une variation périodique de l’angle des deux liaisons). Pour les températures ambiantes observées de jour comme de nuit à la surface de la terre, ces types de vibrations émettent un spectre IR idéal centré autour d’un maximum d’émission aux environs de $10 \mu\text{m}$ de longueur d’onde qui est représenté en trait gras sur la Figure A-I.3. Le spectre idéal solaire reçu en haute atmosphère (émission d’un corps noir à 5777 K , trait fin) étant émis par un phénomène différent de transitions d’électrons entre niveaux d’énergie par excitation / relaxation, les spectres solaire et terrestre ne se chevauchent pas (Berdahl, 1995).

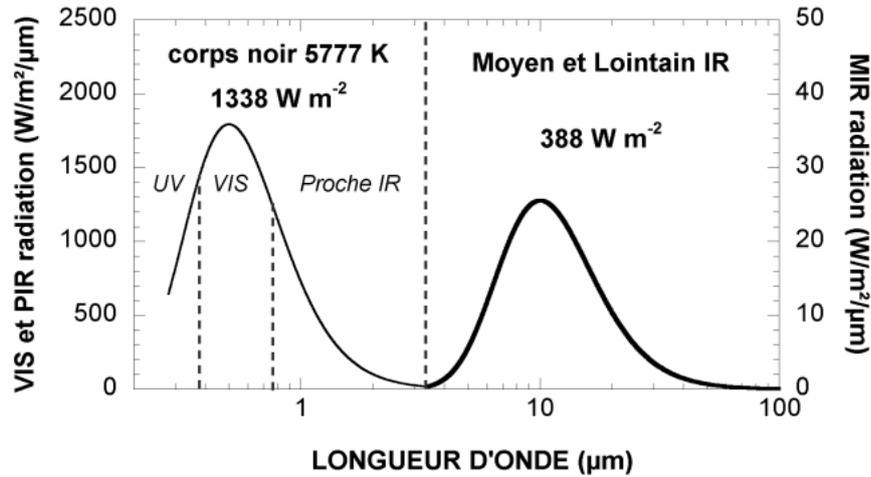


Fig. A-I.3. Rayonnement solaire idéal extraterrestre tel que reçu en haute atmosphère (trait fin, axe gauche). Rayonnement d'un corps noir à température ambiante (288 K, trait plein, axe de droite).

Il est remarquable que l'émittance monochromatique IR maximale de l'atmosphère soit inférieure d'un facteur 80 à la puissance monochromatique maximale reçue du soleil par l'atmosphère terrestre. Cependant, la largeur du spectre IR thermique représente une énergie radiative totale (intégration de la courbe) non négligeable qui vaut $388 W m^{-2}$ pour une atmosphère à $15^{\circ}C$ soit près de 30 % de la puissance solaire extraterrestre reçue. Il est remarquable aussi, qu'étant d'origine terrestre et ne chevauchant pas le spectre solaire, le rayonnement IR thermique local est de même nature et de même ordre de grandeur de jour comme de nuit. Les principales fluctuations du spectre de grandes longueurs d'onde reçu au sol sont dues aux variations de température ambiante et de composition atmosphérique.

Si l'atmosphère gazeuse est relativement transparente sur le domaine spectral du rayonnement visible, elle ne laisse passer le rayonnement que dans un nombre limité de bandes spectrales infrarouges, les « fenêtres atmosphériques ». Pour sa part, la surface terrestre se comporte pratiquement comme un corps gris dont le maximum d'émittance se retrouve vers $10 \mu m$ et dont l'émissivité totale est supérieure à 0,8 bien que dépendante de la nature de la surface (Guyot, 1999). Le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par le sol et les étendues d'eau (mers, océans, lacs) est en partie absorbé par l'atmosphère, principalement par les molécules H_2O , CO_2 , O_3 et O_2 (et dans une moindre mesure par d'autres gaz à effet de serre tels que CH_4 , N_2O et CFCs ; Seinfeld and Pandis, 1998, Garcia, 2004.). Chaque molécule de l'atmosphère réémet alors cette puissance pour des longueurs d'ondes discrétisées (en fonction de sa nature) et une puissance déterminée par sa température (donc suivant son altitude). L'émission étant isotrope, une part de ce rayonnement est réémis vers la surface terrestre, constituant au sol le rayonnement IR de grandes longueurs d'ondes (aussi

communément appelé « effet de serre »). La Figure A-I.4a schématise l'origine de l'énergie radiative que peut recevoir de nuit (absence du spectre solaire) une surface plane quelconque au niveau du sol et sur sa face supérieure.

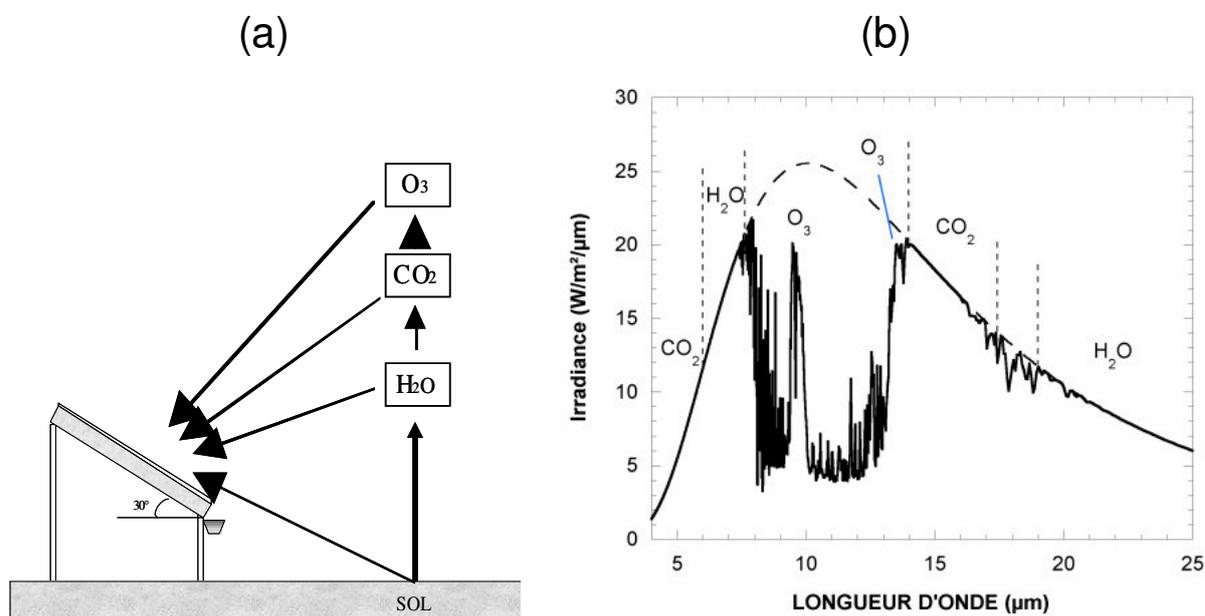


Fig. A-I.4. (a), origine du rayonnement IR que peut recevoir sur sa face supérieur une surface inclinée au niveau du sol. (b), caractéristiques spectrales du rayonnement IR reçu du ciel clair par un plan horizontal (calcul MODTRAN en atmosphère standard US 1976), avec indication des bandes d'émission des principaux gaz contributeurs à ce spectre.

Le spectre du rayonnement thermique IR émis par le ciel au niveau de la mer, Figure A-I.4b, présente les bandes spectrales d'absorption maximales pour chaque molécule, qui sont à l'origine de la répartition du spectre. La bande spectrale 7,5 – 13,5 μm se distingue par une grande transparence de l'atmosphère à l'IR (plage sur laquelle le rayonnement est donc peu émis vers le sol). Dans une moindre mesure, une seconde « fenêtre atmosphérique » est observable sur la plage spectrale 16,25 à 22,5 μm (Awanou, 1998). Selon Seinfeld et Pandis (1998), près de 80% de l'énergie émise par la surface terrestre sur la bande 7 – 13 μm est envoyée dans l'espace (spectre donné par Kiehl and Trenberth, 1997). Seul l'ozone présente un pic d'absorption sur cette fenêtre spectrale, mais sa très haute altitude (donc sa température très basse) limite l'intensité de son émittance. Tout comme O₃, les autres gaz à effet de serre hors CO₂ (CH₄, N₂O et CFCs) présentent une absorption intense sur cette bande, c'est pourquoi des variations infimes de leur concentration entraînent une variation sensible du flux radiatif.

A-I.4 Emissivité équivalente de l'atmosphère, modèles de ciel

Généralement, dans les applications de transfert radiatif pour les longues longueurs d'ondes, la radiance totale du ciel E_s (en W m^{-2} ; intégration du spectre présenté en Figure A-I.4a) est exprimée en fonction d'une température du ciel T_s théorique grâce à la formule de Stefan Boltzmann. De même, E_s s'exprime en fonction de l'émissivité du corps noir à température ambiante au sol T_a pondérée par l'émissivité totale du ciel ε_0 selon la formule suivante :

$$E_s = \sigma(273 + T_s)^4 = \varepsilon_0[\sigma(273 + T_a)^4] \quad \text{A-I.(2)}$$

T_a température ambiante en ($^{\circ}\text{C}$)

T_s température équivalente du ciel ($^{\circ}\text{C}$)

$0,0 < \varepsilon_0 < 1,0$

L'émissivité de la voûte céleste pour les grandes longueurs d'onde est complexe à estimer car elle dépend de paramètres aussi divers que la répartition des espèces chimiques dans la hauteur de l'atmosphère (y compris la couverture nuageuse), la distribution des températures et la nature de la surface terrestre. Le rayonnement IR atmosphérique incident peut être estimé par des mesures de radiométrie, ce qui a donné lieu aux premières références de ciel (Robinson, 1966). Des premiers modèles de Bliss (1961), cités par Berger and Bathiebo, 2003 à ceux de Prata (1996), il peut être calculé à partir de la connaissance des distributions des températures et de la composition gazeuse de l'atmosphère. Enfin, la simplification de ces précédents modèles et leur correction par des paramètres empiriques issus des mesures ont donné lieu à la proposition de différentes formules donnant l'intensité totale reçue du ciel en fonction de grandeurs météorologiques simples telles que la température ambiante T_a ou la température de rosée T_d relevées au niveau du sol.

A-I.4.1 Modèles numériques

Trois principaux types de modèles sont généralement développés pour prédire et analyser l'irradiation spectrale à la surface de la Terre : modèles calculatoires sophistiqués et rigoureux, modèles physiques semi-empiriques ou bien paramétrages empiriques à partir de mesures. Dans la première catégorie se classent les différents codes de calcul numérique qui déterminent les émissivités spectrales du ciel ainsi que l'émissivité globale qui en est l'intégration. Le plus utilisé est certainement MODTRAN développé par le « Air Force

Research Laboratory » succédant à la famille de logiciels LOWTRAN (Berk *et al.*, 1998 ; Geymard, 2001). Ces types de modèles considèrent que l'atmosphère est constituée de différentes couches superposées horizontalement et dont la composition peut être spécifiée suivant les modèles standard (type USSA 1976) ou bien peut être paramétrée d'après la mesure des profils verticaux de constituants gazeux et aérosols (par ballon sonde entre autre). MODTRAN permet le calcul des modèles sur l'ensemble du spectre de rayonnement électromagnétique (UV, Visible, proche IR, IR thermique...) avec une résolution effective annoncée de 2 cm^{-1} (Geymard *et al.*, 2002). MODTRAN a recours à un algorithme de transfert radiatif FASCODE qui permet le calcul des transferts à travers les couches atmosphériques successives. FASCODE possède une base de données internationale et standard des absorptions spectrales de 38 composants gazeux de l'atmosphère terrestre, HITRAN. Le spectre donné Figure A-I.4b, a été obtenu à l'aide d'une interface en ligne de MODTRAN (University of Chicago, 2006) dont les paramètres retenus ont été les suivants : $\text{CO}_2 = 375 \text{ ppm}$; $\text{CH}_4 = 1,7 \text{ ppm}$; Trop.Ozone = 28 pp ; Strat.Ozone scale = 1 ; Ground Temp. Offset = $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (soit T_a équivalent à 288,1 K) ; water vaper scale = 1 ; Locality : 1976 USSA ; sky : No clouds or rain (équivalent ciel clair) ; altitude = 0,0 km ; sensor : « looking up » (équivalent à la mesure du rayonnement émis par le ciel sur une cellule horizontale). Ce programme permet de définir les standards d'étude et propose d'inclure l'ensemble des paramètres possibles issus de mesures ou d'observation (profils atmosphériques, couverture nuageuse : type de nuage, altitude de la base... Skartveit *et al.*, 1996).

D'autres modèles aux paramètres simplifiés sont parfois plus appropriés pour les applications en ingénierie des systèmes énergétiques solaires. Ces outils intègrent notamment des modèles de référence pour différentes atmosphères et différents climats (tropicales, hémisphère Nord... et différentes natures de couvertures nuageuses courantes, Mayer and Killing, 2005). En particulier, deux modèles couvrant le spectre des courtes longueurs d'onde aussi bien que celui du rayonnement thermique m'ont été conseillés par Monsieur Christian A. Geymard. Il s'agit de libradtran (Mayer and Killing, 2005, ainsi que « The Libradtran homepage » : <http://www.libradtran.org/>) et SBDART (University of California : http://www.icesb.ucsb.edu/esrg/pauls_dir/). Ces modèles ne se fient pas juste sur les conditions au sol comme la littérature "empirique" mais sur les profils de T_a et RH dans l'atmosphère. Ils peuvent donc fournir des réponses différentes entre l'atmosphère standard USSA et une autre atmosphère standard (ou expérimentale), même si les conditions au sol sont les mêmes. Ils peuvent aussi calculer la radiance, donc la distribution angulaire du flux IR à travers le ciel. Ceci est intéressant pour des dispositifs ne voyant pas l'ensemble du ciel.

A-I.4.2 Modèles physiques (semi empiriques)

Tous les modèles calculatoires exploitent la puissance de calcul de l'outil informatique pour résoudre un ensemble d'équations physiques qui décrivent les phénomènes optiques et radiatifs de l'atmosphère. La précision de l'approximation calculatoire dépend du pas de discrétisation des couches atmosphériques, du nombre de composés gazeux ou sous forme d'aérosols pris en compte et de la résolution spectrale. Les modèles physiques suivent la même démarche mais en se basant sur des modèles d'atmosphères simplifiés (parfois par des corrections empiriques) afin d'alléger la charge de calcul (Elsasser, 1942 ; d'après Robinson, 1966). Les principaux modèles physiques développés par la suite sont l'œuvre de Bliss (1961), Brutsaert (1975) et Prata (1996) selon Garcia, 2004.

Le premier modèle présenté par R. A. Bliss assimile l'atmosphère à une colonne de gaz qu'il représente comme une succession de couches parallèles toutes à mêmes température, pression et composition. Il ne s'agit pas ici de détailler l'ensemble du travail mais de présenter comment dans sa formulation, ce modèle extrêmement simplifié ouvrirait la voie à des descriptions physiques plus précises. R. A. Bliss donne une expression pour l'émissivité spectrale $\varepsilon(\lambda, \theta)$ du ciel dans la direction θ (angle par rapport au zénith) correspondant qui est la suivante (d'après Awanou, 1998) :

$$\varepsilon(\lambda, \theta) = 1 - \exp \left[- \left(k_\lambda m_\lambda / \cos \theta \right) \right] \quad \text{A-I.(3)}$$

Où k_λ est le coefficient d'absorption des gaz atmosphériques (cm^{-1}), dépend de la longueur d'onde.

m_λ est la quantité d'absorbeur (g/cm^3)

Intégrée sur l'ensemble du demi-espace cette expression donne l'émissivité ε_0 du ciel à partir d'une valeur de $k_\lambda m_\lambda$ déterminée expérimentalement et pour une structure de ciel donné. L'intérêt de ce modèle semi empirique est qu'il tient compte de la variation de l'épaisseur de l'atmosphère vue dans un angle solide et donc de la variation angulaire de l'émissivité minimale au zénith et voisine de 1,0 à proximité du sol.

Deux modèles font suite à celui de Bliss, le modèle de Brutsaert (1975) et celui de Prata (1996). Bien qu'ils dépendent de paramètres mesurés en surface (au sol), leurs formulations permettent d'intégrer des profils de composés ou de température dans le ciel qui soient non standards et l'influence de la structure du ciel sur la variation de T_s peut être approchée. Deux

grandeurs quantifiant les profils de vapeur d'eau et de température dans l'atmosphère sont introduites :

- k_w (km^{-1}), inverse de la hauteur de vapeur d'eau atmosphérique (km). Une valeur commune en climat tempéré est $k_w = 0,45 \text{ km}^{-1}$. A noter que cette valeur décroît sensiblement de nuit (Holdaway *et al.*, 1996). Cette grandeur permet dans les modèles d'exprimer une décroissance exponentielle de la densité atmosphérique de vapeur d'eau (ρ_w , g m^{-3}) avec l'altitude suivant la formule utilisée par Brutsaert (z est l'altitude, ρ_0 est la densité de vapeur d'eau au sol) :

$$\rho_w(z) = \rho_0 \exp(-k_w z) \quad \text{A-I.(4)}$$

Avec γ_T ($^{\circ}\text{C km}^{-1}$), le taux de décroissance verticale de la température dans l'atmosphère (une valeur standard souvent utilisée est de $6,5 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$), la température en fonction de l'altitude z (km) et de la température ambiante au sol T_a s'écrit:

$$T(z) = T_a \exp\left(-\frac{\gamma_T}{T_a} z\right) \quad \text{A-I.(5)}$$

Brutsaert (1975) propose la formule suivante déterminant l'émissivité totale du ciel pour un ciel clair ε_0 intégrée sur l'ensemble du demi-espace :

$$\varepsilon_0(T_a, P_e) = 0,107 \left(\frac{0,622}{R_a (k_w + 0,065)} \right)^{1/4} \cdot B \left(\frac{4\gamma_T / T_a + k_w + 0,065}{k_w + 0,065} \cdot \frac{1}{7} \right) \cdot \left(\frac{P_e}{T_a} \right)^{1/4} \quad \text{A-I.(6)}$$

P_e , (hPa) est la pression partielle de vapeur au sol

T_a , température (K)

R_a , ratio entre la constante des gaz parfaits et la masse molaire de l'air sec, $B(z, w)$ est la fonction mathématique « Béta », donnée entre autre par Abramowitz and Stegun, 1972 d'après Garcia and De Luis, 2000.

Pour sa part, Prata proposa en 1996 une formulation plus précise de l'émissivité du ciel par ciel clair grâce à un ajustement expérimental affiné de l'émissivité d'une couche atmosphérique individuelle :

$$\varepsilon_0(T_a, P_e) = 1 - (1 + \xi) \exp\left(- (1,2 + 3,0\xi)^{1/2}\right) \quad \text{A-I.(7)}$$

avec

$$\xi = \frac{1}{1,006 \cdot R_a (k_w + \gamma_T / T_a)} \left(\frac{P_e}{T_a} \right) \quad \text{A-I.(8)}$$

Ce modèle est désormais largement utilisé comme référence, notamment par Météo France (Brisson, *et al.*, 2000).

A-I.4.3 Modèles empiriques

Il est notable que plus de la moitié du flux radiatif reçu au niveau du sol est émis par les gaz contenu dans la couche atmosphérique la plus basse des premiers 100 m, tandis que environ 90% de cette puissance radiative provient des 1000 premiers mètres de l'atmosphère. C'est pourquoi la valeur du flux IR thermique au niveau du sol est grandement déterminée par les gradients de température et d'humidité à proximité du sol (Monteith and Unsworth, 1990). La troisième classe de modèles d'émissivité de la radiation IR thermique incidente est issue de corrélations empiriques de mesures expérimentales de radiométrie avec les données météorologiques mesurées au sol : $\varepsilon_s(T_a, T_d, N)$, avec T_d la température de rosée et N la nébulosité (octas). Ces modèles présentent donc une précision optimale dans des conditions proches des sites d'implantation des stations de mesure (latitude, climat...). Ils proposent souvent un panel de coefficients à choisir en fonction du lieu, de la saison, de l'heure (jour, nuit) ; il est donc important de choisir le modèle avec soin en fonction de son propre usage. Skartveit *et al.* (1996) ont dénombré 23 expressions simples, proposées pour obtenir l'émissivité ε_0 d'un ciel clair ($N=0$).

Les formules de modèles physiques de Bliss (1961), Brutsaert (1975) et Prata (1996) précédemment citées et dans leur forme simplifiée par un paramétrage empirique sont fréquemment utilisées pour obtenir l'émissivité thermique du ciel clair :

Formule empirique de Bliss (T_d en °C), selon Berger *et al.*, 1983 :

$$\varepsilon_0(T_d) = 0,8004 + 0,00396 \cdot T_d \quad \text{A-I.(9)}$$

Formule empirique de Brutsaert, P_e (hPa) ; T_a (K) :

$$\varepsilon_0 = 1,24 \cdot \left(\frac{P_e}{T_a} \right)^{1/7} \quad \text{A-I.(10)}$$

Formule empirique de Prata, P_e (hPa) ; T_a (K) :

$$\varepsilon_0 = 1 - \left[1 + 46,5 \left(\frac{P_e}{T_a} \right) \right] \cdot \exp \left(- \left[1,2 + 139,5 \left(\frac{P_e}{T_a} \right) \right]^{1/2} \right) \quad \text{A-I.(11)}$$

Le modèle proposé par Martin et Berdahl (1983) a été et demeure la référence la plus universellement citée. Les données de 6 stations de mesure dispersées sur le territoire des USA pour une durée d'acquisition de 57 mois ont permis d'obtenir ces corrélations (Berdahl and Martin, 1983 ; Martin and Berdahl, 1984ab). La formule est la suivante avec T_d (°C) (Martin and Berdahl, 1984b ; Nilsson 1994; Garcia and De Luis, 2002) :

$$\varepsilon_0(T_d) = 0,711 + 0,56 \left(\frac{T_d}{100} \right) + 0,73 \left(\frac{T_d}{100} \right)^2 \quad \text{A-I.(12)}$$

Avec une corrélation en fonction de l'heure du jour t par ce terme additionnel :

$$\Delta\varepsilon_0 = 0,013 \cos \left(\frac{2\pi t}{24} \right) \quad \text{A-I.(13)}$$

Précisons que si les deux modèles les plus utilisés aujourd'hui sont celui de Martin et Berdahl, Eq. A-1.(12) et A-1.(13), ou celui de Prata, Eq. A-1.(11), il est intéressant de citer le modèle d'irradiance spectrale de Berger and Bathiebo, 1988. En effet, contrairement aux modèles physiques (Bliss, Brutsaert, Prata) ou calculatoires (Lowtran, Modtran...), celui-ci propose uniquement à partir de données mesurées au niveau du sol, T_a et T_d , des corrélations donnant l'émissivité équivalente du ciel sur des bandes spectrales définies et qui couvrent l'ensemble du spectre thermique. Ce modèle a montré une très bonne corrélation avec des données prélevées sur 15 stations en Europe et Amérique du Nord ainsi qu'avec des spectres obtenus par le programme MODTRAN (Skartveit *et al.*, 1996).

Enfin, les modèles empiriques proposent des corrections sur ε_0 pour estimer l'influence sur l'irradiation totale de la couverture nuageuse ou encore de l'altitude. De nombreuses corrélations existent pour déterminer ε_s par ciel couvert, nous utiliserons la formule de Pedro et Gillespie (1982), formule qui prend en compte la couverture nuageuse N et la température ambiante (cité dans Beysens *et al.*, 2004) :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \frac{N}{8} \left(1 - \varepsilon_0 - \frac{8}{T_a + 273} \right) \quad \text{A-I.(14)}$$

$0.0 < N/8 < 1,0$ fraction du ciel couverte par les nuages

Les auteurs proposent leur propre calcul de l'émissivité d'un ciel clair ε_0 (T_a en °C) :

$$\varepsilon_0 = 0,72 + 0,005T_a \quad \text{A-I.(15)}$$

L'Eq. A-1.(4) exprime une décroissance exponentielle de la densité atmosphérique de vapeur d'eau (ρ_w , g m^{-3}) avec l'altitude, décroissance dont les modèles physiques semi empiriques tiennent compte. Il est possible d'obtenir une valeur de l'émissivité apparente du ciel $\varepsilon_s(z)$ en fonction du point de rosée T_d (°C) mesuré au sol grâce à la formule de Berger *et al.*, 1992. Cette formule est du type :

$$\varepsilon_s(z) = B_1 + B_2 \cdot 10^{-3} T_d \quad \text{A-I.(16)}$$

B_1 et B_2 sont des coefficients obtenus par régression linéaire à partir de données expérimentales, se rapporter à la référence Berger *et al.*, 1992.

L'atmosphère terrestre n'est pas homogène, et le rayonnement IR nocturne du ciel est la somme aussi bien de l'émission de l'ozone à très haute altitude et basse température que de la vapeur d'eau au niveau du sol et à température ambiante. Nous avons vu que de nombreux travaux avaient pour but de modéliser l'atmosphère comme une succession de couches de composition et températures différentes. Ainsi, il est possible de définir une émissivité angulaire $\varepsilon_{s,\theta}$ de la voûte céleste en fonction de l'émissivité totale ε_s décrite précédemment. Nous utiliserons par la suite la formule proposée par Berger and Bathiebo, 2003 reprenant les travaux de Martin and Berdahl, 1984a :

$$\varepsilon_{s,\theta} = 1 - (1 - \varepsilon_s)^{1/b \times \cos \theta} \quad \text{A-I.(17)}$$

$$b = 1,66$$

θ angle par rapport au zénith dans le repère sphérique associé au ciel, expression valable pour $0 < \theta < \pi/2$

ANNEXE I.2

Lexique du rayonnement

Absorption (a) : Mesure du phénomène physique qui revient pour un corps à absorber un rayonnement en augmentant d'autant son énergie interne. C'est le quotient du rayonnement quelconque absorbé par un corps sur la quantité de rayonnement incident sur ce même corps. Soit $a = I / I_0 = 1 - R - T$ (sans dimension, $0 < a < 1$), où I est l'intensité du rayonnement absorbé, I_0 l'intensité du rayonnement incident, R est la réflectance et T est la transmittance.

Absorbance (A) : Grandeur quantifiant l'atténuation d'un rayonnement lumineux à travers un corps. A est souvent calculée expérimentalement selon des formules variant en fonction de la discipline scientifique.

Emittance ou Emission ou Radiance (E) : quantité de rayonnement émis par un corps à une température donnée par unité de surface ($W m^{-2}$).

Émissivité (ϵ) : c'est le quotient du rayonnement émis (radiance) par un corps quelconque divisé par l'émission (ou radiance) correspondante d'un corps noir à la même température. L'absorption est égale à l'émissivité pour des corps à température constante (principe énoncé par Kirchhoff en 1859 ; Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 1990). $\epsilon = a = 1 - R - T$ (sans dimension, $0 < \epsilon < 1$).

Réflectance ou Réflexion (R) : proportion du rayonnement total incident sur un corps qui est réfléchi par ce corps (exprimé sans dimension, $0 < R < 1$ ou en %). La réflexion spéculaire caractérise le rayonnement réfléchi avec un angle à la normale identique à l'angle d'incidence et dans le plan décrit par le rayon incident et la normale. La réflexion diffuse caractérise toute réflexion non spéculaire.

Transmittance ou Transmission (T) : Proportion du rayonnement total incident sur une face du corps qui traverse ce corps sans être absorbée (exprimé sans dimension, $0 < T < 1$ ou en %). La transmission spéculaire pour un dioptré plan caractérise le rayonnement transmis dans une direction parallèle au rayon entrant. La transmittance diffuse caractérise toute transmission de direction non spéculaire.

Absorption, Émissivité, Réflectance et Transmittance peuvent être **spectrales** (le quotient de la valeur a , ε , R ou T à une longueur d'onde spécifique ou pour une bande spectrale très mince sur celle du corps noir à la même température) ou bien **totales** (le quotient de la valeur a , ε , R ou T intégrée pour tout le spectre sur celle du corps noir à la même température).

Corps Noir (CN) : Un corps a la propriété de corps noir sur une plage spectrale si il absorbe l'intégralité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit et de longueurs d'onde appartenant à ce spectre. Le corps noir est aussi une source parfaite de rayonnement sur cette plage spectrale, a et ε sont égales à 1.0 et le spectre d'émission suit la loi de Planck.

Corps gris : c'est un corps dont l'Émissivité est constante (égale pour toutes les longueurs d'onde) sur tout le spectre.

ANNEXE II

ANNEXE II-1

Nombre de Nusselt pour des systèmes complexes

Pour des plans inclinés et succession de plans, certaines corrélations expérimentales ont été réalisées, cependant ce sont le plus souvent des modèles donnant la convection libre, à l'exemple de Nu_L calculé pour un plan incliné (Guyer and Brownell, 1999). La corrélation est valable pour un angle d'inclinaison par rapport à la verticale $0 \leq \theta \leq 85^\circ$, soit pour une pente supérieure à 5° :

$$Nu_{LL} = \frac{2,8}{\ln \left[1 + 2,8 / \left(C_L (\text{Pr} \cdot Gr \cdot \cos \theta)^{1/4} \right) \right]} \text{ en flux laminaire avec} \quad \text{A-II.(1)}$$

$$C_L = \frac{0,671}{\left[1 + (0,492 / \text{Pr})^{9/16} \right]^{4/9}}$$

$$Nu_{LT} = \frac{0,13 \text{ Pr}^{0,22}}{\left[1 + 0,61 \text{ Pr}^{0,81} \right]^{0,42}} 0,14 (\sin \theta)^{1/3} (\text{Pr} \cdot Gr)^{1/3} \text{ en flux} \quad \text{A-II.(2)}$$

turbulent pour $20 \leq \theta \leq 85^\circ$ (suit une pente de 5 à 70°).

$$Nu_L = \left[(Nu_{LL})^6 + (Nu_{LT})^6 \right]^{1/6} \quad \text{A-II.(3)}$$

Une formulation alternative est utilisée par Kounouhewa and Awanou (1999), afin de décrire le transfert thermique par convection libre sur un plan incliné (flux laminaire et turbulent). Les termes notés $^+$ sont pris en compte s'ils sont positifs. Dans le cas contraire, ils sont considérés comme nuls :

$$Nu_L = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{(\text{Pr} \cdot Gr) \cos \theta} \right)^+ \left(1 - \frac{[\sin(1,8 \theta)]^{1,6} \cdot 1708}{(\text{Pr} \cdot Gr) \cos \theta} \right)^+ + \left(\left(\frac{(\text{Pr} \cdot Gr) \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right)^+ \quad \text{A-II.(4)}$$

Guyer and Brownell (1999) donnent également un coefficient d'échange thermique adimensionnel pour une succession de plans tous inclinés d'un angle θ avec la verticale. L'ensemble forme une surface ondulée horizontale ou une succession de cônes elliptiques infiniment étirés, ce qui est une configuration très intéressante pour un condenseur radiatif. Si la largeur du système est grande devant la profondeur des ondulations et si L_C est la distance entre l'arête et le fond d'un même motif, alors le Nusselt s'écrit :

$$Nu_{LL} = \left(\frac{0,46}{\sin \theta} - 0,32 \right) (\text{Pr} \cdot Gr)^{(0,148 \sin \theta + 0,187)} \quad \text{en flux laminaire} \quad \text{A-II.(5)}$$

avec $2 \cdot 10^4 < \text{Pr} \cdot Gr < (15,8 - 14 \sin \theta) \cdot 10^5$

$$Nu_{LT} = \left(\frac{0,054}{\sin \theta} + 0,09 \right) (\text{Pr} \cdot Gr)^{1/3} \quad \text{en flux turbulent si} \quad \text{A-II.(6)}$$

$(15,8 - 14 \sin \theta) \cdot 10^5 < \text{Pr} \cdot Gr < 2 \cdot 10^7$