HAL
open science

Systèmes énergétiques pour la production d'eau douce potable et d'électricité

Marc Muselli

To cite this version:

Marc Muselli. Systèmes énergétiques pour la production d'eau douce potable et d'électricité. Physique [physics]. Université Pascal Paoli, 2007. tel-00603643

HAL Id: tel-00603643

https://theses.hal.science/tel-00603643v1

Submitted on 28 Jun 2011

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

DISCIPLINE : PHYSIQUE, ENERGETIQUE GENIE DES PROCEDES

SYSTEMES ENERGETIQUES POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE ET D'EAU DOUCE POTABLE

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

MARC MUSELLI

LE

28-09-2007

JURY

M. GARRABOS YVES	DR, INST. CHIMIE DE LA MATIERE CONDENSEE DE BORDEAUX
M. MULLER JEAN-CLAUDE	PR, INST. D'ELECTRONIQUE DU SOLIDE ET DES SYSTEMES
M. LAMBERT DOMINIQUE	MCF HDR, UNIVERSITE PAUL SABATIER, LABO D'AEROLOGIE
M. AIELLO ANTOINE	PR, PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE CORSE
M. BALBI JACQUES-HENRI	PR, DIR. LAB. UMR CNRS 6134, U. DE CORSE
M. LOUCHE ALAIN	PR, U. DE CORSE
M. BEYSENS DANIEL	DR, EC. SUPERIEURE DE PHYSIQUE ET CHIMIE INDUSTRIELLE

AVANT PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein de l'Equipe « Energies Renouvelables » du laboratoire Systèmes Physiques de l'Environnement de l'Université de Corse, associée au CNRS (UMR 6134) dans le cadre d'un projet structurant (projet ENR).

Je suis très sensible à l'honneur que me font Messieurs Yves GARRABOS (CEA – ICMCB, Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux), Jean-Claude MULLER (InESS, Institut d'Electronique du Solide et des Systèmes), Dominique LAMBERT (Laboratoire d'Aérologie - Université Paul Sabatier de Toulouse), en acceptant d'examiner ce travail. Je suis très heureux de bénéficier de leur expertise et je tiens à leur exprimer ma sincère reconnaissance pour cette marque d'intérêt.

Je tiens également à remercier Messieurs Antoine AIELLO (Président de l'Université de Corse, UDC), Jacques-Henri BALBI (Université de Corse) et Alain LOUCHE (Université de Corse) pour leur participation à cette commission d'examen d'Habilitation à Diriger des Recherches.

Que Monsieur Daniel BEYSENS (CEA – ESPCI, Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles) trouve ici ma gratitude et mes remerciements pour son amitié, ses conseils et pour l'ensemble du parcours de recherches que nous menons dans le cadre d'une convention de partenariat liant nos deux équipes au CNRS depuis l'année 2000.

Enfin, je tiens à souligner que ce travail n'aurait pu être accompli sans l'effort financier consenti par plusieurs organismes comme l'UDC, le CNRS, le CEA, le Ministère de l'Outre Mer, Veolia Environnement, la Collectivité Territoriale de Corse qui a soutenu ces travaux par l'octroi d'une bourse de recherches pour un étudiant de l'UDC (Owen CLUS) et par un apport financier sur les appels à projets, mais également OSEO-ANVAR qui a financé une grande partie des études liées aux simulations numériques de systèmes complexes pour le refroidissement radiatif.

Dans le cadre de ces travaux, de nombreuses collaborations et conventions de recherches ont été établies afin de mener à bien des thématiques novatrices à l'échelle internationale pour des besoins au quotidien de populations isolées.

Que ce soit en Croatie (Marina MILETA, Institut Météorologique et Hydrologique de Zagreb), Polynésie Française (Pascal ORTEGA, Université de Polynésie Française), Inde (Girja SHARAN, Indian Institute of Management), ou tout simplement en France (Vadim NIKOLAYEV, CEA ; Irène MILIMOUK, CNRS et OPUR ; Jalil OUAZZANI, Arcofluid ; HELION, Patrick BOUCHARD ; CEA-LITEN, Florence MATTERA et Pierre SERRECOMBE), je souhaiterais exprimer toute ma reconnaissance à tous nos partenaires et les remercier de nos échanges scientifiques fructueux.

Je ne saurai oublier mes collègues de l'Equipe « Energies Renouvelables », Messieurs Jean-Louis CANALETTI, Christian CRISTOFARI, Nicolas HERAUD, Gilles NOTTON et Philippe POGGI ainsi que tous les membres du laboratoire de Vignola (enseignant-chercheurs, chercheurs, personnels administratifs, doctorants et stagiaires).

A Pierre-Antoine, Marie-Laure

A toute ma famille.

SOMMAIRE

INTRODUCTION **1**

I PREMIERE PARTIE

La vapeur d'eau atmosphérique, une source renouvelable en eau inexploitée

I.1 Introduction **7**

I.2 Etat de l'art des systèmes de production d'eau douce **11**

I.2.1 Le dessalement de l'eau de mer (système actif) 11

I.2.2 Les condenseurs à eau de mer (système actif) 12

I.2.3 Les filets à brouillard (système passif) 13

I.2.4 La condensation de la vapeur d'eau : rosée artificielle (système passif) 13

I.3 Protocoles expérimentaux d'estimation de la ressource « vapeur d'eau » (1999 – 2007) **15**

I.3.1 La condensation de rosée, pourquoi l'envisager ? 15

i. Protocole de mesure N°1 : balance électronique *16*

ii. Protocole de mesure N°2 : condenseur étalon *19*

I.3.2 Etudes quantitative et qualitative de la ressource sur PMMA 20

i. Etude quantitative de la ressource vapeur d'eau atmosphérique condensée *20*

ii. Etude qualitative de la ressource vapeur d'eau atmosphérique condensée *23*

I.4 Corrélation des mesures avec les observations météorologiques **29**

I.4.1 Facteur de forme 31

I.4.2 Direction du vent *Dir* (°) 31

I.4.3 Vitesse du vent V (m s^{-1}) à 10 m 34

i. Micrométéorologie et utilisation de coupe-vent *34*

ii. Vitesse du vent et humidité *39*

I.4.4 Couverture nuageuse *N* (octas) …… 41

I.4.5 Rayonnement thermique du ciel …….. 42

I.4.6 Estimation quantitative du rendement de rosée sans mesure physique ……45

i. Protocole de mesure N°3 – Application à un système en toiture (Biševo) *45*

ii. Utilisation des capteurs AF pour l'estimation de la ressource *47*

I.5 Maquette (échelle 1/10ème) d'un condenseur radiatif (2000-2002) …….. 52

I.6 Construction des condenseurs radiatifs « aile-plan » de 30 m² (2000-2003) ….. 56

I.6.1 Prototypes « plan » P1, P2 : 30 m² ……..57

I.6.2 Principaux résultats …….. 58

I.7 Modélisation thermodynamique et hydrodynamique du phénomène de condensation de vapeur d'eau atmosphérique sur un capteur plan …… 61

I.8 Définition d'un matériau de condensation innovant (2004) …….. 64

I.8.1 Refroidissement radiatif …….. 65

I.8.2 Cahier des charges et définition des nouveaux matériaux ……67

I.8.3 Mise en œuvre et résultats ……68

I.9 Outils de simulations CFD pour l'analyse (a priori) de l'efficacité des radiateurs thermiques (2005) ……72

I.9.1 Lois de dissipation d'énergie pour le refroidissement radiatif …….. 73

I.9.2 Modèle numérique programmé sous PHOENICS ……75

I.9.3 Expérimentation : condenseur conique 7,32 m² …….. 75

I.9.4 Validation de la méthodologie complète …….. 77

I.10 Transition prototype de laboratoire / Système réel (2005-2007) ……79

I.10.1 Toiture de démonstration 15 m² (Biševo, Croatie) ……..79

i. Site et collaboration *79*

ii. Ressource actuelle en eau *80*

iii. Sélection de la surface de condensation (matériau commercial) *81*

iv. Simulation numérique *82*

v. Résultats – Rendements mesurés *83*

vi. Conclusion et perspectives *84*

I.10.2 Collecteur à grande échelle 15000 m² (Panandhro, Inde) …….. 84

i. Site et collaboration *84*

ii. Ressource actuelle en eau *85*

iii. Simulation numérique *85*

iv. Expérimentation *89*

v. Résultats partiels – Rendements mesurés *89*

vi. Conclusion et perspectives *91*

I.11 Conclusion ……..92

II SECONDE PARTIE

Les systèmes énergétiques à sources renouvelables d'énergie

II.1 Introduction …….. 96

II.2 Estimation physique des ressources renouvelables …….. 102

II.2.1 Modélisation physique et approches statistiques de la ressource …….. 103

i. Composantes du rayonnement solaire 103

ii. Méthodologie de classification en journée-type 113

II.2.2 Générateurs de profils de l'intrant à l'aide de modèles auto-régressifs ……118

II.3 Systèmes énergétiques à SRE (sources renouvelables d'énergie) pour les sites isolés ……126

II.3.1 Utilisation rationnelle de l'énergie ……127

II.3.2 Photovoltaïque et/ou éolien en alimentation de sites isolés …….. 128

II.3.3 Systèmes hybrides en alimentation de sites isolés …… 135

II.3.4 Systèmes hybrides énergies renouvelables - hydrogène …….. 140

II.4 Systèmes énergétiques à SRE en connexion au réseau électrique ……..147

II.4.1 Etude du couplage champ PV/onduleur – Réseau de distribution …….. 147

II.4.2 Champ photovoltaïque pour application au relevage des chutes de tension …….. 156

II.4.3 Système hybride EnR-H_2 pour la production d'électricité sur un réseau de distribution – Projet MYRTE ……161

II.5 Conclusion ……166

CONCLUSION GENERALE ……167

BIBLIOGRAPHIE …….. 173

NOMENCLATURE …….. 191

ANNEXE I : Coefficients Statistiques …….. 200

ANNEXE II : Notice Individuelle (CV ; responsabilités administratives, pédagogiques, enseignements, recherches) …….…….…….…….…….... **202**

INTRODUCTION

La raréfaction de la ressource « pétrole » à travers le Monde (ressource estimée à moins d'un siècle en 2005), pose l'épineux problème de l'accès à l'eau potable et à l'électricité pour des populations isolées en stress hydrique ou situées loin des centres de transport et de distribution de ce vecteur énergétique.

Le dernier Sommet Mondial sur le Développement Durable en Afrique du Sud (Johannesburg, 26/8-4/9/2002) a placé l'accès à l'eau potable et à l'électrification comme des priorités pour réduire la pauvreté et préserver l'environnement. Les conclusions de cette conférence insistent sur l'absolue nécessité de recourir à une diversification des ressources alternatives en eau pour l'approvisionnement des populations afin de leur éviter des déplacements loin de leur lieu de vie habituel. De même, l'utilisation plus importante des énergies renouvelables au détriment des ressources conventionnelles comme le pétrole doit pemettre à des populations d'avoir accès à l'électricité afin de leur conférer un niveau de vie acceptable au 21ème siècle tout en respectant l'environnement, en évitant des productions intensives de gaz à effet de serre.

Ces conclusions alarmistes sont confirmées par le dernier rapport du GIEC en Mars 2007 (Groupe d'experts Interdépartemental d'Etude du Climat), qui prévoit pour 2080, une forte augmentation de la population en stress hydrique, soit plus de 3 milliards d'individus sans accès à de l'eau potable indispensable à leur survie (1,1 milliard avec moins de 15 L/jr en 2007 selon l'ONU, l'UNICEF et la FAO). Le manque d'eau potable dans certaines régions du Globe conduit au décès prématuré de 2 à 8 millions de personnes par an. Les populations touchées sont de plus, résidentes dans des pays à faibles potentiels technologiques et économiques limitant ainsi une diffusion rapide des techniques industrielles présentes sur le marché. Devant des constats désastreux, l'anticipation de nouvelles ressources en eau peut apporter à ces populations, en climat aride ou semi-aride, le minimum vital recommandé par l'OMS pour la boisson (Organisation Mondiale de la Santé) soit 2 L/jr pour un adulte et 1 L/jr pour un enfant de 10 kg.

L'accès à l'eau peut permettre dans certains cas de limiter le nomadisme afin de les fixer sur une région et débuter une micro-agriculture pour leur survie.

L'eau douce est présente à la surface du Globe sous la forme de neige et glaciers (69%), 30% dans les eaux souterraines, 0,4 ‰ dans les précipitations annuelles et 0,4 ‰ sous forme de vapeur dans l'air dont 2% condensée (nuages). Cette dernière ressource représente tout de même 12 900 km^3 d'eau douce inexploitée, l'équivalent des volumes d'eau renouvelables utilisés sur le globe.

En milieu aride, seules les ressources atmosphériques sont récupérables. Les nuages ou la pluie et le brouillard se trouvent sous forme condensée mais ne sont récupérables qu'en des endroits déterminés par les conditions atmosphériques ou au voisinage du sol. La rosée est une ressource renouvelable sous forme vapeur dans l'atmosphère. Elle est très largement distribuée, avec les meilleurs potentiels en milieu aride et en saison sèche. Par contre, étant sous forme gazeuse, elle nécessite d'être condensée sur un substrat dont la température aura été abaissée en deçà du point de rosée.

Dans une première partie de ce mémoire, nous allons apporter une solution technologique permettant d'optimiser la récupération de cette vapeur d'eau atmosphérique pour en faire une source alternative en eau dans des régions dépourvues. En partenariat étroit avec le CEA-ESEME ESPCI, le CNRS, l'OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr) et l'Université de Corse, nous allons présenter les résultats de 9 ans de recherches qui ont permis, à terme de faire la transition entre les premiers prototypes de laboratoire (entre 2000 et 2003) et les systèmes réels installés sur site (entre 2005 et 2007) pour une production décentralisée d'une eau potable par refroidissement radiatif d'une surface. Ce travail, dont une partie a fait l'objet d'une thèse en co-encadrement CEA-ESPCI / Université de Corse (D.Beysens/M.Muselli) soutenue en avril 2007 a nécessité de nombreuses collaborations et conventions (Veolia Environnement, Université de Polynésie Française, Arid EcoSystem Center (Université de Jérusalem), Université de Wageningen (Pays-Bas), Institut Météorologique et Hydrologique de Zagreb (Croatie), Institut de Management d'Amedahbad (Inde).

Ainsi, nous présenterons successivement l'établissement des protocoles de mesure de cette ressource vapeur d'eau installés à travers le Globe (1999-2007), puis la construction des premiers condenseurs type « aile-plan » en 2000-2002 par l'analyse préalable de la thermodynamique sur une maquette à l'échelle 1/10ème (2001). Nous poursuivrons par la définition de codes de calculs pour la compréhension du modèle physique de la condensation sur un substrat (1999-2003).

Puis, la formulation de matériaux innovants dédiés à la condensation de vapeur d'eau sera développée tout en respectant la propriété intellectuelle des résultats qui fait l'objet actuellement d'un dépôt de brevet (2004 - 2007). Nous montrerons ainsi, la double fonctionnalité des matériaux (films et peintures radiatives) élaborés vis à vis des cycles nocturnes (condensation de la vapeur d'eau) et diurnes (climatisation passive de bâtiments compatible dans une démarche globale HQE « Haute Qualité Environnementale »).

Ainsi, la définition de nouvelles architectures de condenseurs radiatifs a permis de développer un code numérique permettant d'estimer les performances des futurs systèmes avant même leurs installations sur site (2005). Ce code a été validé sur une structure conique construite sur le site d'Ajaccio puis appliqué à divers projets à travers la planète.

Enfin, les constructions en Croatie d'une toiture de condensation de 15 m² et en Inde, de l'usine de production d'eau condensée embouteillée (à terme 15 000 m²) par refroidissement radiatif constituent dans ce domaine, deux premières mondiales (2005-2007).

Si l'accès à l'eau peut devenir capital pour la vie de populations du Globe, la faible électrification constatée dans certaines régions du Monde a des conséquences aussi dramatiques. A titre d'exemple, citons le cas particulier de certains pays de l'Afrique subsaharienne, où moins de 5% des foyers ruraux ont accès à l'électricité. Ajoutons qu'au rythme des programmes d'électrification actuels, 50% en seront toujours privés en 2030. Ainsi, l'OMS estime que 3 milliards d'individus utilisent, pour leurs besoins quotidiens (chauffage, cuisson), des combustibles toxiques. La pollution intérieure qui en résulte serait la cause du décès de plus de 1,5 million de personnes par an. D'autres handicaps comme le fait de ne pouvoir développer des activités économiques aussi minimes soient-elles par manque d'électricité ou bien pire, de ne pouvoir stocker des vaccins dans un réfrigérateur, provoquent des pandémies de maladies difficilement contrôlables dans ces pays en voie de développement.

La seconde partie de ce mémoire sera consacrée à l'utilisation des sources renouvelables d'énergie telles que le solaire ou l'éolien pour la production décentralisée d'électricité en sites isolés ou en connexion à un réseau de distribution. Cette partie se décomposera en plusieurs étapes : développement de méthodes statistiques d'estimation de la ressource pour l'étude a priori des performances des futurs systèmes à sources renouvelables d'énergie (SRE) ; construction de codes de calcul pour le dimensionnement optimal de systèmes en sites isolés soient classiques avec un parc de batteries, soient hybrides couplés avec une source auxiliaire (type groupe électrogène ou chaîne hydrogène pour le projet PEPITE). Puis, nous présenterons l'utilisation des systèmes EnR en connexion au réseau de distribution, par l'expérimentation sur le site d'Ajaccio d'un champ de 850 W connecté à un onduleur de 700 W. Ces systèmes raccordés au réseau ont également été étudiés pour le relevage des chutes de tension en bout de ligne électrique, phénomène récurrent en Corse. Enfin, l'étude de la production massive d'électricité par le couplage champ PV-Electrolyseur-Pile à combustible a fait l'objet d'un projet labellisé par le Pôle de Compétitivité PACA-CORSE CAP ENERGIE dans le but de créer sur le site de l'Université de Corse à Ajaccio, une véritable plate-forme de R&D sur le domaine des Energies Renouvelables à l'horizon 2015. Ce projet, d'un montant de 32 M€ inscrit au prochain CPER, verra la construction d'une centrale PV de 3,6 MW, couplée à une chaîne H_2 possédant une pile à combustible de 100 à 200 kW non développée à ce jour. De part les partenaires du projet (HELION, CEA, GROUPE RAFFALLI, UDC, ALPHEA H_2), cette centrale sera une première mondiale compte tenu des puissances envisagées.

Les travaux scientifiques décrits dans ce mémoire, ainsi que mon parcours professionnel en tant qu'enseignant-chercheur à l'Université de Corse est décrit en Annexe (II) en spécifiant, depuis ma nomination en 2000, mon investissement sur des responsabilités administratives, pédagogiques et de recherches.

PREMIERE PARTIE

I – LA VAPEUR D'EAU ATMOSPHERIQUE, UNE SOURCE RENOUVELABLE EN EAU INEXPLOITEE

Introduction

L'eau est indispensable à la vie. Essentielle aux activités humaines (agricoles, industrielles et domestiques par l'alimentation en eau potable), ainsi qu'au fonctionnement des écosystèmes terrestres, la gestion de l'eau s'annonce comme l'une des préoccupations majeures du XXIe siècle. Les décisions nécessaires pour gérer l'eau et pour en préserver la qualité doivent tenir compte de la demande mais aussi de l'état et de l'évolution de l'offre en eau, afin de mettre en adéquation les besoins et les ressources en eau.

Si l'eau est très présente sur Terre, 97 % de la ressource est de l'eau salée et 2,3 % est bloquée sous forme de glace. Il reste moins d'1 % d'eau douce sous forme liquide.

De plus, cette eau n'est pas répartie uniformément sur la Terre. L'eau est irrégulièrement répartie d'une année sur l'autre ou d'une saison sur l'autre (plus de 60 % du débit annuel mondial étant généré lors d'inondations suivies de sécheresses, parfois pluriannuelles). Outre ces variations saisonnières, les ressources mondiales se caractérisent par une importante variation géographique. Neuf pays se partagent 60 % du débit annuel mondial. Par exemple :

- ✓ en Amérique du Sud, il existe un très fort contraste entre la zone géographique couverte par l'Amazone, qui draine 15 % de la ressource mondiale en eau douce, et le nord-est du Brésil qui souffre de sécheresse ;
- ✓ en Inde, il existe de très fortes différences entre les plaines de l'Himalaya (traversées par de grands fleuves), les zones désertiques, et les moussons du sud du continent indien ;
- ✓ en Chine, l'eau est gelée plusieurs mois par an au nord, l'ouest est caractérisé par la désertification et le sud par un climat tropical ;
- ✓ dans la région méditerranéenne (Europe), l'eau douce est rare et irrégulièrement répartie. Les pays les plus riches en eau (France, Turquie, Italie, ex-Yougoslavie) cumulent les deux tiers des ressources (825 sur 1 189 km^3/an). D'autres pays, tels que Malte, Gaza, la Jordanie, la Libye, sont en dessous du seuil de pénurie (< 500 m^3/an/habitant).

Il n'y a pas un problème de l'eau relatif à la globalité de la planète, mais plutôt une grande diversité de scénarii de disponibilité localisés. A titre d'exemple, l'Islande dispose de 666 000 m^3/personne alors que Djibouti dispose de 19 m^3/personne (1990). En moyenne, les disponibilités par habitant sont de 6 000 à 8 000 m^3/an (selon les sources) mais elles diminuent au fur et à mesure que la population mondiale augmente.

Le 4ème et dernier Forum Mondial de l'Eau, qui s'est déroulé à Mexico entre le 16 et 22 mars 2006, a établi que le manque d'accès à l'eau potable et à l'assainissement était la première

cause de mortalité dans le monde avec plus de 8 millions de morts chaque année. A travers le monde, 1,1 milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable pour répondre à leurs besoins quotidiens de base.

D'après un constat établi en février 2007 par la FAO (Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture), d'ici à 2025, 1,8 milliard de personnes vivront dans des pays ou des régions confrontées à une grave pénurie d'eau et les deux tiers de la population mondiale, dans des conditions de stress hydrique. L'utilisation de l'eau a augmenté deux fois plus rapidement que la croissance de la population au cours du dernier siècle, faisant de la gestion durable, efficiente et équitable des ressources en eau un défi majeur pour l'avenir.

Parallèlement à ce constat dramatique, l'Organisation Mondiale de la Santé donne une estimation des besoins minimums des êtres humains selon deux catégories :

- ✓ la quantité d'eau minimale pour la survie d'un adulte (apport uniquement pour boire) est de 2 $L.jr^{-1}$ et celle d'un enfant d'environ 10 Kg est de 1 $L.jr^{-1}$;
- ✓ cette quantité est portée à 5 $L.jr^{-1}$ si en plus de l'apport hydrique nécessaire à la survie, un volume d'eau minimum pour l'hygiène est considéré pour la personne.

Pour répondre à un besoin croissant en eau douce potable pour les populations, posons-nous la question suivante : « *quelles sont les ressources principales en eau douce sur le globe ?* » Les réserves globales d'eau douce sont évaluées a 35 millions de km^3 (à comparer aux 1400 millions de km^3 d'eaux douces et salées). Il s'agit des glaciers et neige (24 millions de km^3), des eaux souterraines (10,5 millions de km^3), des rivières et lacs (0,1 millions de km^3). Il s'agit aussi des précipitations atmosphériques, comme la pluie et la neige (13.000 km^3), qui contribuent aux sources dont nous venons de parler.

Aux sources d'eau classiques s'ajoutent d'autres possibilités que nous allons maintenant aborder et plus particulièrement les systèmes de production d'eau douce utilisant la vapeur d'eau atmosphérique.

Paradoxalement, nous possédons de très grandes réserves d'eau que nous avons du mal à maîtriser. Notre atmosphère contient 12.900 km^3 d'eau douce, formée pour 98% d'eau vapeur et 2% d'eau condensée (nuages). Mais il faut pouvoir - et savoir - retirer cette eau sous forme liquide. La difficulté est de réaliser l'extraction d'eau liquide à partir de l'atmosphère de façon

économique. C'est difficile, parfois coûteux et les procédés ne sont pas toujours suffisamment élaborés.

Ce chapitre de notre travail va permettre de mettre en place des technologies novatrices pour l'exploitation de cette ressource renouvelable d'eau douce présente dans l'atmosphère.

Après avoir présenté un état de l'art des technologies actives ou passives (avec ou sans apport énergétique) permettant la récupération d'eau douce, nous déclinerons l'ensemble des travaux menés, en partenariat étroit, entre l'Université de Corse (Marc MUSELLI), le CEA-ESEME ESPCI (Daniel BEYSENS), le CNRS et une association OPUR (Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée, www.opur.u-bordeaux.fr). A ce titre les trois organismes (UDC, CEA et CNRS) sont conventionnés depuis l'année 2000, pour un travail commun sur cette thématique.

En 1999, la première étape de notre travail a consisté à développer des protocoles expérimentaux permettant la quantification (en terme de potentiel) de la quantité de vapeur d'eau condensable sur une région donnée. Un substrat de condensation servant de référence a été choisi pour ses propriétés structurales vis à vis de l'eau, pour sa grande disponibilité dans le commerce et son faible coût. Cette étude quantitative de la ressource « rosée » a été couplée à une étude qualitative par une analyse poussée des concentrations ioniques des eaux condensées afin d'en étudier les principaux caractères chimiques et bactériologiques.

L'évolution de ce protocole de mesure au cours de ces années de recherches (1999 –2007) a permis d'estimer la ressource sur de nombreux sites du Globe en différents climats : tropical humide, aride, méditerranéen, mousson, océanique. Les mesures récoltées permettent de mieux appréhender le phénomène naturel de condensation de l'eau sur un substrat et d'en dégager des lois mathématiques et physiques simples pour l'estimation de cette ressource sur une zone géographique donnée. Une modélisation thermodynamique et hydrodynamique a été développée pour la validation de la compréhension du phénomène sur des plaques planes ; elle sera détaillée dans ce document.

Par l'utilisation d'un premier matériau radiatif développé par un de nos collaborateurs, la construction d'une maquette de condenseur à l'échelle 1/10ème (1 m x 0,3 m) a permis de confirmer l'influence de certains paramètres météorologiques sur le rendement en eau. Les premiers condenseurs radiatifs type « aile-plan » de 30 m², construits en 2000 et 2001 à l'Université de Corse ont été les prototypes issus de ces premiers travaux de recherches et représentaient, à l'époque, des premières mondiales dans la production d'eau par refroidissement radiatif.

En 2004, l'obtention d'une bourse de doctorat, financée par la CTC, a permis à un étudiant de travailler sur cette thématique, ce qui a dégagé de nouvelles pistes de travail :

- ✓ la définition d'un matériau de condensation innovant (année 2004) ;

- ✓ la poursuite de l'étude qualitative et quantitative de l'estimation de la ressource « vapeur d'eau condensable » (période 2004-2006) ;
- ✓ la définition de modèles numériques permettant à un concepteur d'évaluer les performances d'un futur condenseur radiatif avant même sa construction en prenant en compte son architecture et son emplacement dans l'environnement (année 2005) ;
- ✓ la transition entre nos prototypes pilotes de laboratoire et l'installation de systèmes réels à grandes échelles par la réalisation de 2 projets en Croatie et en Inde garantissant l'intérêt de ces travaux pour les populations en déficit hydrique (période 2005-2007).

Ces 9 années de recherches (1999 – 2007) peuvent être résumées par l'implication de notre équipe de recherches à de multiples projets à travers le globe ; ces derniers sont représentés sur la Figure I.1 et, pour les plus aboutis, ils seront décrits progressivement dans ce mémoire.

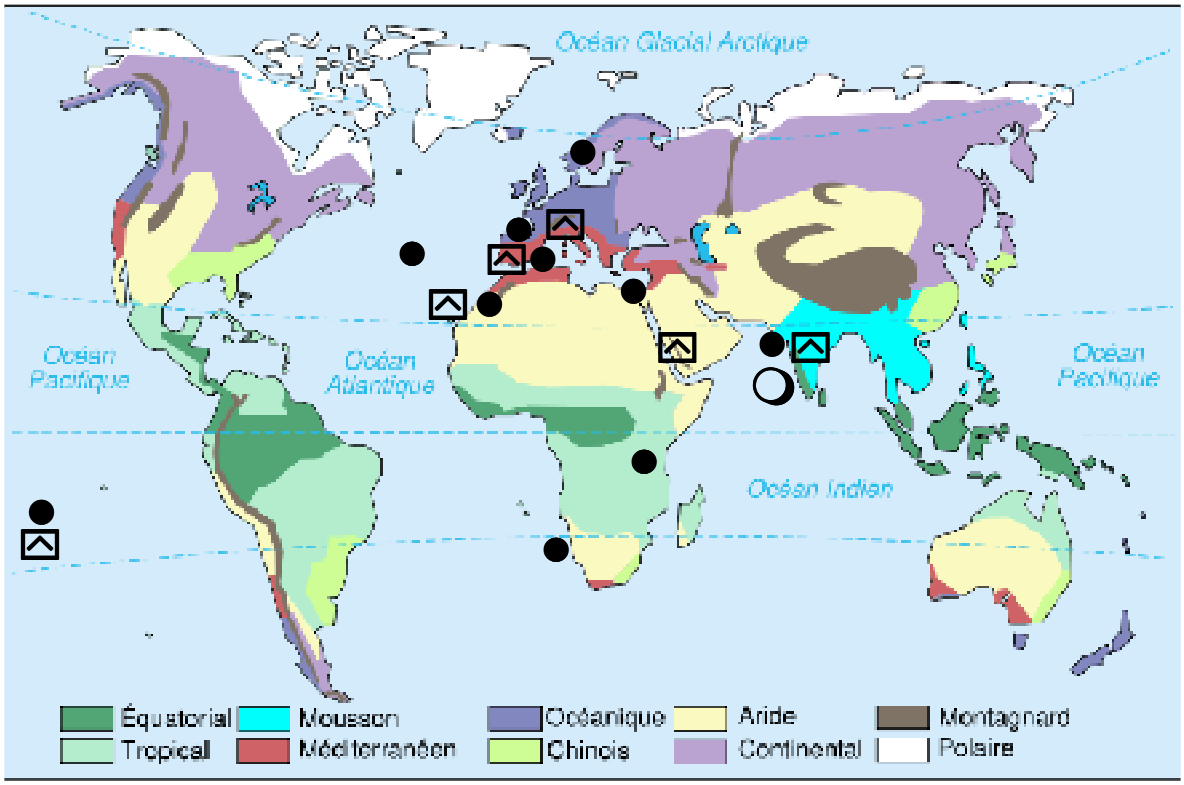


Figure I.1. Cartographie des installations effectuées au cours des travaux de recherches en fonction des climats rencontrés sur le globe

● : mesures quantitatives et/ou qualitatives de la ressource

⊼ : installation de condenseurs radiatifs innovants (toiture, structures coniques)

❍ : projet industriel de commercialisation de la vapeur d'eau condensée

Etat de l'art des systèmes de production d'eau douce

L'objectif de ce paragraphe est de lister les différentes techniques permettant de récupérer de l'eau présente dans l'air (brouillard, rosée) de manières active ou passive (c'est-à-dire avec ou sans apport d'énergie) et d'en estimer les principaux avantages et inconvénients (Beysens et Milimouk, 2000). Cette étude permettra de montrer l'intérêt de travailler sur la ressource « rosée » artificielle par refroidissement radiatif d'un substrat.

2.1 Le dessalement de l'eau de mer (système actif)

Compte tenu de la surface d'eau salée présente sur le Globe, l'idée d'utiliser le dessalement de l'eau de mer comme source alternative en eau douce est intéressante. Cependant, dans le monde, la quantité d'eau dessalée est estimée à environ 10 km^3 par an, ce qui n'est pas très important compte tenu de l'eau utilisable.

Le dessalement de l'eau de mer peut s'effectuer à l'aide de distillateurs solaires, de taille limitée, qui tire profit de l'effet de serre pour évaporer l'eau salée et condenser la vapeur d'eau sur une vitre à la température de l'air extérieur, qui est ensuite récupérée par gravité (Ruddy *et al.*, 1983). Cette méthode ne nécessite que l'énergie pour amener l'eau de mer et retirer la saumure. Elle est appliquée avec succès pour produire de petites quantités d'eau douce dans îles du Saloum (Sénégal), de l'ordre de quelques litre par m^2 et par jour (Pages *et al.*, 1988).

Les systèmes traditionnels utilisés à grande échelle, basés sur la distillation par cycles d'évaporation – condensation ou ayant recours à une filtration à travers une membrane, ont un inconvénient fort gênant : ils sont chers, car très énergivores. Les meilleures installations dépensent au moins une tonne de combustible fossile pour produire, au mieux, une centaine de m^3 d'eau douce pour des coûts de production estimés entre 1 et 2 € m^{-3} (FAO, 2007). Ceci a une autre conséquence grave : une telle augmentation de l'utilisation de l'énergie fossile peut avoir une influence considérable sur le climat. Et tous les procédés produisent une quantité non négligeable de saumure, dont il faut bien tenir compte. Dans un contexte de raréfaction de la ressource pétrole, ces techniques diversifient leur intrant énergétique par l'utilisation de plus en plus courante de sources renouvelables d'énergie telles que le solaire. Il apparaît d'autres difficultés liées à l'utilisation de cette méthode : elle se montre très sensible à la pollution et sa production diminue proportionnellement à l'augmentation de la température de l'eau à dessaler. D'où la conclusion qu'il serait intéressant de considérer d'autres moyens non traditionnels, moins chers et plus écologiques, pour obtenir de l'eau douce.

2.2 Les condenseurs à eau de mer (système actif)

Les condenseurs à eau de mer utilisent un échangeur de chaleur refroidi par de l'eau de mer issue des basses couches de l'océan sur lequel on propulse de l'air humide ruisselant en pluie comme dans des serres (Rajvanshi, 1981).

Un tel appareil est installé sur une plate-forme en Crimée (Alekseev *et al.*, 1998). Il est bien évident que ces systèmes demandent une quantité considérable d'énergie pour les pompes et les ventilateurs, ce qui représente un inconvénient majeur de la technique.

2.3 Les filets à brouillard (système passif)

Depuis maintenant plusieurs années, des scientifiques ont développé des techniques de récupération des fines gouttelettes contenues dans un brouillard. C'est le cas des personnes travaillant au sein de l'association Fog Quest (www.fogquest.org) qui ont développé des filets à brouillard verticaux testés avec succès à travers le Monde. Par exemple, en Amérique du Sud (Chili), Schemenauer *et al.* (1992) ont instrumenté, en moyenne montagne 500 m, la récupération de brouillard à grande échelle avec de nombreux collecteurs de surfaces unitaires 48 m² pour des rendements totaux mesurés de 11 m^3 d'eau par jour. Malgré les quantités d'eau importantes recueillies, l'inconvénient majeur de la récupération de brouillard est que ce phénomène naturel est limité dans l'espace et le temps, l'apparition de la condensation de gouttelletes sur des poussières présentes dans l'atmosphère est la conjonction de plusieurs paramètres météorologiques, topographiques, environnementaux qui n'est pas observable sur l'ensemble de la planète.

2.4 La condensation de la vapeur d'eau : rosée artificielle (système passif)

Le phénomène naturel de condensation de la vapeur d'eau (rosée) présente l'avantage d'être plus régulièrement observable sur la Terre pour peu que des conditions météorologiques et thermodynamiques minimales soient obtenues.

Cette ressource en vapeur d'eau, très peu exploitée, peut être condensée en eau liquide douce par l'utilisation de condenseurs passifs refroidis par dissipation radiative d'énergie. De tout temps, l'Homme a essayé de développer des technologies de récupération de cette eau liquide mais les résultats obtenus n'étaient pas à la hauteur des techniques utilisées. Déjà Aristote, 350 ans avant JC, où, plus tard, en 1751 (Le Roy, 1751), des scientifiques tentaient de comprendre le phénomène de formation de la rosée pour une éventuelle utilisation future en écrivant « *la vapeur qui s'élève de la terre puisse s'amasser en gouttelettes sur les corps qui en sont pas éloignés* » et en répondant à plusieurs questions telles que « *pourquoi, lorsque le vent de nord souffle, n'observe-t-on, pour l'ordinaire, aucune espèce de rosée* ? » ou bien « *pourquoi dans l'automne, le printemps et l'hiver, la rosée est-elle plus abondante qu'en été* ? ».

La première tentative documentée de construction d'un condenseur de rosée est attribuée à un ingénieur russe F.I.Zibold en Crimée (1912). Il fit construire une sorte de condenseur conique tronqué d'environ 20 m de diamètre qui fut ensuite chargé de galets de 15 à 40 cm de diamètre. La hauteur du cône était d'environ 6 m pour un diamètre au sommet de 8 m (Nikolayev *et al.*, 1996 ; Beysens et Milimouk, 2005a). Le condenseur aurait fonctionné en 1915, date à laquelle la fondation se serait fendue. Joukov (1931) exploita les mesures de Zibold pour montrer un rendement de 360 L d'eau par évènement. La structure massive du condenseur de Zibold était son principal désavantage, car celle-ci ne permettait pas à l'architecture d'abaisser régulièrement sa température en deçà du point de rosée nécessaire à la condensation de l'eau.

En 1929, Chapal (1932), hydrométéorologue, tenta la construction d'un condenseur massif à Montpellier (France). Celui-ci fut détruit par lui-même compte tenu des faibles rendements observés après seulement 2 années d'exploitation afin de ne pas « induire en erreur les futurs scientifiques ». En 1930, l'ingénieur Knapen (1929) imagina une version modifiée de ces condenseurs par la construction d'une tour évidée de 12 m de haut pour 12 m de base à Trans-en Provence (France). Produisant seulement 12 L par nuit, ses conclusions étaient très décevantes.

Après la seconde guerre mondiale, Gindel (1965) change de stratégie en construisant un condenseur léger en Israël composé d'un film de polyéthylène de 3 m² incliné à 25°. Les rendements observés sur les 3 sites d'expérimentations étaient compris entre 0,86 et 3,63 L/m²/mois.

Depuis 1994, la thématique « condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique » a observé de nets progrès. Tout d'abord, Nilsson (1994) testa en Tanzanie et en Suède, un premier film de polyéthylène chargé, dédié à la condensation. Un réseau de mesure se constitua, à partir de 1998, en fédérant à travers le Monde plusieurs scientifiques au sein d'une même association OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr) pour tester la ressource rosée sur plusieurs sites. Membre actif de cette association et représentant les Iles Méditerranéennes, je me suis chargé des campagnes de mesures sur la Corse pour l'estimation de cette ressource dont aucun travail scientifique ne donne une quantification précise. Ce travail spécifique novateur a nécessité la mise au point de protocoles expérimentaux d'estimation de la ressource.

Protocoles expérimentaux d'estimation de la ressource « vapeur d'eau » (1999 – 2007)

Nous allons détailler dans ce paragraphe, les expérimentations mises en place pour l'estimation de la ressource dès l'année 1999 à l'Université de Corse en partenariat avec le CEA. Mais avant tout, nous devions savoir sous quelles conditions météorologiques, dans quelles limites théoriques de rendement, nous pourrions observer le phénomène d'apparition de la rosée.

3.1 La condensation de rosée, pourquoi l'envisager ?

La condensation de buée sur une surface froide (par refroidissement radiatif naturel ou par apport d'énergie), peut se caractériser comme une perte de chaleur, au sens thermodynamique, dans un changement de phase Gaz-Liquide, tel que la diminution de l'agitation moléculaire se traduit par une transition de phase vers de l'eau condensée (Monteith et Unsworth, 1990).

Beysens (1995, 2006a) décrit la physique de nucléation des gouttes se présentant sous deux formes bien particulières : formation d'un film ou coalescence de gouttes. Dans le premier cas, la phase condensée utilise la totalité de la surface constituant ainsi la nouvelle surface de condensation. Dans le second cas, la condensation a lieu sur la ligne triple et sur la surface des gouttes du condensât. Selon Beysens (1995), la surface utilisée par le condensât est invariablement voisine de 55% de la surface totale si celle ci est à caractère hydrophobe.

Cette buée (ou rosée en milieu naturel) se forme lorsque la température du substrat de condensation T_c devient inférieure à la température de rosée T_d fonction de la température ambiante T_a et de l'humidité relative RH. L'énergie d'activation nécessaire pour compenser l'énergie de formation de l'interface vapeur/eau ainsi que la tension de surface créée par la nucléation d'une gouttelette liquide vont faire que le phénomène de condensation se produira à une température inférieure à la température de rosée.

La température T_c de surface du condenseur est fonction de l'équilibre de plusieurs phénomènes de transferts thermiques :

- un refroidissement radiatif permettant à la surface une perte énergétique nécessitant la connaissance de T_c, mais également de la couverture nuageuse N ;
- un apport de chaleur sensible convectif et diffusif (condenseur/air) proportionnel à l'écart de température entre T_c et T_a et dépendant d'un coefficient de transfert thermique fonction de la géométrie du condenseur, de l'écoulement de l'air, de sa vitesse V, de sa masse volumique et de sa viscosité ;
- un apport de chaleur conductif (condenseur/solide) proportionnel à l'écart de température entre T_a et T_c et dépendant des conductivités thermiques et des épaisseurs de matériaux ;
- un échange de chaleur dû à la chaleur latente de condensation directement liée à la masse m d'eau condensée sur une période de temps donnée.

i. Protocole de mesure N°1 : balance électronique

Compte tenu des données nécessaires précédemment décrites, un premier protocole expérimental a été construit pour l'estimation du potentiel d'eau condensable mais également pour la compréhension de la physique de la condensation sur un substrat en milieu ouvert. Ce protocole est représenté sur la Figure I.2 et il a fait l'objet de nombreux travaux de publications par notre équipe (Muselli *et al.*, 2002a, 2002b ; Beysens *et al.*, 2005b).

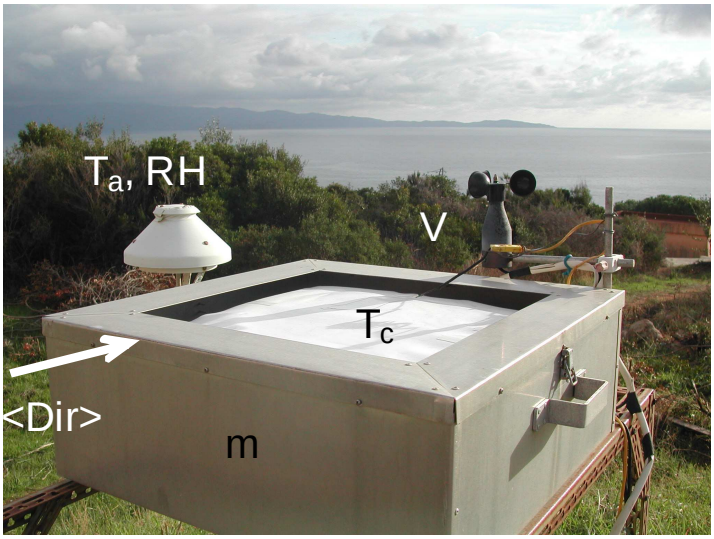


Figure I.2. Premier protocole expérimental d'estimation de la ressource vapeur d'eau atmosphérique mis en place au laboratoire de Vignola conjointement avec le CEA

T_a température ambiante (°C ou K), *RH* humidité relative (%), T_c température de surface (°C ou K), *V* vitesse du vent (m s^{-1}), *m* masse d'eau condensée (g), <*Dir*> Direction moyenne du vent nocturne (°), Photo : M.Muselli

Le site de mesure est situé dans le Golfe d'Ajaccio (Corse, France), latitude : 41°55' N, longitude : 8° 48' E, 0,5 km de la mer pour une altitude de 70 m. Sur la période 10 septembre 1999 – 16 juin 2003, le système a été placé sur un toit terrasse du laboratoire à 7 m du sol. Au laboratoire de Vignola de l'Université de Corse, nous disposons d'une station météorologique depuis mars 1998, permettant d'avoir au pas de temps de la minute les principales mesures météorologiques. Cette série fine de mesure a montré que le site est dominé par un vent nocturne d'orientation NE (1,8 m s^{-1}) et deux directions dominantes sur le cycle diurne NW/SW caractéristiques d'un climat méditerranéen.

La rosée se forme sur une surface de référence composée par du PMMA (polyméthylmétacrylate, nom commercial : plexiglass) d'épaisseur 5 mm et de surface S_c = 0,16 m² (400 x 400 mm^2) . Ce plateau est isolé par le dessous d'une feuille d'aluminium (12,5 µm) et d'une plaque 400 x 400 mm² de polystyrène d'épaisseur 5 mm. Les paramètres suivants sont mesurés (sur enregistreur TESTO) de manière continue au pas de temps de 15 minutes, suffisant compte tenu des gradients observés sur les mesures : T_a température ambiante (type K, ±0,1°C) et *RH* humidité relative de l'air (%) permettant de calculer T_d, $V_{0.2}$ vitesse du vent à 0,2 m au dessus du substrat, direction et vitesse V_{10} du vent à 10 m au dessus du sol (vitesse de coupure des anémomètres 0,5 m s^{-1}), T_c température de surface du substrat de condensation (type K, ±0,1°C). La masse d'eau condensée est enregistrée sur une balance électronique, compensée en température de type METTLER TOLEDO présentant une précision de 10^{-3} g et connectée à un PC. Il faut noter que le vent produit généralement une force orientée de bas en haut en raison de la pression de Bernoulli.

A partir du 17 juin 2003, le dispositif a été déplacé à proximité des prototypes de condenseurs radiatifs situés à 50 m de l'emplacement initial au sol afin d'avoir une mesure réelle au voisinage des grandes architectures. Le substrat a été alors remplacé par du PTFE

(PolyTetraFluoroEthylène, nom commercial : Téflon) qui était à ce moment là, le nouveau standard de référence adopté par la communauté scientifique.

Un enregistrement typique d'une nuit avec condensation est présenté sur la Figure I.3. Dès que $T_c < T_d$, à la tombée du jour, la balance mesure une lente augmentation de la masse d'eau avec des taux horaires $dm/dt < 8$ g h^{-1}. Cette condition $T_c < T_d$ permet de définir le temps de condensation dt pendant lequel le phénomène de changement de phase est observé. Lorsque la condition n'est plus remplie au matin, le phénomène d'évaporation ($dm/dt < 0$ et forte) se manifeste rapidement dès l'apparition des premiers rayons de soleil. La masse d'eau condensée pour la nuit m_T est la mesure de m lorsque $|T_c - T_d| \approx 0$ au matin. A noter qu'au sein d'une même nuit, il peut y avoir plusieurs phénomènes de condensation en fonction par exemple d'une couverture nuageuse changeante ou bien de l'apparition et/ou disparition de vent. Le rendement h (mm) est obtenu alors par l'Eq. I.1 :

$$h(mm) = m_T / 160 \qquad \text{I.(1)}$$

Les évènements de pluie sont repérés sur la balance pour des taux de précipitation horaires $dm/dt > 8$ g h^{-1} et les évènements de brouillard, peuvent être estimés à partir de $T_a \approx T_d$ en corrélant ces données avec la nébulosité N mesurée par Météo-France à 10 km des sites d'expérimentation.

Afin de comparer tous les futurs sites de mesure entre eux, il a été convenu d'utiliser pour la vitesse du vent, la mesure de celle-ci à 10 m au dessus du sol (V_{10}, m s^{-1}). Dans le cas où elle ne serait pas disponible à cette hauteur, elle serait extrapolée en utilisant un profil logarithmique classique adopté par la communauté scientifique (Monteith et Unsworth, 1990), avec z_c la rugosité caractéristique du sol (choisie égale à 0,1 m) :

$$V_{10} = V_Z \frac{\ln(10/z_c)}{\ln(z/z_c)} \qquad \text{I.(2)}$$

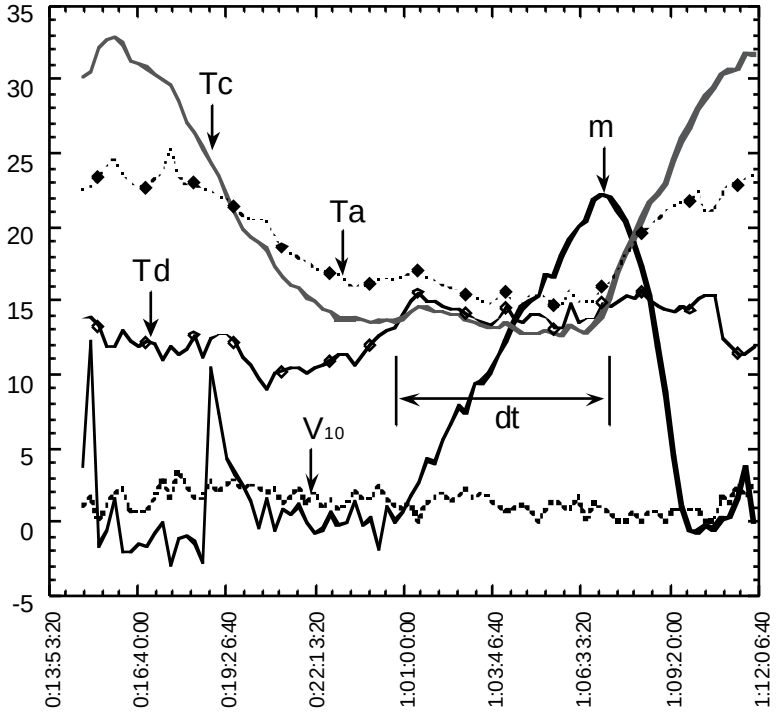


Figure I.3. Enregistrement « typique » d'une nuit avec condensation d'eau sur PMMA, 15-16/05/2000, Ajaccio)

A ce stade de l'étude, le rendement théorique maximum de cette technique de condensation doit être évalué. Celui-ci dépend essentiellement de l'humidité absolue que l'on peut mesurer dans 1 m^3 d'air. D'après Wahlgren (2001), celle-ci est comprise entre 5 et 10 g m^{-3} pour la plupart des centres urbains et présente géographiquement de grandes variations sur des régions à faibles précipitations (< 300 mm/an) comme par exemple à Las Vegas, avec 4 g m^{-3} ou à Djibouti avec 21,2 g m^{-3}. Sachant que la puissance disponible pour le refroidissement radiatif d'un substrat est comprise entre 25 et 150 W m^{-2} (Beysens, 2006a), connaissant la chaleur latente de condensation à 20°C soit 2500 J g^{-1}, le rendement théorique maximum de ce phénomène naturel ne peut excéder 0,8 mm soit 0,8 L m^{-2}.

ii. Protocole de mesure N°2 : condenseur étalon

A partir de l'année 2003, un autre protocole de mesure, beaucoup moins coûteux et facilement transportable, pour l'estimation unique du potentiel en eau condensée a été développé à partir d'un condenseur étalon de surface 1 m², recouvert d'un film de polyéthylène basse densité (LDPE) chargé en microbilles de TiO_2 (5% vol., diamètre 0,19 µm) et $BaSO_4$ (2% vol., 0,8 µm) diamètre développé par un de nos collaborateurs (Nilsson, 1996). Ce matériau choisi pour ses propriétés sélectives en fonction de la longueur d'onde se comporte comme un corps noir dans l'infrarouge et comme un corps blanc dans le visible. D'une épaisseur de 0,39 mm, il contient également un surfactant (1% vol.) pour favoriser la dispersion des charges dans le LDPE. Par contre, aucun traitement anti-UV n'a été incorporé à ce matériau ce qui lui confère un

caractère de fragilité dans le temps pour des régions à fort potentiel solaire. Ce film est placé sur une structure métallique démontable inclinée à 30° qui possède sur sa face supérieure une plaque d'isolation en polystyrène expansé de 3 cm d'épaisseur évitant un réchauffement du substrat via le coffre (Figure I.4).

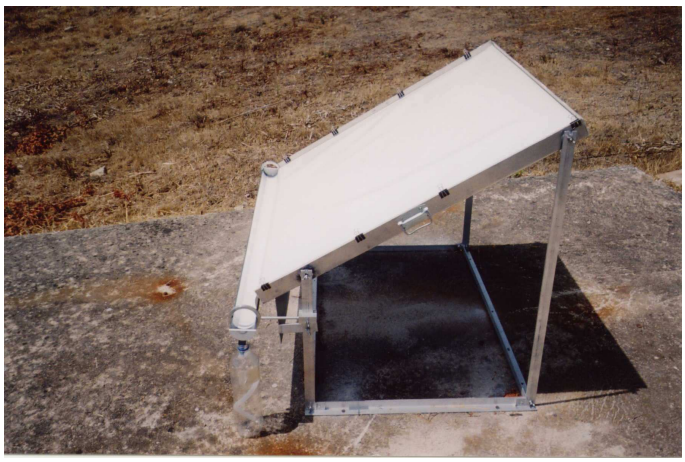


Figure I.4. Condenseur standard 1 m² incliné à 30°, installé au laboratoire de l'UDC en 2003

Photo : M.Muselli

L'instrumentation de mesure (T_a, RH, V) est identique à celle décrite lors du protocole « balance » mais seule la masse finale avant le lever du soleil est mesurée d'une part par écoulement gravitaire et d'autre part, en récoltant manuellement, l'eau condensée résiduelle sur le substrat au moment de la mesure. Facile à transporter, demandant très peu d'entretien et surtout peu cher, ce protocole de mesure est toujours utilisé dans nos expérimentations actuelles pour l'estimation du potentiel en eau d'un site.

3.2 Etudes quantitative et qualitative de la ressource sur PMMA (1999-2007)

Sur la période 1999-2007, de nombreux sites à travers le monde présentant des climats très différents (Figure I.1), ont été instrumentés avec deux objectifs principaux :

- estimer cette ressource quantitativement pour des populations présentes sur site en déficit chronique d'eau ;
- estimer cette ressource qualitativement en effectuant des procédures systématiques d'études chimiques et bactériologiques de l'eau condensée à chaque prélèvement.

i. Etude quantitative de la ressource vapeur d'eau atmosphérique condensée

La Figure I.1 présente sous différents climats, les sites qui ont été instrumentés en vue de l'obtention d'un potentiel en eau :

- Université de Corse, Ajaccio, France, climat méditerranéen, Muselli et Beysens (2001) ; Muselli *et al.* (2002a, 2002b) ;
- CEA DRFMC, Grenoble, France, climat continental, Beysens *et al.* (2001) ;
- CEA ICMCB, Bordeaux, France, climat océanique, Milimouk *et al.* (2001) ;
- Institut de Météorologie et d'Hydrologie, Zadar, Komiza, Bisevo, climat méditerranéen, Mileta *et al.* (2004) ; Mileta *et al.* (2006) ;
- Ethiopie, cf. note interne de l'OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr) ;
- Arid Eco System Center, Jérusalem & Désert du Neguev, Israël, climat aride, Berkowicz *et al.* (2004) ; Programmes Arc-en-Ciel de Coopération France-Israël (rapport de contrat : Beysens *et al.*, 2004b)
- Université de Polynésie Française, Tahiti, Tikehau, climat tropical, Clus *et al.* (2007b)
- Inde, Kothara, Panandhro, Yelagiri Hills ; Indian Institute of Management of Amedhabad, climat de mousson et aride, Sharan *et al.* (2007a, 2007b) ;
- Désert Central de Namibie, Gababeb, Namibie, climat aride, Henschel *et al.* (2007) ;
- Université d'Agadir, Mirleft, Maroc, climat aride, mesures en cours pour une thèse en co-encadrement avec le CEA ESEME ESPCI (D.BEYSENS), l'Université d'Agadir (B.KABBACHI) et l'Université de Corse (M.MUSELLI).

Pour des sites ayant une latitude voisine autour de 42°N, notre contribution (Beysens *et al.*, 2005b) permet de comparer directement ces sites sur le pourtour méditerranéen mais sous l'influence de climats différents.

Le Tableau I.1 permet de comparer tous les sites de mesures actuellement répertoriés dans notre banque de données sur le potentiel en eau condensable et pour différents climats. La saison sèche est prise entre le 01-05 et le 30-09 pour les sites de latitude voisine proche de 42°N (Ajaccio, Grenoble, Bordeaux, Zadar, Komiza, Bisevo, Jerusalem). Pour la Polynésie Française et les régions de l'Inde Occidentale, ces périodes de sécheresse sont mesurées respectivement entre 01-05 / 31-10 et 01-10 / 31-05.

La discussion de ces résultats permet de mettre en évidence certaines pistes de travail quant à l'évaluation de ce potentiel :

- ✓ tout d'abord, pour des sites proches à l'échelle de la planète (Ajaccio, Bordeaux, Grenoble), les différences sont notables : certains sites présentent de grandes fréquences d'évènements mais de faibles intensités (Bordeaux : 57,8% pour un rendement moyen de 0,046 mm) alors que d'autres se comportent à l'inverse (Ajaccio : 33% pour 0,07 mm) ; ce même constat est identique en Croatie entre Zadar (39,7% pour 0,043 mm) et Komiza (21,6% pour 0,09 mm) ;
- ✓ la ressource rosée durant la période sèche (quand le déficit hydrique est à son maximum) est la plus intéressante mais aussi très irrégulièrement disponible. Même si la proportion de la rosée dans le bilan rosée/pluie reste marginale la plupart du temps, cette ressource alternative peut atteindre en saison sèche 100% de l'apport en eau dans les zones semi-arides (Panandhro, Jérusalem, Tamil Nadu). En Croatie, pays méditerranéen, sur certains mois d'été, la ressource rosée peut atteindre 30 à 40% de la pluviométrie mensuelle et jusqu'à 121% lors de la canicule sur le mois de juillet 2003 ;

	Ajaccio (France) 41°55' N	Grenoble (France) 45°11' N	Bordeaux (Frannce) 44°47' N	Zadar (Croatie) 44°08' N	Komiza (Croatie) 43°01' N	Biševo (Croatie) 42°59' N	Jérusalem (Israël) 35°13' N
Protocole de mesure	Balance PMMA	Balance PMMA	Balance PMMA	1 m²	1 m²	Toiture 15,1 m²	1 m²
Période de mesure	23/01/01 - 22/01/02	15/06/00 - 14/06/01	15/01/02 - 14/01/03	01/07/03 – 31/10/06	01/07/03 - 31/10/06	14/04/05 - 31/08/06	06/03 – 06/04
Rosée Max. (mm)	0,36	0,161	0,21	0,34	0,49	0,526	0,48
Rosée Moy. (mm)	0,07	0,036	0,046	0,043	0,090	0,181	0,19
pluie (cumul, mm)	386	1004	731	2727,4	2754	650,4	581
rosée / pluie (%)	6,62	1,31	2,30	2,42	1,03	5,83	6,40
% de jrs de rosée	33,0	29,8	57,8	39,7	21,6	43,1	48,2
Ressource rosée (mm/jour)	0,07	0,036	0,046	0,138	0,107	0,078	0,133
Ressource rosée en saison sèche (mm/jour)	0,095	0,052	0,064	0,149	0,115	0,094	0,139

	Tikehau sites 1& 2 (PF) 15°07' S	Tahiti (PF) 17°34' S	Panandro (Inde) 23°40' N	Yelagiri Hills (Inde) 12°35' N
Protocole de mesure	1 m²	1 m²	1 m²	1 m²
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
Rosée Max. (mm)	0,23	0,22	0,566	0,636
Rosée Moy. (mm)	0,102	0,068	0,203	0,321
pluie (cumul, mm)	247,8	176,2	0,0	/
rosée / pluie (%)	1,09	3,17	100	/
% de jours de rosée	23,9	53,5	31,8	90,2
Ressource rosée (mm/jour)	0,024	0,021	0,060	0,290
Ressource rosée en saison sèche (mm/jour)	0,024	0,021	Mesure partielle	Mesure partielle

Tableau I.1. Grandeurs représentatives du potentiel des principaux sites instrumentés au cours de ces travaux de recherches. Le protocole de mesure employé sur chaque site est mentionné afin de comparer des sites sur des systèmes de références identiques

- ✓ à l'échelle du microclimat, des écarts importants sont également notés. Komiza et Biševo, 2 îles de la Mer Adriatique distantes de seulement 10 km présentent des gisements en vapeur d'eau condensée totalement différents avec respectivement 0,015 mm jr^{-1} et 0,078 mm jr^{-1} (Mileta *et al.*, 2004). C'est dire l'importance de cette estimation de potentiel pour une future installation de systèmes et l'absolue nécessité de comprendre physiquement ces grandes variations dans les gisements par une analyse poussée de la météorologie locale et de l'environnement du système (voir à ce sujet la section I.4).

ii. Etude qualitative de la ressource vapeur d'eau atmosphérique condensée

Nous venons de constater, qu'en fonction des sites, la ressource « vapeur d'eau » pouvait être considérée non seulement comme une ressource alternative aux apports pluviométriques mais dans certains cas, en saison sèche, elle représentait la seule ressource hydrique disponible pour la population. La première question que l'ensemble des gens se pose, lorsque l'on parle de rosée artificielle condensée, se résume à « *cette eau est-elle potable* ? ». En effet, les objectifs de nos travaux sont tout d'abord : fournir de l'eau à des populations, mais sa potabilité doit être prouvée par comparaison aux normes imposées par l'OMS ou définies dans le pays d'origine. Ainsi, nous pourrons constater que la technologie développée a un avenir certain dans la production passive d'eau douce potable totalement décentralisée.

Pour répondre à ces objectifs, une analyse qualitative de l'eau condensée a été engagée selon 2 pistes bien précises :

- Phase 1 : des analyses chimiques systématiques à chaque événement de condensation ou pluviométrique pour une comparaison directe sur une période temporelle de l'ordre de l'année sur 3 sites : Ajaccio (France), Bordeaux-Pessac (France) et Zadar (Croatie). Les échantillons d'eau étaient stockés au réfrigérateur à l'obscurité dans des flacons de 50 mL en polyéthylène et analysés dans une période ne dépassant pas 4 semaines après stockage. pH, conductimétrie, température étaient mesurés sur place immédiatement après la collecte.
- Phase 2 : à Ajaccio, des analyses chimiques et bactériologiques poussées (50 composés testés) sur une dizaine d'échantillons d'eau et pour une période de temps courte. La phase

2 a fait l'objet d'une convention de travail entre l'Université de Corse, le CEA, le CNRS et un industriel VEOLIA ENVIRONNEMENT pour l'année 2002-2003. La dizaine d'échantillons sous contrat était embouteillée le jour de la collecte et expédiée par avion, le jour même sur le laboratoire de VEOLIA à Paris pour une analyse dans la journée.

Bien entendu des précautions d'hygiène (gants, matériels neufs) étaient prises pour la collecte des eaux. Celles-ci (issues de la condensation ou de la pluviométrie) étaient récupérées pour la :

- Phase 1 : à Ajaccio, sur un condenseur PMMA (Protocole de mesure N°1) et à Bordeaux et Zadar, sur un système de condenseur 1 m² (Protocole de mesure N°2) possédant un film de condensation chargé (LDPE + charges) ;
- Phase 2 : un condenseur de grande envergure 30 m² qui sera décrit dans ce mémoire dans la section I.6, nécessaire pour obtenir le volume d'eau maximum pour l'ensemble des composés chimiques et bactériologiques mesurés.

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications (Ajaccio : Muselli *et al.*, 2002a ; Muselli *et al.*, 2006a ; Pessac : Beysens *et al.*, 2006b) et communications (Zadar : Beysens *et al.*, 2004a ; Beysens *et al.*, 2007b) dont l'originalité reposait sur une analyse fine des qualités chimiques et bactériologiques très peu décrites dans la littérature (Chang *et al.*, 1987 ; Foster *et al.*, 1990 ; Ortiz *et al.*, 2000 ; Jiries, 2001 ; Muselli *et al.*, 2002a ; Rubio *et al.*, 2003). Nous ne présentons ici que les principaux résultats, fruits de ce travail en collaboration selon les phases 1 & 2.

Lors de la Phase 1 de l'étude, les analyses systématiques sur de nombreux échantillons de pluie et de rosée ont montré que les pH et conductimétries obtenus étaient tout à fait conformes aux normes imposées par l'OMS et les législations françaises et européennes (Figure I.5). Ces eaux se sont avérées également conformes en regard des concentrations des ions étudiés dans la Phase 1 (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, NO_2^-) par comparaison aux limites imposées par les normes (Figure I.6) nous permettant de conclure sur la potabilité de l'eau condensée vis à vis des ions étudiés. L'origine des sels présents dans les échantillons (Figure I.7) n'a pas montré de différence significative entre pluie et rosée ($Cl^-/Na^+ = 1,16 \pm 0,025$ pour la rosée contre $1,20 \pm 0,015$ pour la pluie, due à la proximité de la mer. Il en est de même pour le rapport Cl^-/Mg^{2+}). La rosée au même titre que la pluie présentait à Ajaccio des ions sulfates dont la seule source possible est une centrale fioul (gaz de combustion) distante d'environ 10 km des prélèvements ; ce qui permet de conclure que la rosée pourrait être éventuellement utilisée, par analyse chimique, comme facteur de pollution d'un site.

Ces premiers résultats ont été confirmés lors de la Phase 2 sur 10 échantillons d'eau condensée à Ajaccio, pour vérifier de manière plus fine, la qualité chimique et surtout bactériologique des eaux mais également, si le matériau de condensation utilisé (LDPE + TiO_2 +

$BaSO_4$) ne venait pas altérer la qualité de l'eau. Pour cela, des protocoles d'analyse chimique ont été mis au point (Tableau I.2). Le Tableau I.3 résume les pourcentages des composés non conformes observés lors de l'analyse. Tout d'abord, le matériau de condensation ne dégrade pas la qualité de l'eau (conformité des teneurs en Ti et Ba). Seulement 3 paramètres chimiques dépassent les normes françaises et européennes : antimoine, plomb et turbidité. Sur ces 3 paramètres, seul le plomb est inclus dans les recommandations de l'OMS et a été trouvé à des concentrations de l'ordre de 10 µg/L. Six autres paramètres, considérés comme indicateurs, ont été trouvés à des concentrations excédant les valeurs recommandées par les législations française et européenne : Aluminium, Fer, Ammonium, Indice de Permanganate, Conductivité et Indice de saturation.

Plusieurs bactéries cultivables étaient présents dans 7/10 échantillons : on a noté la présence de coliformes et entérocoques caractéristiques d'une contamination fécale (manipulation humaine et/ou animaux prés des prélèvements). La présence de ces bactéries nécessite, pour une meilleure potabilité, une désinfection de l'eau qui pourrait légèrement augmenter les coûts d'opération d'un tel condenseur.

L'origine du Pb est connue des activités urbaines de la ville d'Ajaccio, alors que Al et Fe sont dus à la présence en fortes concentrations de poussières sahariennes caractéristiques du site nécessitant, pour la potabilité, une filtration de l'eau avant son utilisation (filtration simple 300 µm). Enfin, nous avons mesuré une eau très corrosive ce qui doit être pris en compte dans le matériel de stockage ou de transit de l'eau.

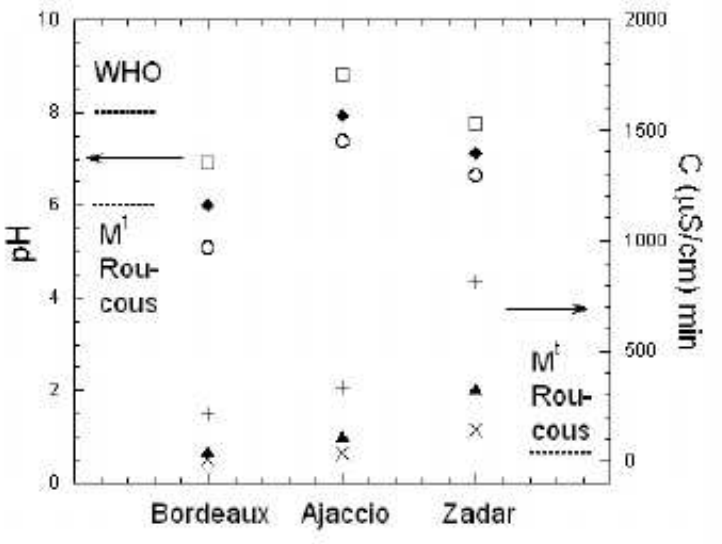


Figure I.5. Phase 1 : Statistiques du pH (gauche) et de la conductimétrie (droite) montrant les valeurs minimum, moyenne et maximum en fonction des sites. A titre de comparaison, la ligne pointillée indique la

valeur maximum autorisée selon la norme de l'OMS ainsi que les valeurs d'une eau minérale française du commerce.

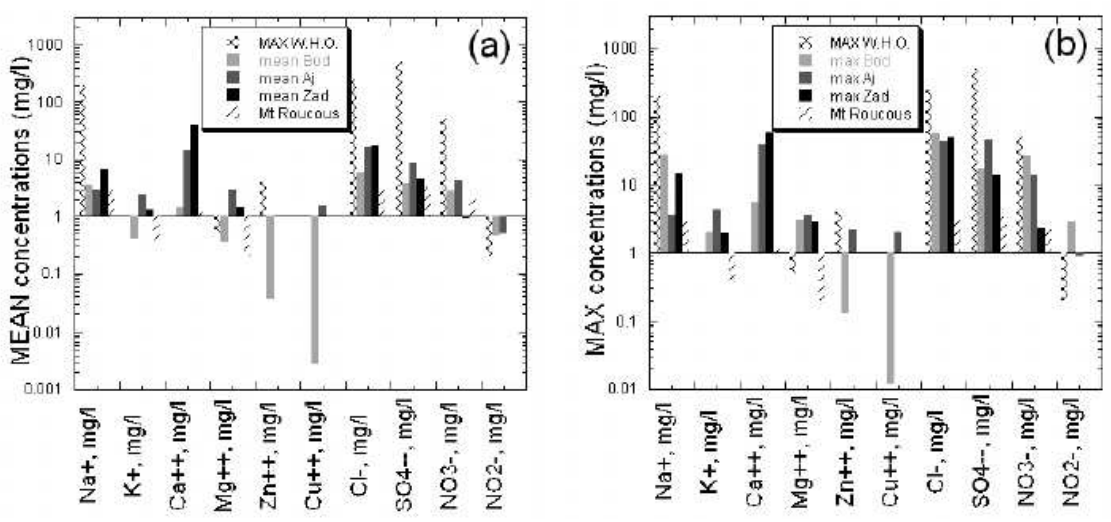
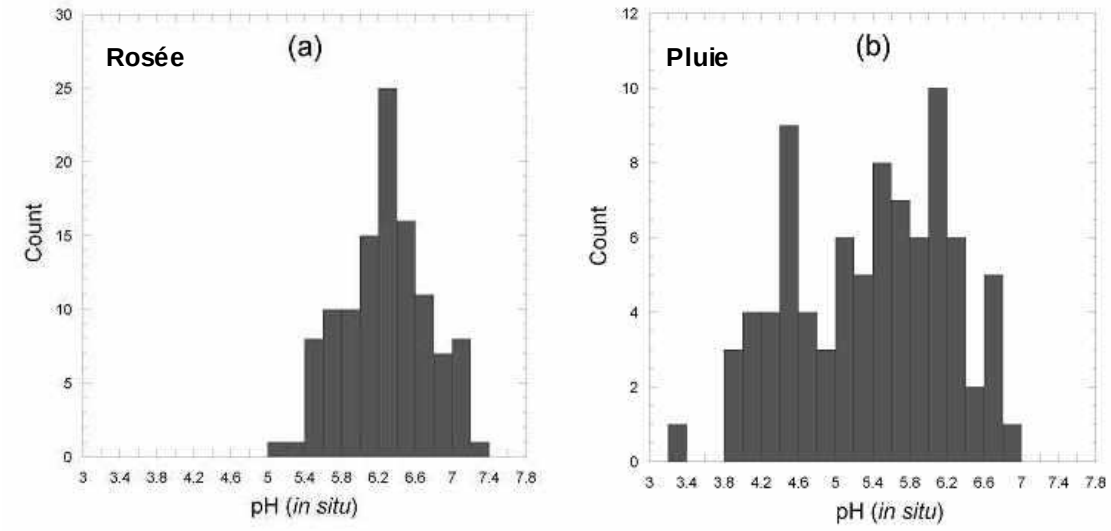


Figure I.6. Phase 1 : Concentrations moyennes et maximum des principaux ions de l'eau condensée pour Bordeaux (gris clair), Ajaccio (gris) et Zadar (noir). Zone croisée : valeurs maximales autorisées selon l'OMS. Zone striée : valeurs observées pour une eau minérale du commerce.



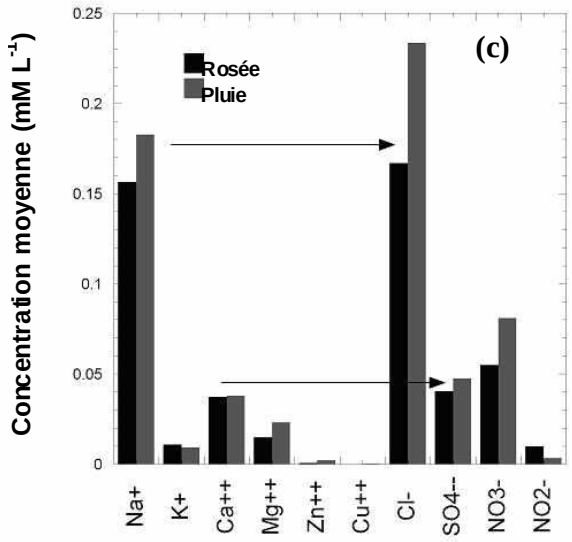


Figure I.7. Distributions des pH sur Pessac-Bordeaux (a) : rosée, (b) : pluie ; (c) : Comparaison des concentrations moyennes des principaux ions entre évènements de pluie et de rosée.

Protocole	Volume d'eau nécessaire (L)	Paramètres analysés
In situ	-	pH, Température
1	2,75	Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, Zn, Cl^-, CN^-, F^-, Silicate, SO_4^{2-} NH_4^+, TKN, NO_3^-, NO_2^-, P Conductivité, Turbidité, Alcalinité, Indice de Permanganate, Indice Phénols, Carbone Organique Total Bactériologie (Coliformes thermo-tolérants, Coliformes totaux, Entérocoques, microorganismes en culture, Spores de bactéries anaérobies sulfitoréductrices)
2	3,75	Protocole #1 et Indice hydrocarbure
3	5,75	Protocole #2 et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)
4	6,75	Protocole #3 et matière en suspension

Tableau I.2. Phase 2 : Ajaccio : Description des différents protocoles d'analyse en fonction de la quantité d'eau condensée récoltée.

	Législation française	Législation européenne
Paramètres (P)		
Turbidité	100%	-
Sb	50%	50%
Pb	50%	50%
Entérocoques	50%	50%
paramètres indicateurs (I)		
Conductivité	70%	-
Al	80%	80%
Fe	80%	80%
NH_4	60%	10%
Indice Permanganate	50%	50%
Indice de saturation	100%	100%
Coliformes Thermotolérants	40%	40%
Coliformes Totaux	70%	70%
Spores de bactéries anaérobies sulfitoréductrices	80%	-

Tableau I.3. Phase 2 : Pourcentage d'échantillons d'eau condensée ne vérifiant pas les normes standards imposées. (P) paramètres, (I) indicateurs de paramètres pour les législations françaises et européennes.

Corrélation des mesures avec les observations météorologiques

Les mesures quantitatives de volumes accumulées au cours de ces années sous différents climats permettent d'obtenir une banque de données très importante pour la connaissance du phénomène naturel de condensation passive sur un substrat vis à vis des paramètres météorologiques.

Ce travail est indispensable dans l'optique d'une définition dans le futur, d'une modélisation simple, utilisant le minimum de paramètres météorologiques (T_a, *RH*, *V*, *Dir*, *N*, P_r …), permettant la construction d'une cartographie du potentiel de vapeur d'eau condensée à l'échelle d'une micro-région, d'un pays voire de la planète. Nous avons essayé de comprendre comment les conditions météorologiques, l'environnement proche des condenseurs pouvaient influer sur le gisement en eau mesurable.

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) sur la condensation de rosée. L'efficacité des systèmes et les rendements de rosée instantanés varient en fonction des grandeurs *RH*, *V*, *Dir*, T_a, 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).

Les nombreuses mesures physiques menées sur les sites d'Ajaccio (France ; Muselli *et al.*, 2001, 2002a, 2006b) ; Zadar, Komiza et Biševo (Croatie ; Mileta *et al.*, 2006) ; Kothara (Inde ; Sharan *et al.*, 2007a) ont été déjà corrélées par rapport à l'humidité relative *RH* ou plus précisément la grandeur directement proportionnelle $(T_d - T_a) = f(RH)$, grandeur discriminante dans l'étude d'un gisement de rosée. Prenons l'exemple des données expérimentales collectées sur les sites de Biševo (Figure I.8a) ou Komiza (Figure I.8b), îles croates distantes de 10 km, et exprimons les rendements de rosée en fonction de $(T_d - T_a)$.

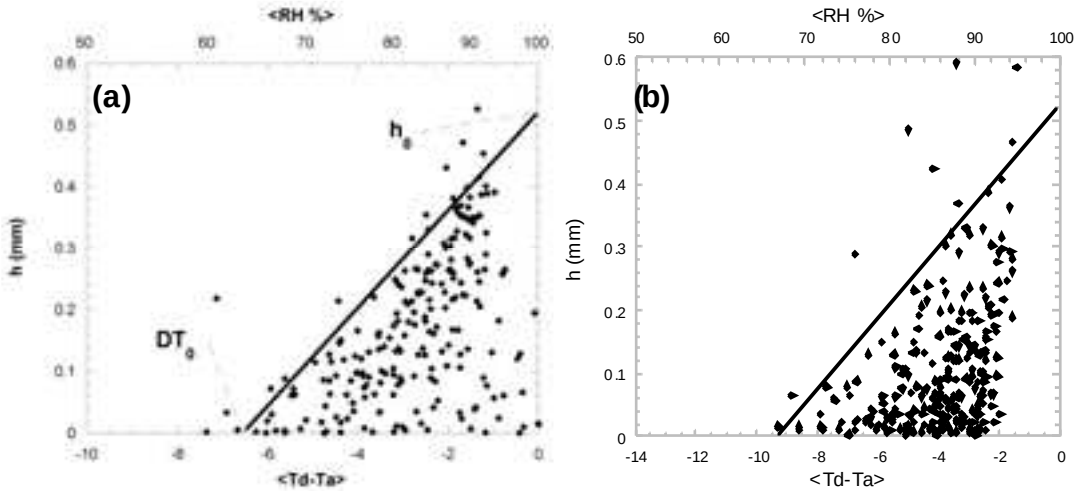


Figure I.8. Rendements de rosée exprimés en fonction de <$T_d - T_a$> (abscisse inférieure, valeur moyenne de 21:00 à 7:00 en °C) ou *RH* (abscisse supérieure en %).
(a) : Toiture de Biševo pour la période du 14/04/05 - 31/08/06
(b) : Condenseur 1 m² Komiza pour la période du 01/07/03 au 31/10/06

La droite h_M (DT_0, h_0) (225 événements sur Biševo et 262 sur Komiza) 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 (Beysens *et al.*, 2005b ; Muselli *et al.*, 2006b ; Mileta *et al.*, 2006 ; Sharan *et al.*, 2007a).

La droite h_M représente le rendement maximal que l'on peut attendre pour un *RH* déterminé, elle s'écrit selon l'Eq. I.(3) :

$$h_M = h_0\left(1 - \frac{T_d - T_a}{DT_0}\right) \qquad \text{I.(3)}$$

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. A partir des expériences menées sur l'ensemble des sites instrumentés, nous allons étudier l'influence de plusieurs paramètres météorologiques ainsi que l'influence de la forme du condenseur sur le rendement en eau.

4.1 Facteur de forme

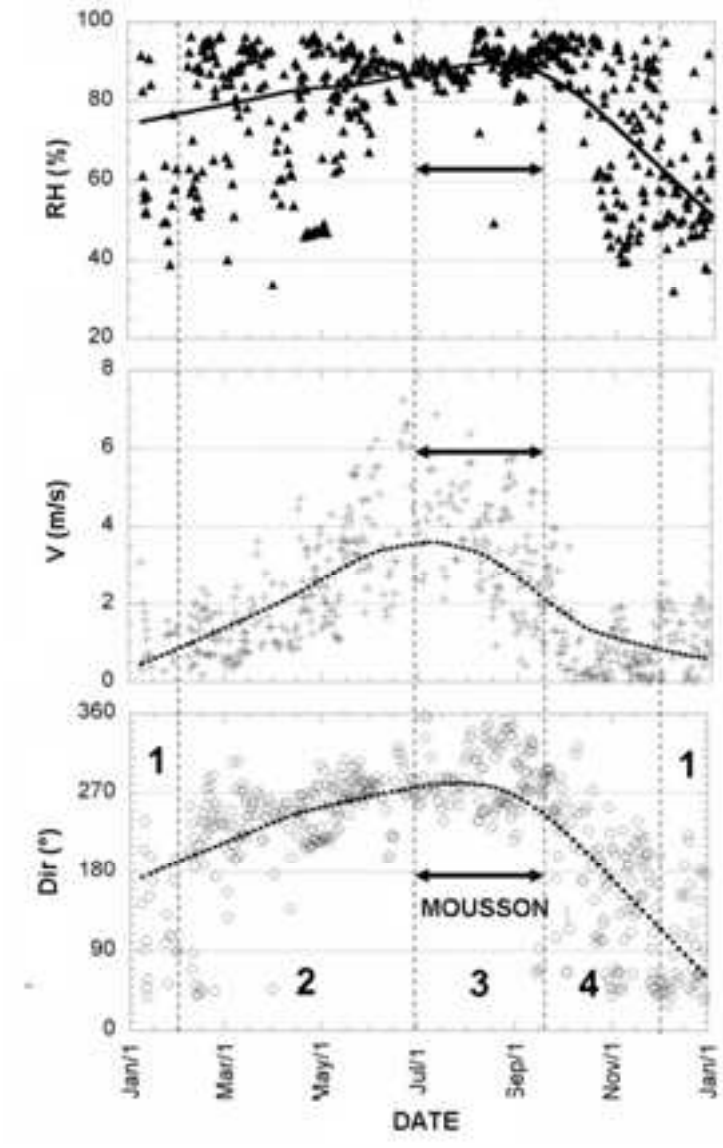
Dans l'optique de la conception d'architecture complexe de condenseurs radiatifs, il a été utile d'avoir un outil mathématique (tel un indice) permettant d'estimer l'efficacité de cette nouvelle forme de structure par comparaison à une référence. A ce titre, le facteur de forme f_F (réel sans dimension) représente l'efficacité relative d'un condenseur (matériaux, forme, superficie de condensation) par rapport à un condenseur de référence (condenseur plan de 1 m² et incliné à 30°, Protocole de mesure N°2, voir section I.3.1). f_F s'exprime en fonction de V à 10 m. Pour une vitesse de vent V_i, le facteur de forme $f_F(V_i)$ est égal au gain en température (Beysens *et al.*, 2003a ; Muselli *et al.*, 2006b) et suit l'Eq. I.(4) :

$$f_F(V_i) = \left(\frac{(T_c)_i - T_a}{(T_{ref})_i - T_a} \right) \qquad \text{I.(4)}$$

4.2 Direction du vent Dir (°)

La direction du vent nocturne mesurée sur les sites a une influence capitale sur la production d'un collecteur radiatif (Muselli *et al.*, 2002a). Si ce collecteur n'admet pas de symétrie de révolution par rapport à un axe vertical (type structure conique), le facteur de forme (Eq. I.4) permettra de simuler l'efficacité de ce condenseur selon la direction en fonction d'une direction de référence. Ce facteur de forme s'écrira alors $f_F(V, Dir)$.

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 sur ce site et présentées sur la Figure I.9. Les données doivent être expliquées en prenant en compte la proximité de la Mer d'Arabie (au O-SO de Panandhro). La direction moyenne du vent de nuit *Dir* effectue une rotation particulière au cours de l'année.



a

Figure I.9. Humidité relative *RH* (%), vitesse du vent *V* (m s^{-1}, extrapolée à 10 m) et direction du vent *Dir* (°). 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%.

- Période (1) : de décembre à début février sur la Figure I.9, le vent est continental (direction N à SE). *V* nocturne moyenne 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 moyenne 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.

- 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.*, 2007ab). 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.

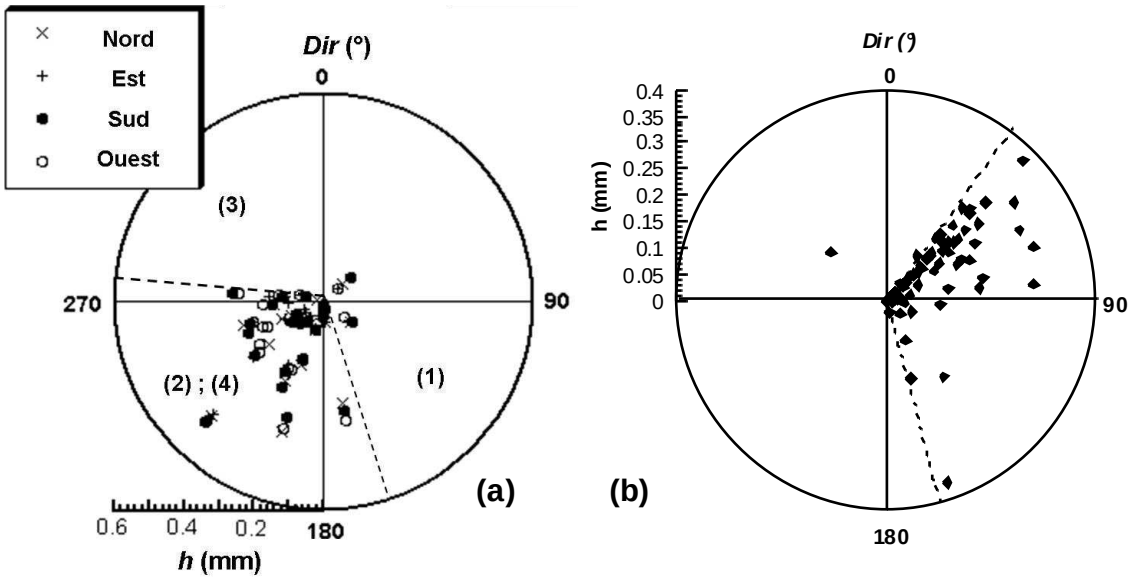


Figure I.10. (a) Rendements de rosée en fonction de *Dir* à Panandhro pour quatre condenseurs 1 m² orientés vers chaque point cardinal et pour la période de mesure du 08/10/05 à 17/04/06
(b) Mêmes résultats pour le site d'Ajaccio sur un prototype de 30 m² pour la période de mesure du 25/07/00 au 31/01/2001.

L'observation de la Figure I.10 laisse à penser que les rendements de rosée sont directement corrélés à *Dir* puisque les événements se regroupent quasi exclusivement pour *Dir* bien localisées (de 170 à 270° pour Panandhro et de 40° à 170° pour Ajaccio). Cependant l'analyse précédente par périodes sur Panandhro montre que pour ce site *V* et *RH* sont liées 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 comparables 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. I.(3) peut s'écrire en incluant le facteur de forme f_F *(V, Dir)* :

$$h = h_0 \cdot f_F(V, Dir) \cdot \left(1 - \frac{T_d - T_a}{DT_0}\right) \qquad \text{I.(5)}$$

4.3 Vitesse du vent V (m s^{-1}) à 10 m

i. Micrométéorologie et utilisation de coupe-vent

De nombreuses mesures sur sites (Muselli *et al.,* 2002a ; Beysens *et al.,* 2003ab ; Mileta *et al.,* 2004 ; Muselli *et al.,* 2006b) confirment que la composante vitesse du vent *f(V)* est un facteur limitant dans la production d'eau par refroidissement radiatif. Par exemple, à Ajaccio, Beysens *et al.* (2005b), n'observent plus aucun événement de condensation pour V_{10} > 2,2 m s^{-1} et même pour des valeurs plus faibles sur Grenoble et Bordeaux (lorsque V_{10} > 0,5 m s^{-1}). 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 l'étude du potentiel de rosée sur des sites comme celui dans l'archipel des Tuamotu (Tikehau) en climat tropical humide (Polynésie Française), 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°57' S, long. 147°39' O) de 2001 à 2005 durant la saison sèche était de 5,48 m s^{-1} (écart type : 3,2 m s^{-1}). La durée moyenne durant laquelle *V* est inférieure à 2,0 m s^{-1} représente seulement 9,8 % des nuits.

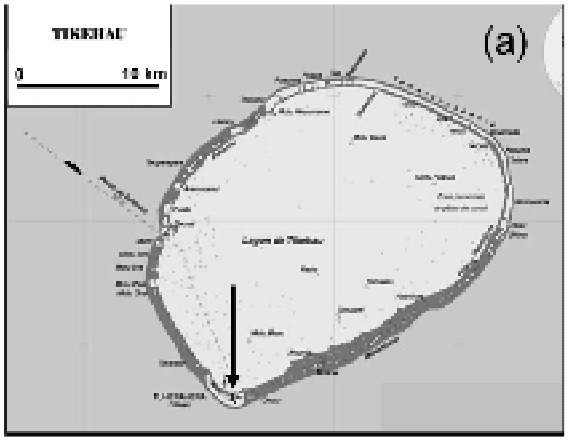
La convention de recherche liant l'U. de Polynésie Française avec l'U. de Corse et le CEA sur la période avril 2004 - novembre 2005 avait pour but l'évaluation de la ressource rosée en climat tropical et spécifiquement dans l'archipel des Tuamotu. Sur ces atolls coralliens affleurant à la surface de l'Océan Pacifique, la ressource en eau douce est très limitée. Pour des précipitations annuelles proches de la moyenne (~1500 mm/an), l'approvisionnement est suffisant pour la consommation humaine. Cependant il y a périodiquement des années de sècheresse durant lesquelles la situation peut rapidement être critique car les autorités doivent alors approvisionner une population dispersée sur une surface équivalente à celle de l'Europe.

Deux sites représentatifs ont été choisis : un atoll corallien de très basse altitude (point culminant 1-2 m) dans l'archipel des Tuamotu (village de Tuherahera, île de Tikehau Island, Polynésie Française) et une île haute et montagneuse (Punaauia, Tahiti Island, Polynésie française) distants tous eux de 320 km. Les données ont été collectées sur chaque site sur un condenseur plan incliné de 1 m² (Protocole de mesure N°2) et complétées sur le site de Punaauia par des mesures en continu sur une balance électronique (Protocole de mesure N°1).

Le volume en eau total correspond au volume de l'eau récupérée dans le flacon par écoulement gravitaire auquel on ajoute le volume des gouttelettes résiduelles raclées manuellement de la surface avant évaporation.

L'atoll de Tikehau (Figure I.11a) est constitué de nombreux petits îlots appelés "motus". Sa superficie est de 448 km². 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 I.11b). Il est exposé au vent Alizé dominant. Le second site (annoté # 2) est situé 300 m à l'Ouest du site # 1 et passablement abrité des vents Alizés par une douzaine de rangées de cocotiers (coupe-vents naturels). Les deux sites se situent 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 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 a été mesurée de 1966 à 2002 sur l'atoll de Takaroa (300 km à l'Est de Tikehau, atoll des Tuamotu) et est estimée à 5 - 8 m/s durant la nuit (Laurent *et al.*, 2004). Le vent souffle avec plus d'intensité durant la saison sèche.

L'atoll de Tikehau est alors un bon exemple d'expérimentation quant à l'étude de l'influence de la vitesse du vent sur la production d'eau par refroidissement radiatif. Les données météorologiques sont disponibles au pas de temps horaire en provenance de la station automatisée de l'aérodrome sur l'atoll voisin de Rangiroa (NE, 63 km) : vitesse du vent 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.



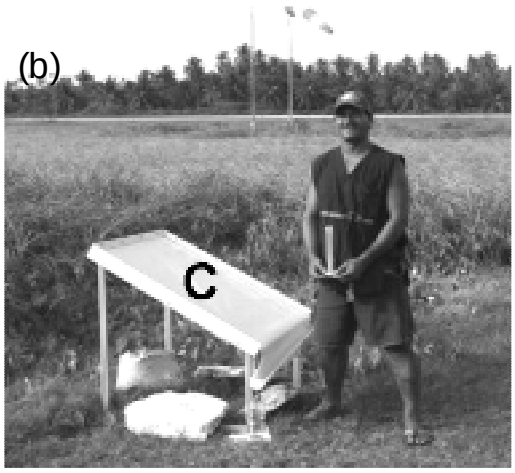


Figure I.11. (a) Atoll de Tikehau dans l'archipel des Tuamotu. La flèche indique l'aéroport de Tuherahera. (b) Condenseur C sur le site # 1 de Tikehau

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 I.13a (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 I.12a). 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 représentatifs des protections naturelles utilisées sur ces territoires.

Le bilan radiatif d'un condenseur installé dans un espace non dégagé a été étudié afin que les rendements ne soient pas limités par une perte de refroidissement radiatif. Le programme mis au point au paragraphe I.9 pour intégrer le bilan radiatif d'un condenseur en fonction de sa géométrie (Clus *et al.*, 2006ab) a été modifié ici pour évaluer le placement optimum du condenseur standard dans la clairière. Le condenseur (C, Figure I.12a) est placé dos aux Alizés, le bilan radiatif est intégré en fonction de X (trait pointillé, Figure I.12b) dans les trois dimensions sur le demi-espace vu par la surface du condenseur.

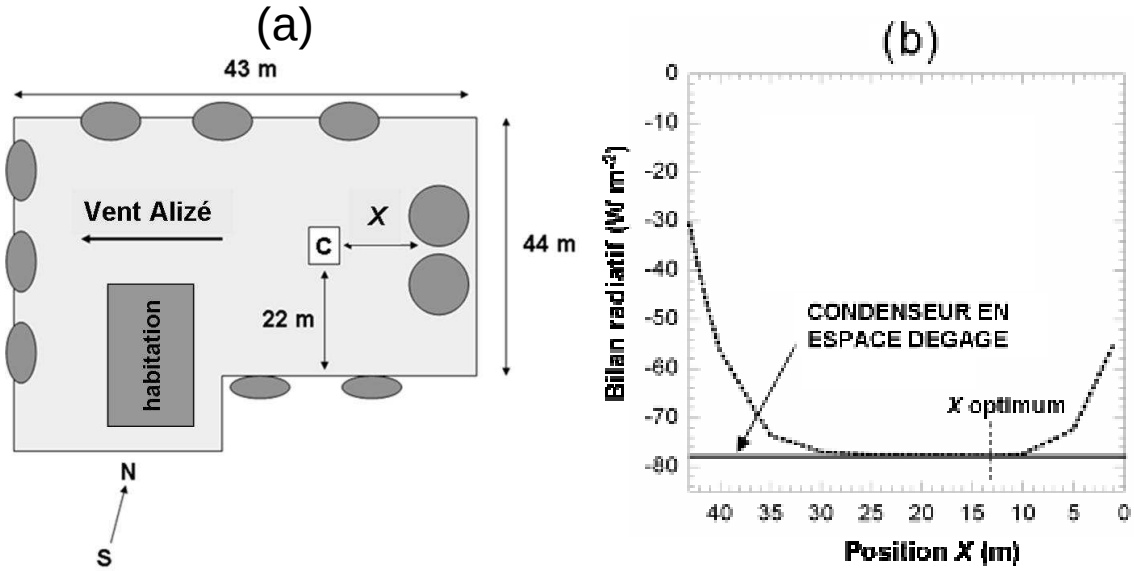


Figure I.12. (a) Schéma d'implantation du condenseur sur le site #2 à Tikehau (échelle non respectée). C : condenseur incliné à 30° avec la face arrière exposée aux Alizés. X (m): distance condenseur – tronc des cocotiers). Cercles (grisés) : cocotiers hauts de 8 m. Ellipses : cocotiers hauts de 6 m. (b) Simulation du bilan radiatif sur C (W m^{-2}, trait pointillé) en fonction de X et pour $T_c = T_a$. Bilan radiatif de C dans un espace ouvert totalement dégagé (W m^{-2}, trait plein).

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 I.12b) 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 I.13a 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 naturel (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 I.13b) montre que $V > 4$ m s^{-1} près de 78 % du temps, dans ce cas, la présence du coupe-vent est importante.

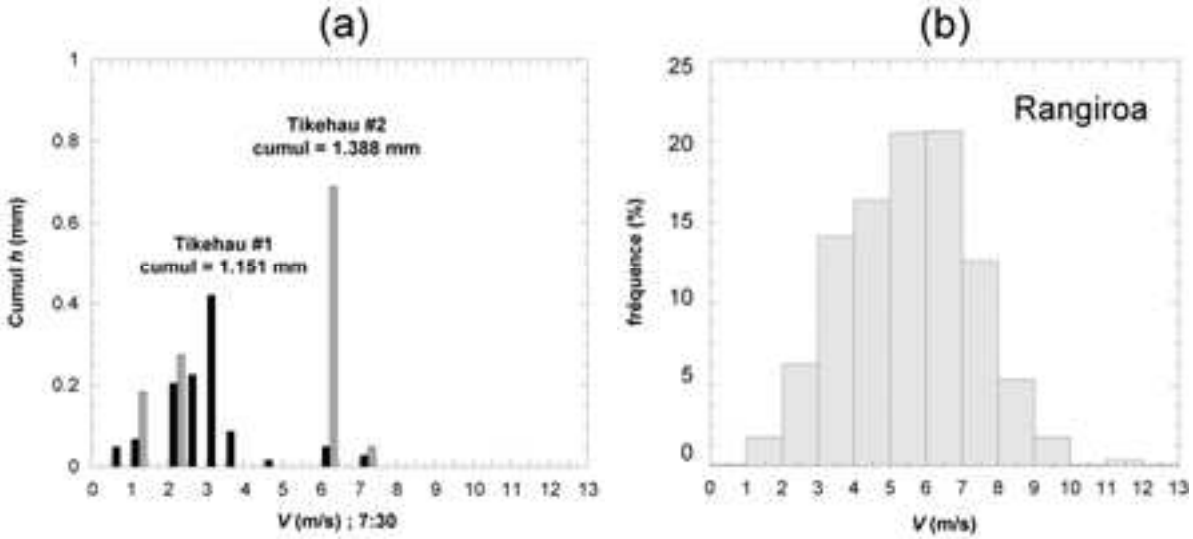


Figure I.13. (a) Rendements de rosée cumulés à Tikehau en fonction de la vitesse du vent V (par classes de 0,5 m s^{-1}). Site #1: histogramme noir ; site #2: histogramme gris. (b) 5 ans (2001–2005) de moyennes de vent nocturne (en % d'heures nocturnes) à Rangiroa sont présentés pour comparaison. Seules 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 m² 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.

A ce jour, 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 (nous venons de le voir) et le condenseur de Yelagiri Hills, tous deux représentés sur la Figure I.14.

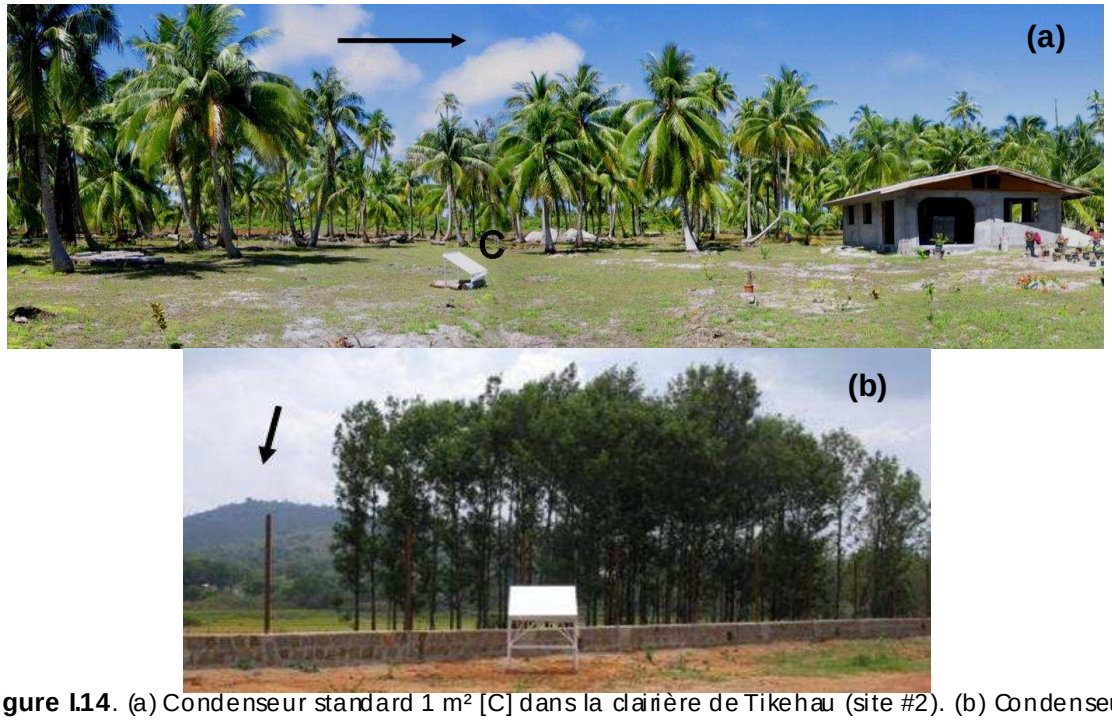


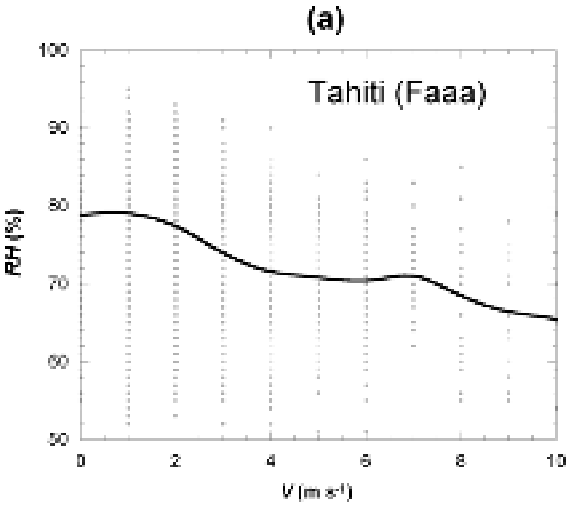
Figure I.14. (a) Condenseur standard 1 m² [C] dans la clairière de Tikehau (site #2). (b) Condenseur de Yelagiri Hills vu de face avec coupe-vent en second plan. Flèches : direction du vent nocturne dominant (photos O. Clus).

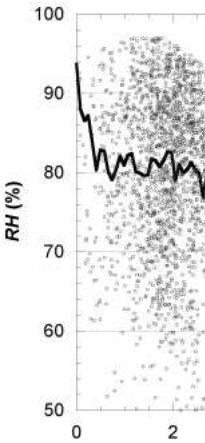
Les coupe-vents végétaux peuvent avantageusement être remplacés par des filets à brouillard verticaux (tels que ceux développés par les Associations Global Nature www.fundacionglobalnature.org/colaboradores/aguacanarias.htm ou Fogquest, www.fogquest.org) sur des sites offrant des ressources mixtes en eau.

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.

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 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 I.15a 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.





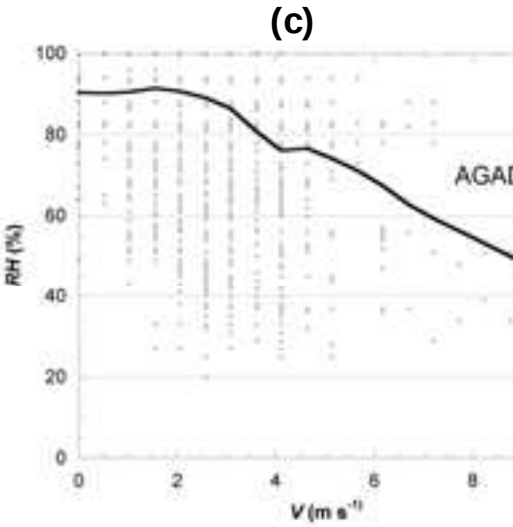


Figure I.15. *RH* (%) corrélée avec *V* durant les nuits claires (avec la condition sur la couverture nuageuse $N \leq 2$). (a) Aéroport de Faaa, Tahiti, Polynésie Française, climat tropical humide, années 2001 à 2005. (b) Ajaccio, Corse, France, climat méditerranéen année 2004. (c) Agadir, Maroc, climat méditerranéen semi aride du 03/01/06 au 30/11/06 (données fournies par Lekouch I.).

A Tahiti, un des caractères du climat tropical humide est que des humidités relatives $RH > 70$ % élevées sont observables pour V_{10} jusqu'à 7,5 m s^{-1}. A titre comparatif, la Figure I.15b présente la même étude effectuée sur le site d'Ajaccio, un site typiquement méditerranéen pour lequel $RH > 70$ % n'est observé que pour $V_{10} < 4{,}5$ m s^{-1}. Cela correspond bien aux mesures de rosée qui indiquaient une forte décroissance pour $V_{10} > 3$ m s^{-1} et une quasi absence d'occurrences si $V_{10} > 4$ m s^{-1} (Muselli *et al.*, 2002a). La condensation de rosée pour $V_{10} > 5$ m s^{-1} (c'est-à-dire pour $RH < 60$ % au vu de la Figure I.15b) 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 I.15c, où nous commençons une collaboration de thèse sur cette thématique avec l'Université d'Agadir), *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. I.(5) 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 abattement 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 m s^{-1} dans le cas d'un condenseur standard 1 m² en terrain dégagé et exposé face arrière au vent sur le site de Tikehau.

V_0 peut être sensiblement augmenté (voisin de 7,5 m s^{-1} à Tikehau) 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.

4.4 Couverture nuageuse N *(Octas)*

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 I.16a). 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 (Figure I.16b). 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 I.1). Cela reflète le fait que le climat tropical est plus humide donnant lieu à de nombreux événements de rosée mais de faibles rendements 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.*, 2005b).

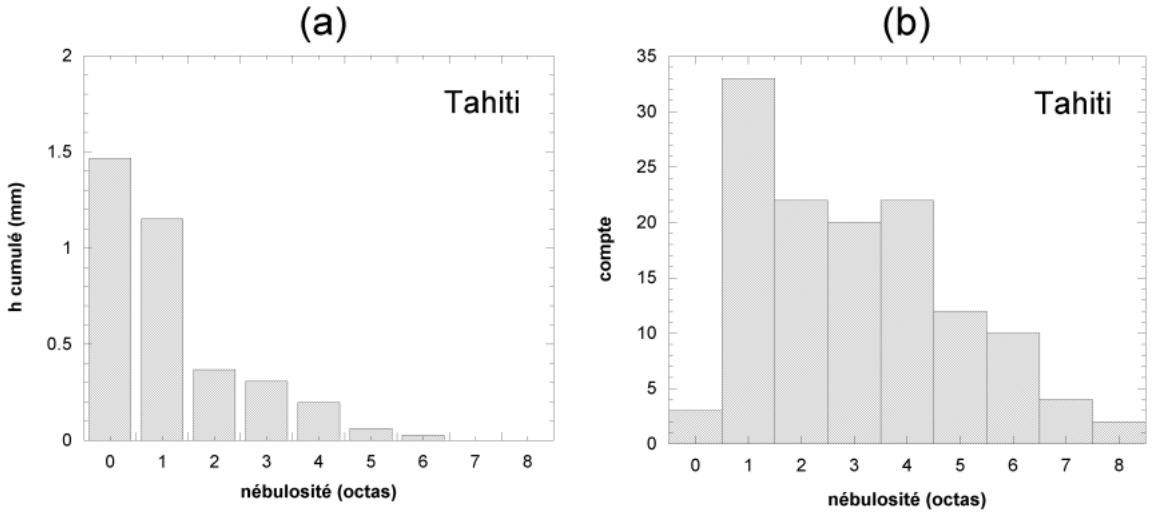


Figure I.16. (a) Rendements cumulés de rosée sur le site de Tahiti représentés en fonction de la nébulosité moyenne (octas) durant la durée de condensation (obtenues sur le PTFE du 8-6-2005 au 14-10-2005). (b) Distribution des valeurs de nébulosité nocturne moyenne (20:00 - 8:00) durant la même période.

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. La puissance de refroidissement (proportionnelle au rendement de rosée) est donc généralement pondérée par le facteur « fraction de ciel clair » (Madeira *et al.*, 2002).

4.5 Rayonnement thermique du ciel

Nous possédons au laboratoire un ensemble de 4 radiomètres montés sur un même bloc (Modèle CNR1, Kipp & Zonen, Figure I.17). Deux pyranomètres CM3, Kipp & Zonen sont montés en sens opposé, l'un face au ciel, le second regardant le sol. Ils mesurent chacun dans leur demi-espace la radiance globale (intégrée) sur la bande 0,3 - 3 µm ; il est ainsi possible de mesurer en continu la puissance solaire reçue au sol ainsi que l'albédo du sol ou bien 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 sous-estime généralement d'environ 3% la radiance IR sur la totalité du spectre de 4 à 100 µm, ce qui est considéré comme négligeable.

Ce dispositif de mesure a été installé sur 2 sites préalablement décrits dans le Tableau I.1 : Ajaccio (20/9/2004 au 3/2/2005, Corse, France) et Tahiti (14/7/2005 au 14/10/2005, Polynésie Française, France).

Figure I.17. Banc expérimental de mesure des radiances visibles et IR, Laboratoire UDC, financements CEA/UDC (photo : M.Muselli)

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 les deux radiomètres. Leur horizon est dégagé et ils se trouvent à une distance de 20 m du condenseur à Tahiti et 10 m à Ajaccio.

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 :

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon_C \left(T_C^4 - T_s^4\right) \qquad \text{I.(6)}$$

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

$$T_s = \left(P_s / \sigma\right)^{1/4} \qquad \text{I.(7)}$$

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

$$P_r \approx \sigma\left(T_a^4 - T_s^4\right) \qquad \text{I.(8)}$$

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 et Fromberg, 1982 ; Garcia et De Luis, 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 et Berdahl (1984), un refroidissement radiatif significatif correspond à $T_a - T_s > 15$ K ($P_r > 50$ W m^{-2}).

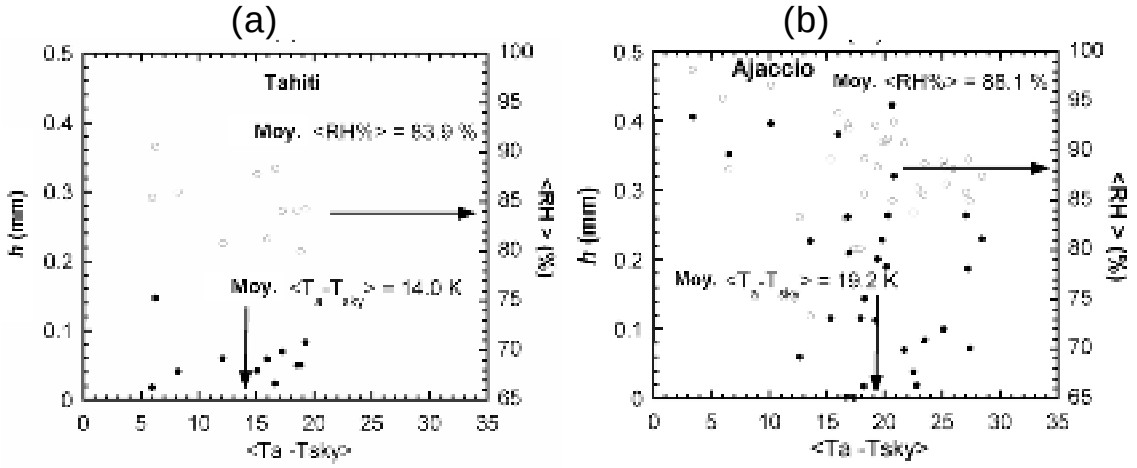


Figure I.18. Rendements de rosée sur condenseur standard (points noirs, ordonnées à gauche) et humidité relative moyenne <*RH*> (cercles blancs, ordonnées à droite) en fonction de la valeur moyenne (pendant la durée de condensation) de la différence <T_a - T_s>. (a) Site de l'Université de Polynésie 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 I.18a (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 I.18b) 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.

Cette différence de puissance de refroidissement induit des événements de rosée présentant des rendements moins importants bien que l'air soit paradoxalement plus humide.

I.4.6 Estimation quantitative du rendement de rosée sans mesure physique

i. Protocole de mesure N°3 – Application à un système en toiture (Biševo)

En partenariat avec l'Institut de Météorologie et d'Hydrologie de Croatie à Zagreb, l'Université de Corse, le CEA et le CNRS ont développé un projet dont l'acronyme D.E.W signifie « Dew Equipement for Water ». Ce projet a consisté à transformer une toiture réelle en un condenseur radiatif de 15,1 m² (pente 24,5°) pour l'estimation du potentiel d'eau condensée par refroidissement radiatif (Figure I.19). Installée sur une île de la mer Adriatique (Biševo, 5,84 km²), cette toiture représente la première application au niveau international d'un matériau commercial sélectionné pour ses propriétés favorables à la condensation de la vapeur d'eau. Les performances du système seront décrites dans la section I.10.1. Dans ce paragraphe, nous présentons le protocole de mesure développé pour nos activités de recherches. La station météorologique employée de marque DAVIS (modèle Vantage PRO II) possède une série de capteurs (Figure I.19) indispensables à l'étude (pas de temps des mesures 15 minutes) :

- (1) anémomètre V (résolution 0,1 m s^{-1}, précision 5%) et girouette Dir (résolution 1°, précision 5%) situés à 3,80 m au dessus du sol ;
- (2) température ambiante T_a (résolution 0,1°C, précision 0,5°C) et humidité relative RH (résolution 1%, précision 5%) mesurées dans un boîtier à l'abri des rayonnements du soleil ;
- (3) : capteurs d'arrosage foliaire AF placés au niveau de la faîtière du toit, l'un horizontal, l'autre dans le même plan que la pente de la toiture. La réponse des capteurs est binaire : AF = 15 ou 0 pour présence ou absence d'eau sur les sondes ;
- (4) : deux thermistances (résolution 0,1°C, précision 0,5 °C) sont placées sur chaque pente du toit pour une valeur approchée de la température de surface des condenseurs :
- (5) : pluviomètre automatique calibré par nos soins (précision 0,2 mm soit 5 ml ± 4%) adapté pour pouvoir mesurer des écoulements de type rosée et évacuer des trop-pleins lors de périodes orageuses.

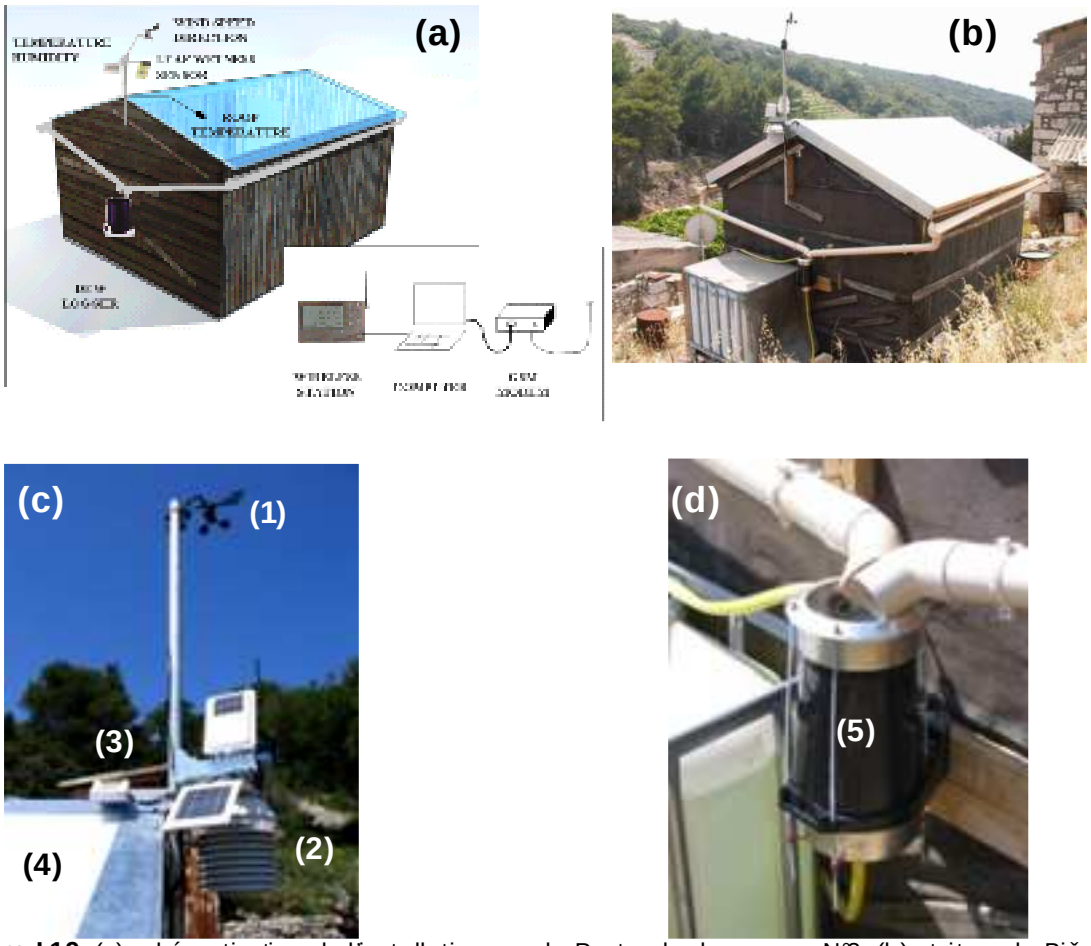


Figure I.19. (a) schématisation de l'installation pour le Protocole de mesure N°3, (b) : toiture de Biševo, 15,1 m² sous 24,5° installée par nos soins en Mars 2005. (c) : sondes de mesures au voisinage du condenseur (1) : V (m s^{-1}) et Dir (°), (2) : T_a (°C) et RH (%), (3) : AF_1 et AF_2, (4) : T_{c1} (°C) et T_{c2} (°C), (5) : m (g).

La Figure I.20 présente un enregistrement typique nocturne sur la toiture de Biševo via le logiciel fourni par la station WEATHERLINK (nuit du 22 au 23 août 2006). Les évènements de pluie sont détectés et écartés par l'analyse des taux de précipitations *dm/dt* correspondant à de forts gradients.

Le profil de précipitations observé sur la Figure I.20a 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).

ii. Utilisation des capteurs AF pour l'estimation de la ressource

Le capteur plan AF_1 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 (valeur réelle 15, 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 Biševo. h_0 est alors le taux de condensation maximum (mm h^{-1}) que peut atteindre ce système. L'Eq. I.(5) s'écrit :

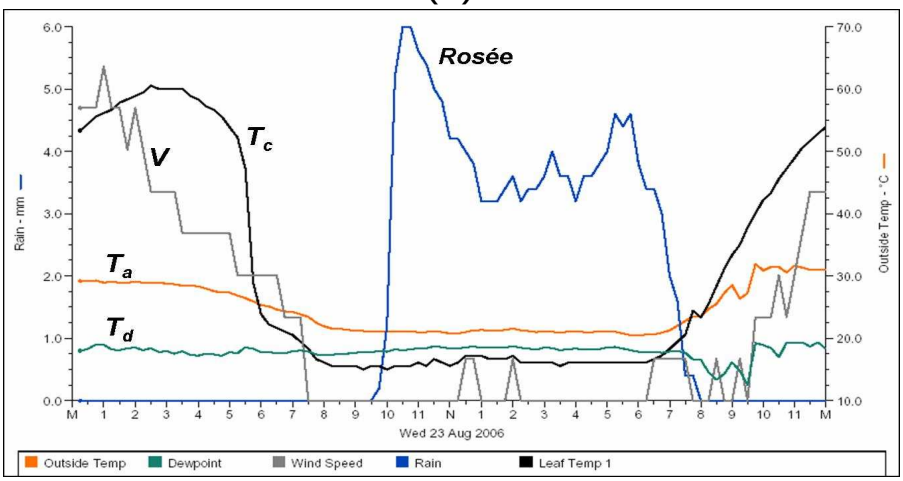
$$h_i = h_0 \cdot f_F(V, Dir) \cdot AF_i \cdot \left(1 - \frac{T_{di} - T_{ai}}{DT_0}\right) \qquad \text{I.(9)}$$

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

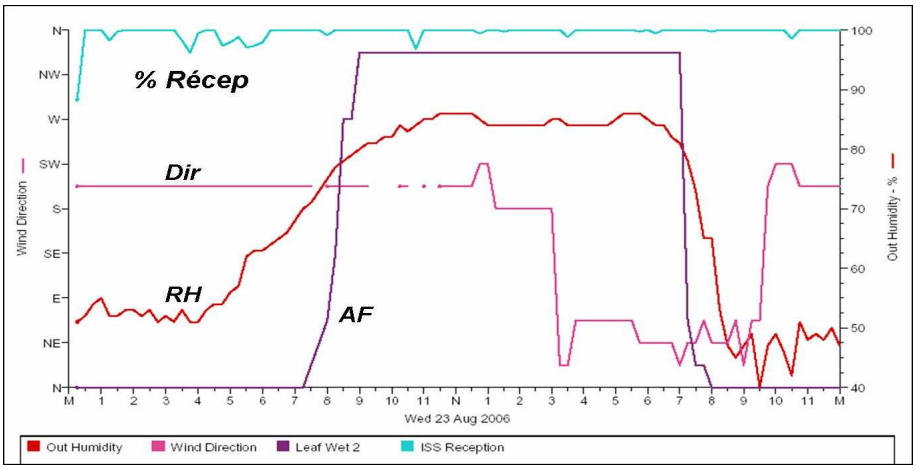
Facteur de forme

La toiture de Biševo a été modélisée en CFD (Computional Fluid Dynamic) suivant la méthode décrite au paragraphe I.9 pour les valeurs de vent 0,5 ; 1,0 ; 2,0 et 3,0 m s^{-1} et de direction perpendiculaire à la faîtière. 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 $f_F(V\,;\,0°) = 1$. Les résultats de la simulation pourront éventuellement être ultérieurement extrapolés à d'autres directions de vent *Dir* grâce à la détermination par simulation de $f_F(V\,;\,Dir)$.

(a)



(b)



(c)

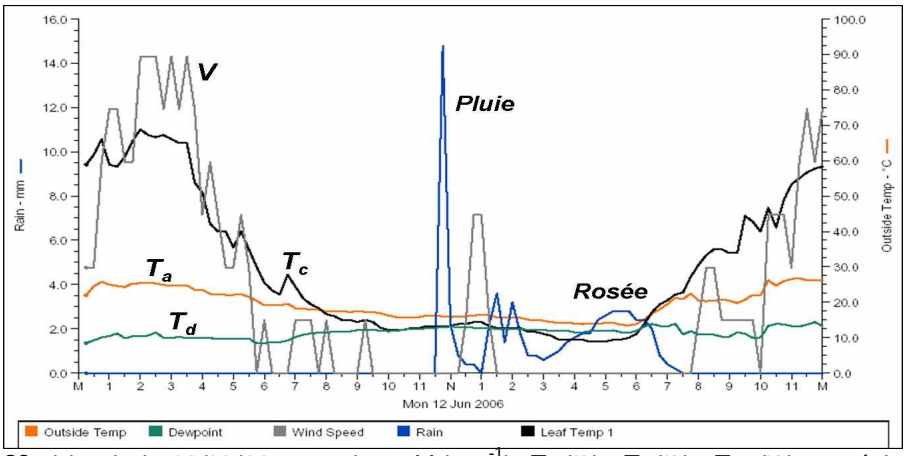


Figure I.20. (a) nuit du 22/08/06 : grandeurs V (m s^{-1}), T_a (°C), T_d (°C), T_{c1} (°C) et Précipitations dh/dt (mm) (15 minutes) telles que données par Weatherlink lors d'un cumul de rosée de 0,32 mm ; (b) nuit du 22/08/06 : grandeurs RH (%), Dir (12 classes de 22,5 °), AF_1 (valeurs retenues 15 ou 0) et le 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.

Rendement idéal h_0

La série de données collectées à Bišev o 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 I.21).

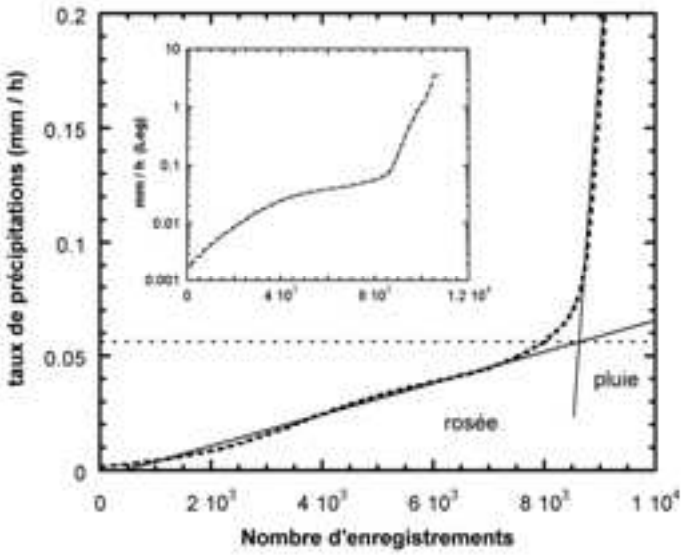


Figure I.21. Taux de précipitation horaire mesuré à Bišev o du 16/06/05 - 31/08/06 (toutes précipitations). (insert) : vue d'ensemble en ordonnées logarithmiques.

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 $h_0 \approx 0{,}055$ mm h^{-1}.

Détermination de DT_0

La valeur $DT_0 = 6{,}4$ °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 I.8. La Figure I.22 compare les résultats simulés selon les Eq. I.(9) et I.(10) avec les mesures physiques. Les événements de pluie sont exclus grâce aux enregistrements du pluviomètre automatique et à l'exclusion des évènements à forts gradients *dm/dt*.

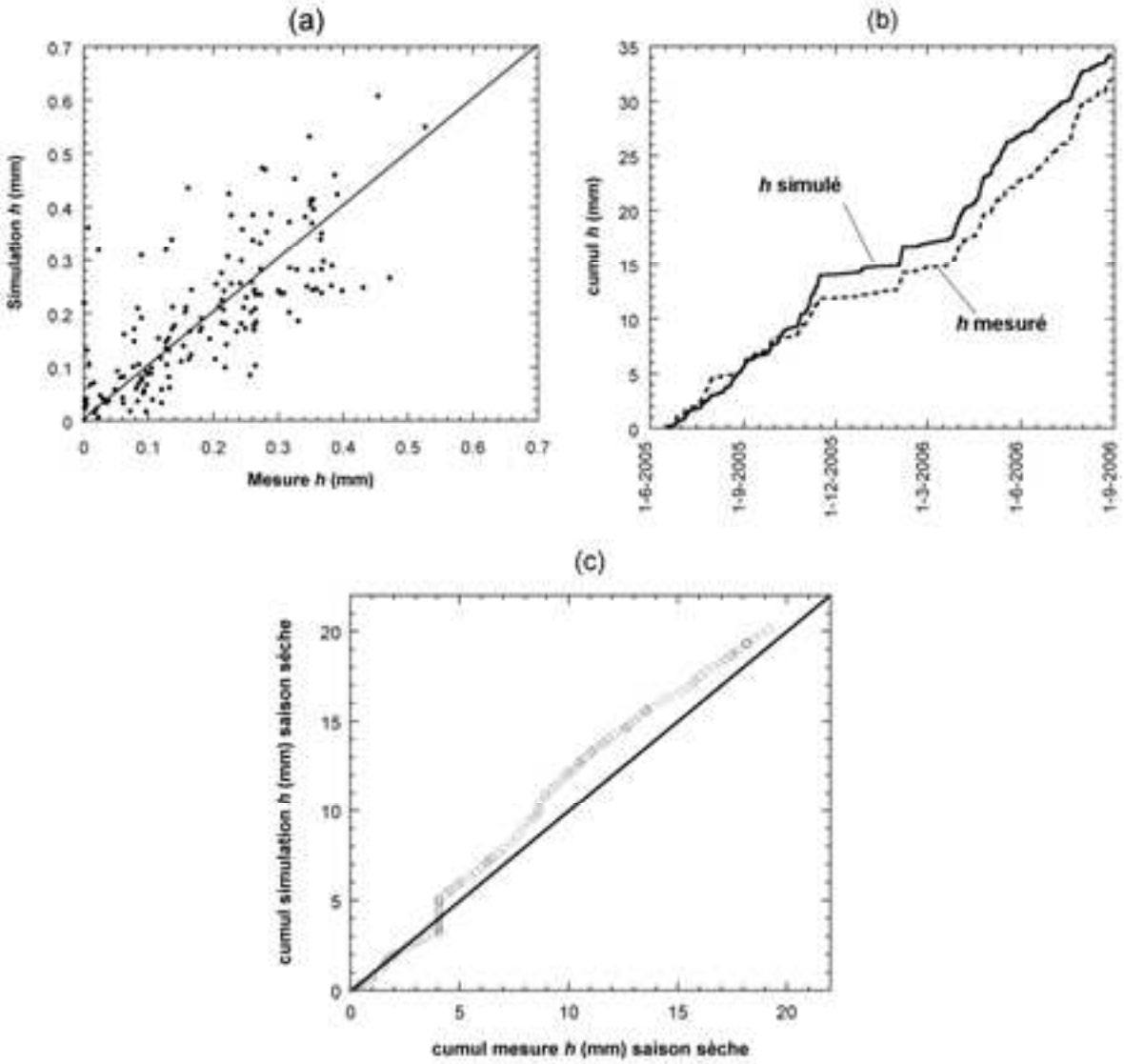


Figure I.22. (a) Distribution des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées. (b) cumuls comparés des volumes simulés et mesurés sur l'ensemble de la période du 16/6/2005 au 31/8/2006. (c) idem pour les mois de saison sèche du 16/6/2005 au 30/9/2005 et du 1/5/2006 au 31/8/2006 en fonction de la disponibilité des mesures AF_1.

Dans l'optique de la détermination d'un potentiel d'eau condensée par refroidissement radiatif, la Figure I.22 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 maximas peu éloignés 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 similaire des valeurs cumulées de simulation et de mesure avec un écart de 7 % en faveur des simulations en fin de période (Tableau I.4). Il est toutefois possible de différencier la saison sèche de la saison hivernale où lors de cette dernière saison 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 dus à une grande clarté de ciel. Ici, le comportement binaire du capteur AF est bien adapté au ciel clair.

180 jours de rosée 16/6/05 – 31/8/06	Simulation AF_1	Mesures physiques
rosée (cumul, mm)	34,2	31,9
Fiabilité à la mesure	107 %	100 %
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
Fiabilité à la mesure	105 %	100 %
Rosée Max. (mm)	0,414	0,472
Rosée moyenne (mm/événement)	0,165	0,167
Ecart type	0,103	0,125

Tableau I.4. 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.

L'ensemble des travaux sur la compréhension de l'influence de la météorologie sur le rendement de collecteur radiatif est en cours d'exploitation par l'obtention d'une formulation simple, utilisant peu de paramètres et présentant de bons résultats. Enfin, la protection de la formulation en test sous le régime des brevets garantissant leur propriété intellectuelle étant en cours, celle-ci sera tenue confidentielle et non exploitée dans ce document.

Maquette (échelle 1/10ème) d'un condenseur radiatif (2000 – 2002)

Nous avons vu précédemment que les systèmes de mesure développés pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique mettent en valeur une ressource totalement inexploitée comme source alternative en eau pour des populations isolées. Malgré des rendements assez modestes (de l'ordre de 0,4 à 0,6 mm et ne pouvant théoriquement dépasser 0,8 mm), cette estimation de potentiel a permis d'envisager des collecteurs de plus ou moins grandes envergures qui pourraient récupérer plusieurs litres voire plusieurs dizaines de litres d'eau condensée. En effet, pour un site présentant un rendement moyen de 0,2 mm/nuit, une simple toiture de 100 m² aurait un rendement de 20 L/nuit, quantité non négligeable dans le bilan hydrique d'une population.

Nous avons vu que le vent est nécessaire pour apporter de l'air humide vers le condenseur mais une vitesse de vent importante diminue le refroidissement radiatif du collecteur. C'est l'un des buts de ces travaux : comment augmenter les performances des systèmes type « aile-plan » par rapport au vent en modifiant uniquement sa structure ?

Dans cette optique de développement des premiers prototypes, nous avons construit une maquette d'un condenseur type « aile-plan » à l'échelle 1:10ème (1 m x 0,3 m). Cette maquette avait pour objectif de simuler un prototype 10 fois plus grand soit 10 x 3 m². A partir de cette étude, les caractéristiques du Protocole de mesure N°2 (condenseur de référence 1 m²) décrit à la section I.3.1, ont été élaborées.

Les résultats de ces travaux ont donné lieu à diverses publications et communications : Muselli *et al.* (2002a), Muselli *et al.* (2002c), Beysens *et al.* (2003a), Beysens *et al.* (2003b).

Nous considérons alors un condenseur à inclinaison variable (0° à 90°). Un tel système a plusieurs intérêts : réduire la vitesse du vent à proximité de la surface de condensation et favoriser l'écoulement gravitaire des gouttelettes d'eau (pour des angles proches de 90°). Cependant, le refroidissement radiatif diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison ; un compromis devait alors être trouvé.

En collaboration avec le LMM (Laboratoire de Modélisation en Mécanique, Marseille), une étude numérique 2D (code numérique FIDAP, Khris, 1997, éléments finis) a été entreprise sur un modèle plan de 1,2 m de largeur et 10 mm d'épaisseur (Figure I.23). En entrée du domaine de simulation numérique, la vitesse du vent a été prise égale à V_{10} = 10 m s^{-1}. Les principaux résultats de l'étude concement les lignes de courant du fluide et la distribution de vitesse. La Figure I.23b présente l'évolution du vent sur un axe vertical par rapport à un point M_0 au milieu du plan incliné. Le résultat principal est que l'écoulement est laminaire malgré une importante vitesse de vent à 10 m.

La vitesse du fluide estimée à 0,1 m $V_{0.1}$ au dessus du condenseur, est tracée sur la Figure I.24, en fonction de V_{10} et de l'angle d'inclinaison du plan. Cette vitesse présente un minimum pour θ = 30°.

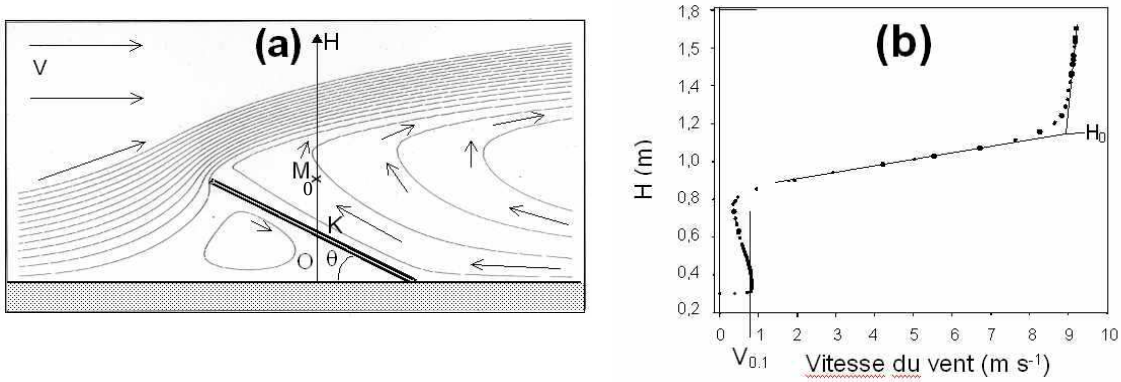


Figure I.23. (a) : ligne de courant du fluide en écoulement autour d'un plan incliné à un angle θ pour V_{10} = 10 m s^{-1}. (b) : Evolution de la vitesse du fluide suivant un axe vertical situé en un point M_0 au dessus d'un point K, milieu du plan incliné.

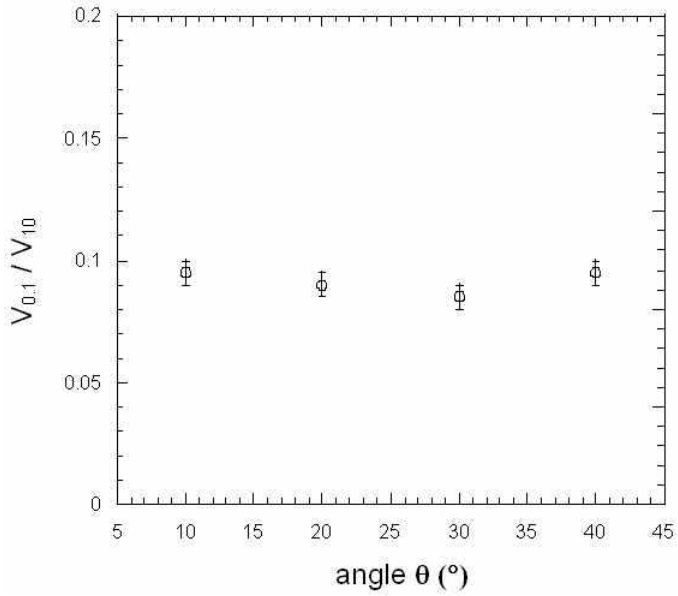


Figure I.24. Corrélation $V_{0.1}/V_{10}$ en fonction de l'angle d'inclinaison du plan

Les expériences numériques ont été confirmées par la construction d'une maquette de condenseur à l'échelle 1/10ème au Nord de Grenoble (45°11' latitude N, 5°42' longitude E), 215 m d'altitude. Un condenseur inclinable (θ ∈ [0 - 45°]) de dimension 1 x 0,3 m² construit avec du film radiatif et un isolant type polystyrène expansé 20 mm (défini lors du Protocole N°2, Nilsson, 1994) est maintenu sur une structure solide avec des cornières de 13 mm (Figure I.25ab). Un thermocouple type K (résolution 0,1 °C, précision 0,5°C) mesure la température de surface T_c du collecteur en son centre.

Ce dispositif est couplé à une balance électronique (Protocole de mesure N°1, décrit dans la section I.3.1) où le substrat de référence est du PMMA. Les enregistrements météorologiques mesurés sont identiques à ceux collectés lors du protocole N°1 avec comme variante $T_c = T_{ref}$ la température de surface du PMMA.

Les deux systèmes sont placés côte à côte sur une table à 1 m du sol, dans une zone dégagée.

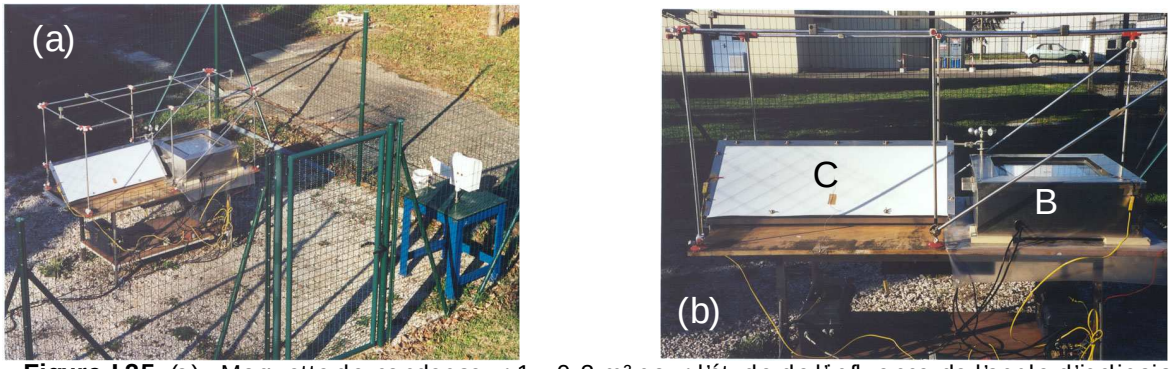


Figure I.25. (a) : Maquette de condenseur 1 x 0,3 m² pour l'étude de l'influence de l'angle d'inclinaison d'un plan incliné sur la production en masse d'eau condensée. (b) : dispositif complet : C : maquette, B : balance avec PMMA (Photo : D.Beysens)

Afin de comparer l'efficacité de la maquette par rapport à la plaque PMMA de référence, le facteur de forme $f_F(V)$, appelé également gain en température, défini à l'Eq. I.(4) est adapté et doit présenter un maximum si l'on considère que :

- ✓ pour $\theta = 0$, $f_F(V) \approx 1$;
- ✓ pour $\theta \geq 0$, $f_F(V) \geq 1$; le vent diminue sur le condenseur tandis que le flux radiatif ne change pas de manière appréciable ;
- ✓ pour $\theta >> 0$, $f_F(V) < 1$; le flux radiatif diminue fortement avec une augmentation importante de θ.

Le facteur de forme $f_F(V)$ a été étudié en fonction de θ mais également en prenant comme paramètre la présence ou l'absence de l'isolation en face arrière du film radiatif (Figure I.26).

Pour le paramètre facteur de forme, l'angle d'inclinaison qui fournit le meilleur résultat est environ 21°. Cependant, le rendement en eau obtenu par gravité est important dans notre travail. La gravité conduit à une force d'action sur les gouttes qui varie comme $\sin \theta$. Ainsi, $\theta = 90°$ serait le meilleur angle pour la gravité mais pas pour le refroidissement radiatif. Nous avons choisi comme compromis final (critères : vitesse de l'écoulement et facteur de forme), l'angle 30° qui est un compromis entre 21° issu des résultats sur $f_F(V)$ et 90° pour récupération de l'eau par gravité. De plus, cet angle coïncide à la meilleure solution pour limiter l'échauffement

du film par convection forcée. En effet, passer de 21° à 30° induit une force de gravité qui représente tout de même 50% de celle sous $\theta = 90°$ mais permet un gain en température de 120% par comparaison à la plaque PMMA de référence (perte de seulement 3,5% de 21° à 30°).

Cette configuration (θ = 30°) sera adoptée pour la construction des premiers grands prototypes de condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique sur le site de l'Université de Corse à Ajaccio.

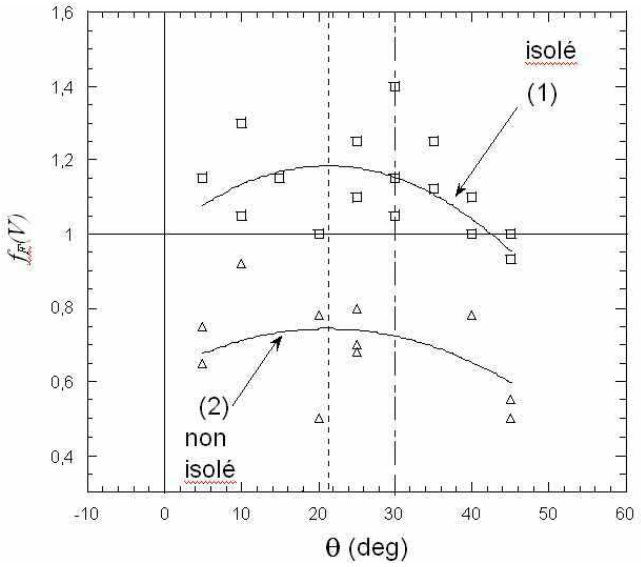


Figure I.26. Effets de l'isolation thermique du film radiatif et de l'angle θ sur le facteur de forme $f_F(V)$ défini par l'Eq. I.(4). Les courbes 1 et 2 correspondent aux modèles élaborés dans l'étude (développement simple de θ à l'ordre 2, voir Beysens *et al.*, 2003a)

Construction des condenseurs radiatifs « aile-plan » de 30 m² (2000 – 2003)

Le déroulement logique de nos travaux de recherches a nécessité la construction des premiers prototypes « plan » en application des résultats obtenus sur maquette.

Sur la période 2000 – 2003, pour une première à l'échelle mondiale nous avons construit les premiers systèmes « plan » de condenseurs radiatifs de surface 30 m². Dans cette section, nous ne présenterons qu'un résumé de nos articles scientifiques liés à ce développement (Muselli et Beysens, 2001, Muselli *et al.*, 2002a, 2002c ; Muselli *et al.*, 2004a ; Beysens *et al.*, 2005d ; Muselli *et al.*, 2006b).

6.1 Prototypes « plan » P1, P2 : 30 m²

L'objectif était de construire des prototypes de même dimension 30 m² ayant des structures aérodynamiques différentes pour pouvoir étudier l'influence de cette structure sur les performances du système.

Le prototype 1 (baptisé P1) est une structure aérienne de 30,97 m² de surface de condensation active (Figure I.27a). Il s'agit d'un plan incliné à 30° composé d'une structure grillagée supportant un film radiatif (Nilsson, 1994) isolé en face inférieure par des plaques de polystyrène expansé de 30 mm. Sa période d'exploitation s'est étendue entre le 22/07/2000 et le 11/11/2001 (478 jours). L'eau est récupérée dans une citerne de 25 L en polyéthylène. La partie basse du condenseur se situe à 0,5 m pour 2 m de hauteur totale. La face cachée de P1 est orientée face au vent dominant nocturne (NE) mesuré sur le site et sa face active, orientée vers le SW lui permet de produire de l'eau malgré un cycle diurne amorcé. Il a été instrumenté par 3 thermocouples type K (résolution 0,1°C ; précision 0,5°C ; pas des mesures 15 minutes) positionnés au centre (x_2 = 5,3 m, y_2 = 1 m) et à 5 cm du bord de la structure (x_1 = 9,95 m, y_1 = 1,5 m ; x_3 = 9,95 m, y_3 = 0,5 m) afin d'étudier les effets de bord.

Le prototype P2, de surface active 29,83 m² est une structure au sol (Figure I.27b), simulant une dune stabilisée, et distant du P1 d'environ 60 m. Beaucoup moins sensible au aléas climatique, sa composition et son orientation sont les mêmes que P1 (film radiatif + isolant thermique, face active orientée 220°) et son instrumentation en température respecte également les mêmes coordonnées *x*, *y*. Sa période d'exploitation s'est étendue entre le 10/12/2001 au

10/12/2003 (731 jours). Pour les deux condenseurs, la quantité d'eau recueillie est décomposée en une partie récupérée par gravité et une partie récoltée mécaniquement. Pour ces prototypes, nous disposons uniquement de la masse d'eau finale et non pas du profil de production durant la nuit.

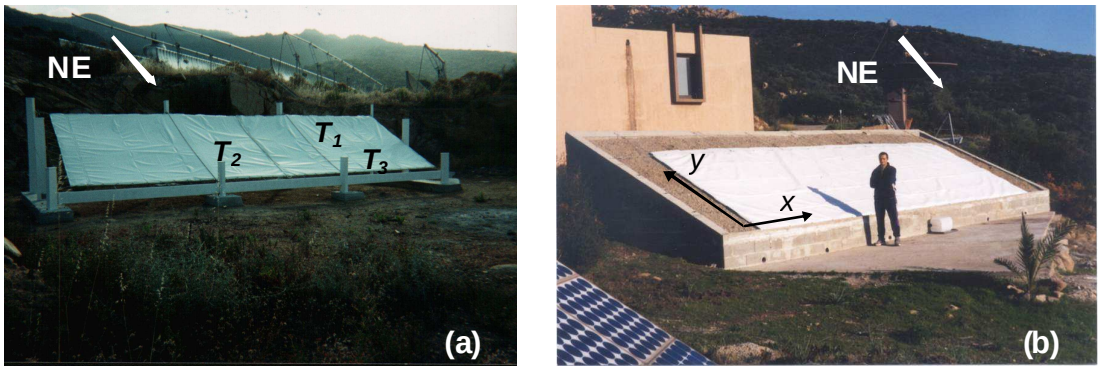


Figure I27. Condenseurs type « aile-plan » aérien P1 (a) et au sol P2 (b) de surface active 30 m² construits à l'Université de Corse entre 2000 et 2003. NE : direction dominante du vent nocturne.

T_1, T_2, T_3 : thermocouples de surface type K pour la détermination des gains en température.

6.2 Principaux résultats

La Figure I.28 présente les performances des 2 prototypes par comparaison à la plaque étalon PMMA (référence).

Concernant la Figure I.28a, les rendements des P1 et P2 sont similaires par comparaison avec la plaque de référence : forts rendements pour les prototypes en hiver et au printemps et faibles rendements sur les 2 autres saisons s'approchant de ceux de la référence, résultats confirmés par des études précédentes (Beysens *et al.*, 2005b, 2005c) montrant que le vent est plus faible en ces saisons. L'architecture optimisée (orientation, inclinaison, structure) des grands condenseurs augmente sensiblement leurs performances :

- ✓ +15,9 % et + 15,3 % d'évènements observés respectivement entre P1/Ref1 et P2/Ref2 ;
- ✓ le rendement moyen obtenu est nettement amélioré avec 0,118 mm pour P1 contre 0,076 mm sur PMMA et 0,111 mm pour P2 contre 0,084 mm pour PMMA. P1 et P2 ont produit

un rendement maximum pour une nuit de 11,4 L et 9,89 L (rendements moyens : 3,58 L/nuit et 3,15 L/nuit) ;

- ✓ le seuil d'humidité relative observé pour la condensation H_0 est sensiblement diminué (Figure I.28b) : - 3 % pour P1/Ref1 et – 4,4 % pour P2/Ref2. A titre comparatif, une précédente étude (Lushiku et Kivaisi, 1989) permet de noter les progrès importants obtenus par la conception des condenseurs plan ;
- ✓ L'écart moyen $< T_d(H_0) - T_a >$ en K, représentant le pouvoir de refroidissement de la machine thermique est sensiblement augmenter également : -3,4 et –3,7 K pour P1 et P2 à comparer au – 2,8 K de PMMA ;

- ✓ Les comportements des grands systèmes sont meilleurs par rapport à la composante vitesse du vent (Figure I.28c). Ils permettent d'obtenir pour un même vitesse de vent V_{10} des rendements bien supérieurs à ceux obtenus sur une plaque horizontale ;

- ✓ Enfin, la nouvelle architecture développée (plan incliné 30°, isolé, orienté contre le vent dominant) génère des facteurs de formes $f_F(V)$ très importants (Figure I.28d) : $f_F(V, T_2)$ = 2,35 ± 0,37 au centre du système et $f_F(V, T_3)$ = 2,09 ± 0,25 près du bord du système dû aux effets de bord. Compte tenu des effets d'échelle, ces gains en températures sont plus grands que ceux obtenus sur la maquette 1:10ème puisque $f_F(V)$ = 1,2 (Beysens *et al.*, 2003a).

Ces architectures nouvelles de condenseurs ont montré leur efficacité pour la production de vapeur d'eau atmosphérique sur des sites isolés dépourvus de cette ressource. Ils ne nécessitent aucun entretien particulier et surtout n'utilisent aucune énergie pour leur fonctionnement.

Afin d'améliorer ces systèmes et de pouvoir prédire leurs performances en tout point d'une région, nous avons envisagé de développer une modélisation thermodynamique et hydrodynamique simple permettant de simuler le phénomène de condensation sur ces collecteurs.

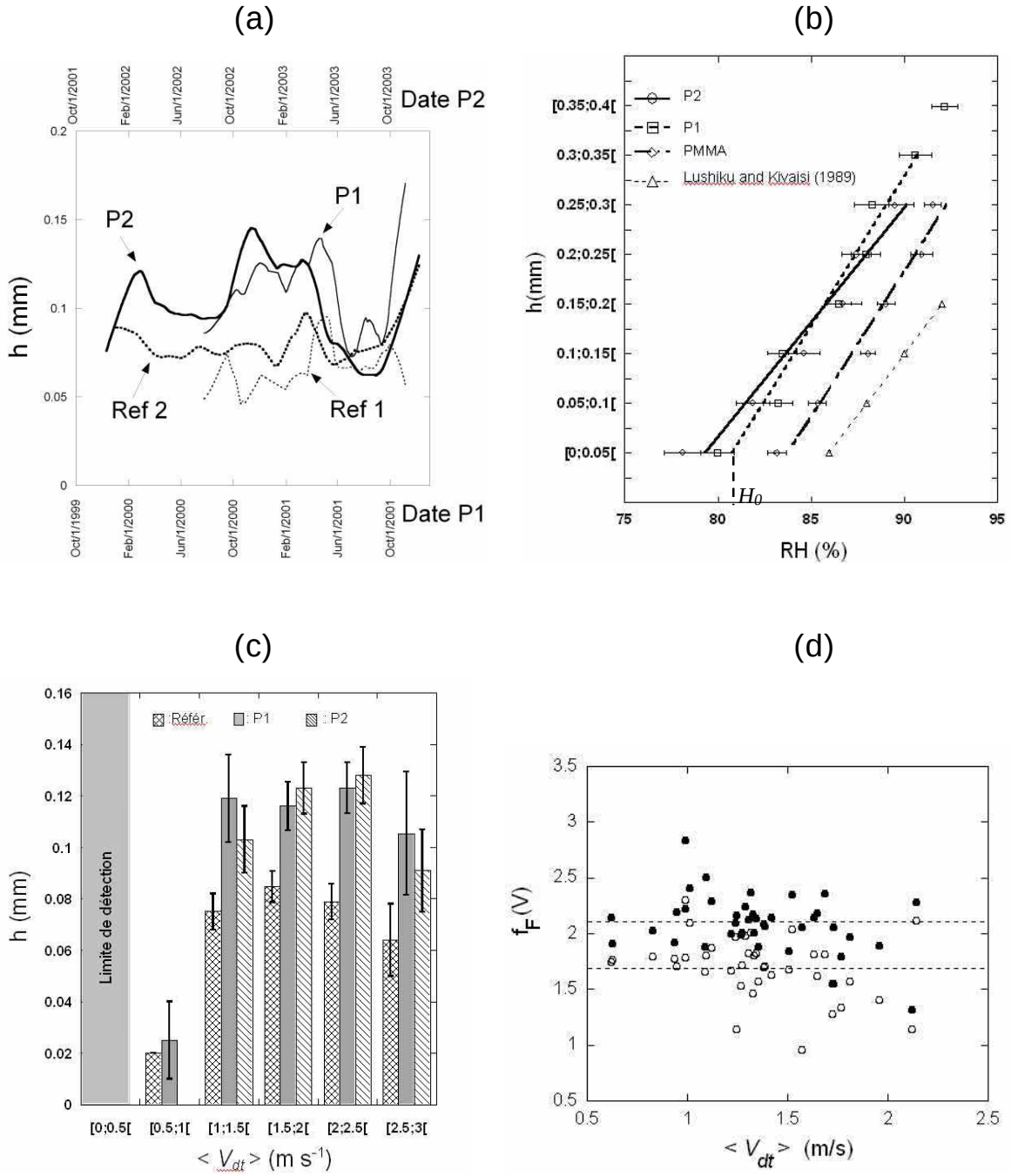


Figure I.28. Performances des prototypes *P1* et *P2* par comparaison à une référence PMMA.

(a) : Rendement en eau (mm), *P1* : ligne fine noire, *Ref1* : ligne pointillée fine

P2 : ligne noire épaisse, *Ref2* : ligne pointillée épaisse

(b) : Rendement (mm) en fonction des *RH* moyens (%) sur *dt*

(c) : Rendement (mm) en fonction des *V* moyens (m s^{-1}) sur *dt* (classe de 0,5 m s^{-1})

(d) : Facteur de forme (gain en température) entre *P1/Ref1* et *P2/Ref2* (marques noires $f_F(V, T_2)$ au centre du condenseur, marques blanches $f_F(V, T_3)$ au bord du prototype)

Modélisation thermodynamique et hydrodynamique du phénomène de condensation de vapeur d'eau atmosphérique sur un capteur plan

Plusieurs modèles, permettant de calculer des quantités d'eau condensée à partir de données météorologiques, ont été décrits dans la littérature (Goudriaan, 1977 ; Weiss, 1990 ; Janssen et Römer, 1991 ; Gleason *et al.*, 1994 ; Nilsson, 1996 ; Kounouhewa et Awanou, 1999 ; Luo et Goudriaan, 2000 ; Jacobs *et al.*, 2000 ; Madeira *et al.*, 2002).

Le modèle mathématique, développé dans ce travail, est basé sur les modèles de Pedro et Gillespie (1982)a, Pedro et Gillespie (1982)b et Nikolayev *et al.* (1996). L'équation bilan de chaleur du condenseur est :

$$\frac{dT_c}{dt}\left(Mc_c + mc_w\right) = R_i + R_{he} + R_{cond} \qquad \text{I.(11)}$$

où : T_c est la température du condenseur, M et m sont les masses du condenseur et de l'eau condensée respectivement, c_c et c_w sont les chaleurs spécifiques du matériau du condenseur et de l'eau, t représente le temps. Les variables dans le second membre de l'Eq. I.11 représentent les différents processus physiques intervenant dans les transferts d'énergie au niveau de la surface du condenseur : R_i transfert radiatif, R_{he} échange convectif de chaleur avec l'air environnant et R_{cond} est le gain d'énergie dû à la chaleur latente de condensation L_c par unité de masse. Ainsi,

$$R_{cond} = L_c \frac{dm}{dt} \qquad \text{I.(12)}$$

Le terme d'échange avec l'air environnant peut être exprimé sous sa forme générale :

$$R_{he} = S_c \; a \; \left(T_a - T_c\right) \qquad \text{I.(13)}$$

où : a est un coefficient de transfert thermique, T_a est la température ambiante et S_c est la surface du condenseur. Le paramètre a est lié à l'épaisseur de la couche limite aérodynamique et dépend de la vitesse du vent V par l'expression :

$$a = kf\sqrt{V/D} \qquad \text{I.(14)}$$

dans laquelle le facteur numérique f = 4 W.K^{-1}.m^{-2}.s$^{1/2}$ est empirique (Pedro et Gillepsie, 1982a) pour un écoulement sur une plaque plane de taille $D=\sqrt{S_c}$. Nous introduisons ici un coefficient de correction k qui dépend de la position relative du condenseur par rapport à l'anémomètre de mesure et des conditions particulières de l'écoulement.

Le terme d'irradiation totale de l'Eq. I.(11) peut être divisé en plusieurs parties :

$$R_i = R_s + R_L - R_c \qquad \text{I.(15)}$$

où : R_s est un terme d'irradiation du soleil (direct + diffus), non considéré dans la suite car la rosée se forme principalement la nuit. R_c représente l'irradiation quittant le condenseur :

$$R_c = S_c \varepsilon_c \quad \sigma T_c^4 \qquad \text{I.(16)}$$

où : σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ε_c l'émissivité du condenseur.

Enfin, le terme R_L, représentant le transfert radiatif de l'atmosphère est donné par Pedro et Gillepsie (1982a). Il est fonction de l'émissivité du ciel qui dépend de la température ambiante T_a et la fraction N de ciel couvert.

L'équation représentant la masse m est décrite par le taux de condensation :

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} S_c\, b\left(p_{sat}(T_d) - p_c(T_c)\right), & si \quad positif \\ 0 & \end{cases} \qquad \text{I.(17)}$$

où : $p_{sat}(T)$ est la pression de saturation à la température T,

$p_c(T)$ est la pression de vapeur sur le condenseur dépendant de l'état d'humidification de la surface avant la condensation,

b est le coefficient de transfert de masse qui est proportionnel au paramètre a :

$$b = 0{,}656\, ga/(pc_a) \qquad \text{I.(18)}$$

où : p est la pression atmosphérique (considérée constante sur une simulation),

c_a est la chaleur spécifique de l'air,

g est un paramètre ajustable que nous avons rajouté pour la simulation et qui prend en compte les conditions particulières d'écoulement autour du condenseur.

Les Eqs I.(11) et I.(17) forment un couple d'équations différentielles ordinaires qui est intégré séparément pour chaque nuit d'observations. Deux paramètres (k et g) seront étudiés de part leurs valeurs numériques mais également leurs variations temporelles.

Les données d'entrée du modèle sont simples : t temps en seconde, V vent en m s^{-1}, N nébulosité en octas (fournie par Météo-France), T_a température ambiante en °C, RH humidité relative en %, $T_{c(exp)}$ température expérimentale T_c de la surface du condenseur en °C. Pour $m_{(exp)}$ masse expérimentale de l'eau condensée, deux variantes sont possibles dans la modélisation :

- soit le modèle intègre le profil de dépôt en masse de l'eau $m_{(exp)}$ dans le cas du Protocole de mesure N°1 type balance électronique ;
- soit le modèle intègre uniquement la masse finale $m_{(exp,finale)}$ mesurée au matin dans le cas des grands condenseurs P1 ou P2.

Le modèle va déterminer la température simulée du substrat $T_{c(sim)}$ en adaptant le paramètre k par la méthode des moindres carrés. Le paramètre g est fixé et n'intervient pas sur la température T_c. La valeur de k permettant la minimisation entre $T_{c(exp)}$ et $T_{c(sim)}$, est utilisée dans une seconde étape pour minimiser la différence entre $m_{(exp)}$ et $m_{(sim)}$ en ajustant le paramètre g.

Les paramètres physiques utilisés au cours de cette étude sont décrits pour tous les systèmes dans le Tableau I.5.

Paramètres		***PMMA***	***PTFE***	***Film radiatif***
Emissivité	ε_c	*0,94*	*0,85*	*0,90*
Chaleur spécifique (J.kg^{-1}.K^{-1})	c_c	*1674*	*1170*	*1900*
Densité (kg.m^{-3})		*1150*	*2200*	*1150*
Epaisseur (mm)		*0,5*	*0,5*	*0,39*
Surface (m²)	S_c	*0,16*	*0,16*	*P1:30,97*
				P2:29,83

Tableau I.5. Caractéristiques physiques des condenseurs sous test pour la modélisation du dépôt en eau sur un substrat.

La Figure I.29 présente deux simulations : (a) pour un condenseur plan de 30 m², (b) pour une plaque étalon PMMA de 0,16 m². La bonne corrélation des courbes simulées et expérimentales valide le modèle développé.

Les paramètres ajustables de la modélisation *k* et *g* (coefficients d'échange de chaleur et de masse), prenant en compte l'impact de la forme du condenseur et de l'environnement immédiat, ont été déterminés pour plusieurs sites et plusieurs systèmes (Nikolayev *et al.*, 2001 ; Muselli *et al.*, 2006b). La variation inter-sites observée est due à une définition non parfaite de la convection libre dans l'Eq. I.(14), phénomène prépondérant sur des sites continentaux (Grenoble, Bordeaux) contrairement aux sites insulaires présentant un régime de convection forcée dû à la présence quasi-permanente de brises thermiques.

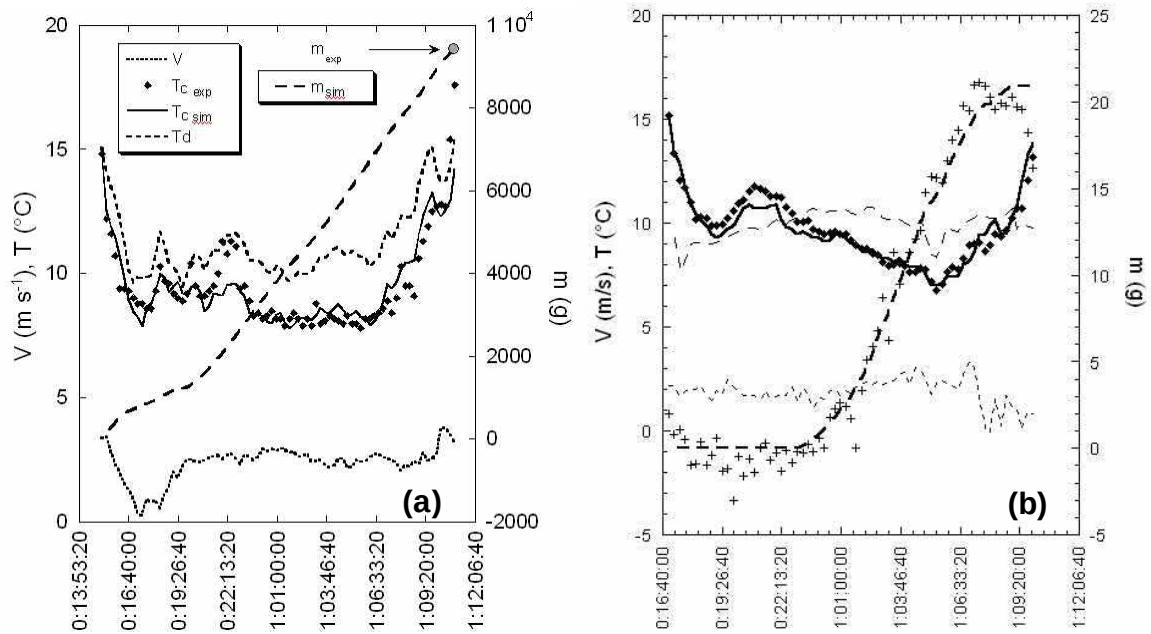


Figure I.29. Modélisation du phénomène de condensation sur un substrat. (a) : sur un condenseur plan de 30 m², (b) sur une plaque étalon de 0,16 m² (croix : m_{exp}, ligne tirets épais : m_{sim}).

Définition d'un matériau de condensation innovant (2004)

Le matériau de condensation utilisé jusqu'à présent été issu d'études préalables (Nilsson, 1994). Il était composé d'une base polyéthylène basse densité (LDPE), chargée en TiO_2 et $BaSO_4$ auquel un surfactant avait été ajouté permettant une bonne diffusion des charges dans le LDPE. Ce matériau ne possédait aucun additif anti-UV, ce qui a permis d'estimer assez rapidement sa durée de vie de l'ordre de 16 mois sous la latitude 41,5° du site d'Ajaccio (Muselli *et al.*, 2002a, 2006b). De plus, l'étude spectrale de ce matériau montra des faiblesses dans sa formulation. Ainsi, nos équipes de recherches eurent comme objectif dès le début de la thèse en co-encadrement, la mise en place d'un nouveau matériau dédié au refroidissement radiatif.

Pour formuler ce nouveau matériau, nous devions répondre, en préambule, aux questions suivantes :

Quelles sont les propriétés spécifiques que notre nouveau matériau devra posséder pour avoir un refroidissement radiatif important ? Quelles sont les applications possibles d'un tel matériau vis à vis des cycles diurnes et nocturnes ?

Les matériaux développés dans ce travail devront répondre à un cahier des charges très précis : ils devront être optimisés pour avoir des propriétés de refroidissement radiatif importantes (émissivité accrue dans le spectre IR) leur conférant à la fois, des capacités à condenser la vapeur d'eau atmosphérique en cycle nocturne mais également à limiter notablement l'échauffement de bâtiment en cycle diurne sous forme de climatisation passive. Le caractère hydrophile du substrat étant un atout pour la condensation de la vapeur d'eau, ces matériaux devront avoir un état de surface leur permettant d'optimiser la condensation en gouttes ou en film. Enfin, ces matériaux sont destinés, en grande partie mais pas exclusivement, aux pays en voie de développement, ils devront avoir des coûts de production et d'installation les moins chers possibles pour donner accès à la technologie à des populations dont la demande hydrique est forte mais dont la ressource financière est faible.

Dans ce paragraphe, nous développerons successivement la réponse d'un système soumis aux rayonnements visible et IR, pour application aux refroidissement radiatif. Puis, après avoir donné un état de l'art des technologies existantes d'un transfert radiatif pour le refroidissement,

nous exposerons le cahier des charges de notre matériau. Enfin, après avoir défini ses principales caractéristiques, nous décrirons sa mise en œuvre et les principaux résultats obtenus. La propriété intellectuelle sous le régime des brevets de ces travaux de recherches étant actuellement en cours d'expertise, nous incite à ne pas décrire, dans ce manuscrit, de manière précise les compositions massiques des composants.

8.1 Refroidissement radiatif

Le refroidissement radiatif est un transfert de chaleur, bilan d'énergie entre les radiations émises et reçues par un corps. La Figure I.30 présente les rayonnements que peut recevoir ce corps en fonction de la longueur d'onde : UV-Vis-PIR entre 0,2 et 3,3 µm et entre 3,3 et 100 µm pour le MIR et LIR (moyen et lointain IR). Ainsi, l'énergie radiative globale que peut recevoir au sol un corps représente 1290 W m^{-2} en atmosphère standard sous 288,1 K se décomposant en 2,5% UV, 41,4% Visible, 33,2% PIR et 22,9% de MIR et LIR. Ces deux dernières composantes, seules puissances reçues en cycle nocturne, représentent 295,6 W m^{-2}.

Les rayonnements MIR et LIR présentent, dans une bande spectrale autour de 10 µm, une fenêtre appelée « sky window » avec un déficit d'émissivité important. Un matériau possédant une grande émissivité pourra, par transfert radiatif, dissiper de grandes quantités d'énergie par rayonnement IR (de l'ordre de 93 W m^{-2} sous atmosphère standard et à 288,1 K) lui permettant de se refroidir passivement (refroidissement radiatif ou climatisation passive).

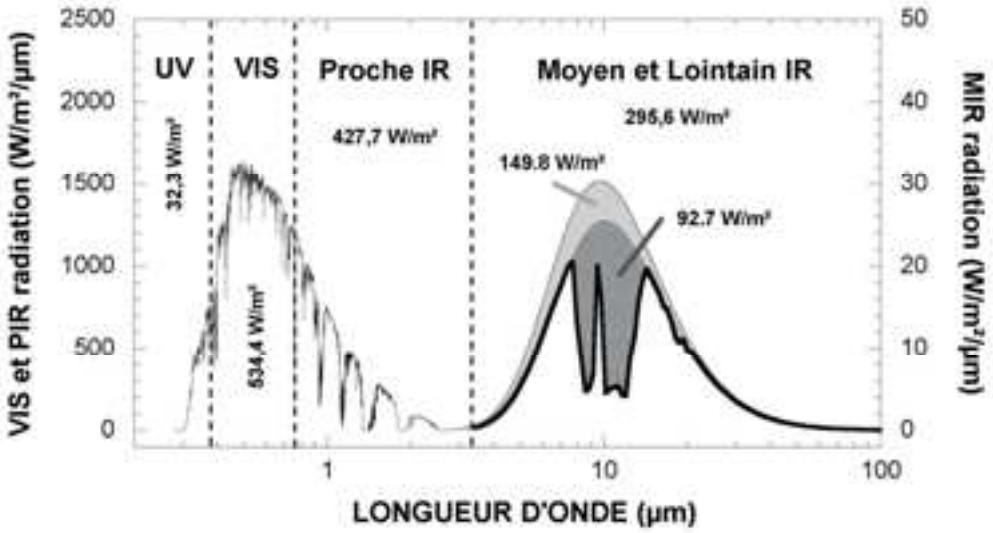


Figure I.30. Trait fin, rayonnement solaire (ASTM G173-03). Trait gras, spectre Infrarouge reçu à la surface du globe (spectre lissé, modèle MODTRAN pour des conditions 1976 US Standard Atmosphere, 288,1 K). Surface grise foncée, émittance d'un corps noir (288,1 K) sur la « sky window». Surface gris clair, émittance d'un corps noir (303,1 K). Les puissances reçues (intégration du spectre) pour chaque composante du spectre sont indiquées en W m^{-2}

En cycle nocturne, ce refroidissement radiatif peut être utile pour abaisser la température d'une surface entre 1 et 10 K, lui conférant alors des propriétés intéressantes pour la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique comme source alternative en eau pour des populations isolées (Muselli *et al.* 2002a, 2006b ; Beysens *et al.*, 2003a, 2005bcd). La puissance disponible pour le refroidissement est comprise entre 50 et 150 W m^{-2} selon la température du matériau (Figure I.30).

En cycle diurne, le refroidissement radiatif est utile pour limiter l'échauffement d'un matériau par réflexion de l'énergie solaire (rayonnement Visible + UV + PIR) et du rayonnement MIR. La Figure I.30 montre qu'un matériau, de réflexivité supérieure à 0,907 pour une émissivité de 1 sur le rayonnement MIR, peut se refroidir en cycle diurne. Ce refroidissement porte alors le nom de climatisation passive sans apport d'énergie et représente un avantage certain de la technologie développée dans ce travail pour des pays dont le climat impose des températures excessives tout au long de l'année (climats tropical, aride, semi-aride, désertique …).

Préalablement à ce travail de définition d'un nouveau matériau dédié au refroidissement radiatif (condensation de l'eau et climatisation passive), Clus (2007a) a décrit un état de l'art des technologies existantes en différenciant les matériaux sous films plastiques et les peintures. Les

conclusions de cette étude montrent qu'ils existent sur le marché en 2007, des matériaux intéressants (polycarbonate) pour la condensation de rosée possédant des traitements hydrophiles mais présentant des coûts de fabrication trop importants (≈ 20 € m^{-2}). D'autres matériaux tels que les films radiatifs développés par Nilsson (1994) et utilisés dans les premiers travaux de cette recherche ont montré rapidement leurs limites essentiellement une durée de vie courte liée à aucun traitement anti-UV pour la condensation de rosée mais également, l'incapacité de ce film à se refroidir en cycle diurne pour une éventuelle climatisation passive. D'autres films plastiques chargés, développés pour l'agriculture (Vergas *et al.*, 2000), ont montré de bonnes propriétés de refroidissement radiatif pour les deux cycles journaliers mais les impératifs de résistance mécanique imposaient des procédés de fabrication très onéreux (30-40 € m^{-2}). Peu de travaux ont été trouvés sur des peintures radiatives pour nos applications, et il était alors intéressant de travailler sur ce créneau car la peinture offre une diversification de la palette d'utilisation de la technologie.

8.2 Cahier des charges et définition des nouveaux matériaux

Le cahier des charges établi préconise une utilisation de la nouvelle technologie pour la climatisation passive d'habitations ou de bâtiments et la condensation de la vapeur d'eau. Pour cela, ces matériaux devront répondre aux critères suivants :

- ✓ une émissivité IR maximale (proche de celle d'un corps noir) sur l'ensemble des bandes spectrales du MIR (3 – 50 µm) ;
- ✓ une réflectance maximale du spectre solaire (UV-Vis-PIR) sur la bande 0,2-3,5 µm ;
- ✓ une propriété de surface hydrophile favorisant la nucléation de gouttes sous forme de film ;
- ✓ une propriété anti-UV pour une durée de vie accrue ;
- ✓ l'utilisation de l'eau produite en tant que source alternative en eau potable impose à ces matériaux de ne pas altérer la qualité de l'eau par leur composition chimique ;
- ✓ un prix de fabrication le plus faible possible pour une grande diffusion de la technologie. En fonction de l'utilisation future du matériau (condensation et/ou climatisation), des formulations différentes devront être adoptées ;

- ✓ une robustesse aux efforts mécaniques pour la viabilité du matériau face aux conditions climatiques ;
- ✓ deux formulations sous formes de films plastiques et de peinture devront être développées.

8.3 Mise en oeuvre et résultats

Le travail de formulation s'est effectué en collaboration entre l'Université de Corse, le CEA-ESEME ESPCI, le CNRS et le CEA-ICMCB qui a accueilli le doctorant pour une durée de 6 mois.

La démarche d'analyse d'optimisation des matériaux en fonction du cahier des charges préalablement décrit, est représentée sur la Figure I.31.

Les films radiatifs et les peintures sont obtenus par mélange soit de LDPE (Low Density PolyEthylene), soit de peintures commerciales glycérophtaliques avec des charges minérales adaptées dont la confidentialité sous le régime du brevet déposé en Juin 2007 ne permettent pas d'en préciser les noms et les quantités.

Ces mélanges sont soient pressés (films plastiques), soient peints sur des films LDPE incolores (Peintures). L'analyse des propriétés optiques et les taux de charges s'effectuent en fonction de la finalité du produit :

- soit *Blanc réfléchissant opaque* pour les 2 applications en cycle nocturne et diurne pour un surcoût de production dû à l'incorporation de TiO_2 (opacité) et une surépaisseur du matériau final ;
- soit un matériau *incolore* pour une application pendant le cycle nocturne à des coûts de fabrication moindre et un meilleur respect de l'aspect d'origine des supports recevant les matériaux (tuiles de terre cuite, bois …) ;

- soit une formulation *blanche diffuse*, cas intermédiaire des 2 précédentes, permettant une climatisation passive diurne et une condensation d'eau nocturne à un coût moindre.

Des tests mécaniques effectués en partenariat avec le Centre de Recherches sur les Matériaux à Haute Température (NRS-CRMHT) d'Orléans et des essais de comportement en extérieur à l'Université de Corse à Ajaccio valident les aspects théoriques de la formulation (Figure I.32).

Films plastiques

Peintures

Peintures glycéro.
+ Charges

Disperseur de
laboratoire
500 tr min^{-1}

Peintures sur
LDPE incolore
(56 µm)

1 à 2 couches

Etude des
propriétés optiques
Spectro Cary 5000
(UV-Vis-PIR)

Spectro Bruker Equinox 55
(IR)

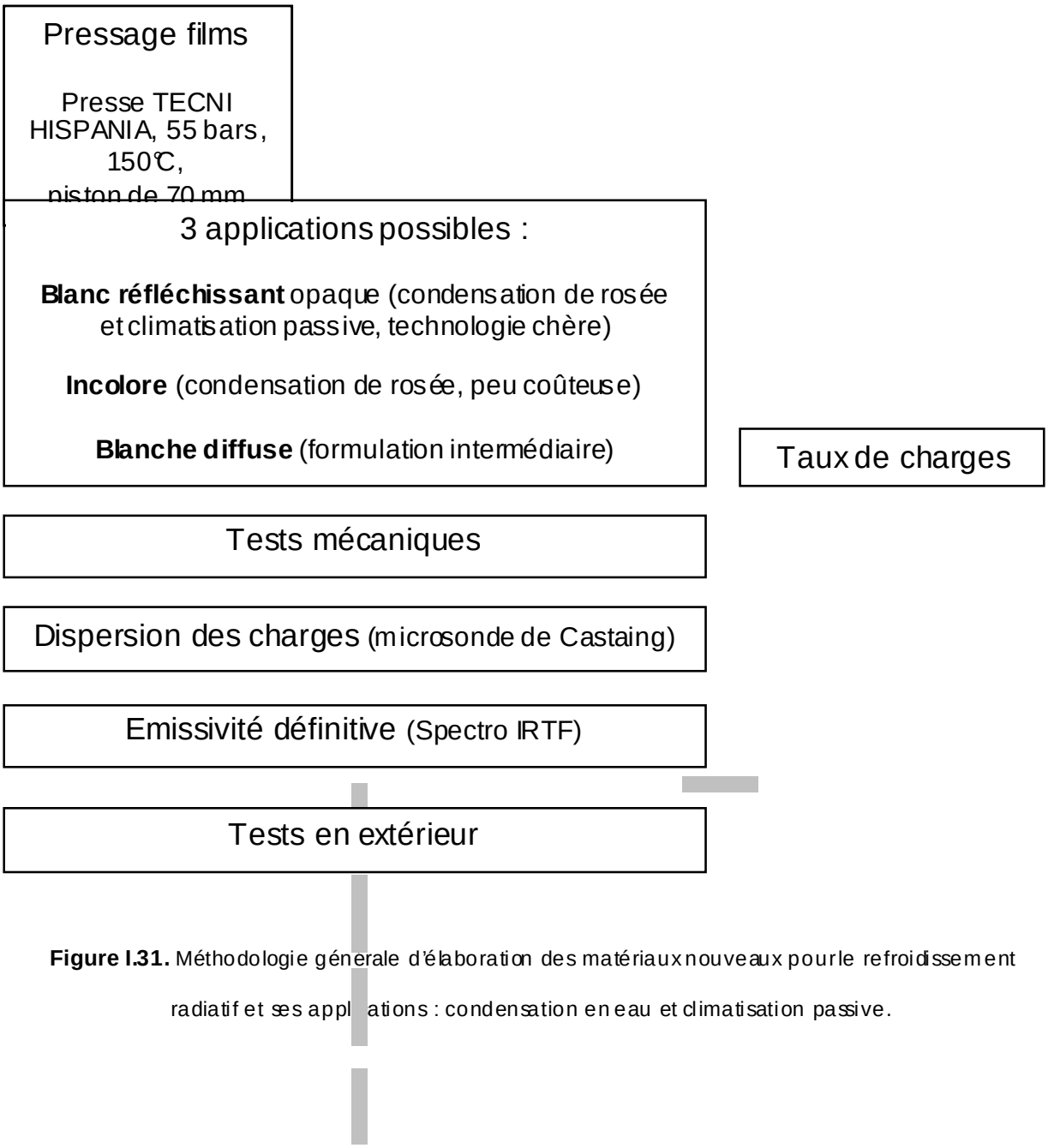


Figure I.31. Méthodologie générale d'élaboration des matériaux nouveaux pour le refroidissement radiatif et ses applications : condensation en eau et climatisation passive.

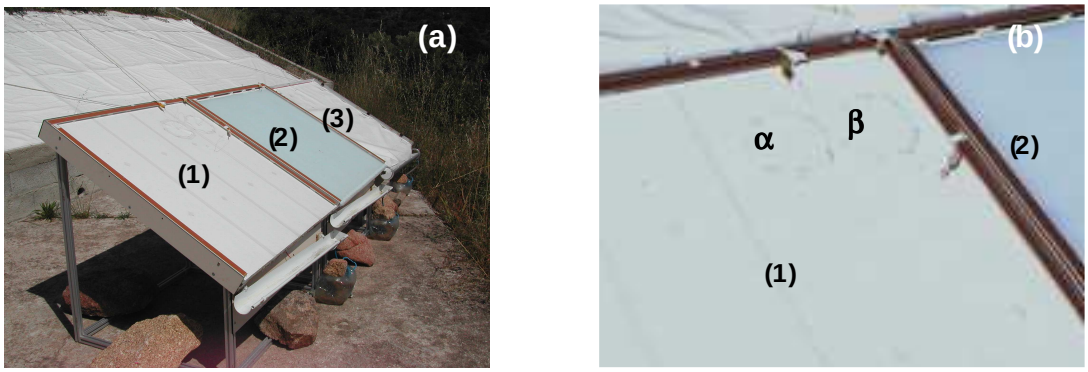


Figure I.32. Disposition de 3 condenseurs 1 m² pour test en extérieur des formulations développées au cours du travail. (a) : (1) : peinture blanche réfléchissante, (2) : matériau commercial avec traitement de surface hydrophile, (3) : film radiatif de référence type Nilsson (1994). (b) : α, β : batch de films plastiques (Ø 100 mm) de formulations différentes.

Les principaux résultats des formulations sont résumés dans le Tableau I.6. Concernant les propriétés des peintures développées pour la climatisation passive de bâtiments, celles-ci possèdent un pouvoir de refroidissement radiatif important. Ainsi, par émission, sous un rayonnement solaire de 1000 W m^{-2} et sous une température de 40°C (caractéristique des milieux tropicaux), une tôle galvanisée ou une plaque d'aluminium peut émettre respectivement 24 et 149 W m^{-2} pour se refroidir. A titre de comparaison, les peintures radiatives élaborées dans ce travail permettent une émission de 559 W m^{-2} leur procurant une capacité de climatisation passive très importante.

En résumé, nous disposons de matériaux optimisés pour la condensation de la vapeur d'eau et pour la climatisation passive, présentant de faibles coûts de fabrication (50% moins cher que le film de Nilsson,1994) et proposant une palette d'utilisation large : films plastiques sur toiture type plan incliné ou peintures blanches ou incolores pour toitures en fibrociment, tôle ondulée, bac acier ou tuiles de terre. Ces matériaux nouveaux répondent à la démarche HQE des bâtiments en apportant une technologie pour 4 « cibles » de la certification : *confort hygrothermique* (assurer le confort thermique d'été) ; *confort visuel* (relation visuelle satisfaisante avec l'extérieur) ; *Ecogestion* : gestion de l'eau (gestion de l'eau potable et

récupération des eaux de pluie) ; *Ecogestion* : gestion de l'énergie (renforcement de l'efficacité des équipement consommant de l'énergie). Ces résultats encourageants sont en cours de validation, par l'adaptation pour chaque type de toiture, d'un matériau adéquat (film ou peinture) depuis la construction en Mai 2007 à l'UDC d'Ajaccio, d'un prototype de 40 m² proposant les 5 supports de toiture les plus répandus dans les pays en voie de développement.

Matériau	FILM			PEINTURE [2] (2 couches)	
	Blanc Opaque	Blanc Diffusant	Incolore	Opaque Blanche [3]	Vernis Incolore
Epaisseur (µm) pour tests optiques	200	215	155	90	94
ε (4 – 20 µm) [1] Corps noir 288K	0,90	0,91	0,90	0,93	0,92
Réflectance solaire (0,280 – 2,0 µm)	0,84	0,78	/	≥ 0,80 [5]	≤ 0,63
Réflectance visible (0,38 – 0,78 µm)	0,90	0,86	/	≥ 0,90	≤ 0,62
Coût mat. Premières [4] (indice Réf. Nilsson) Nilsson 415 µm : 1,0 Inde 200 µm : 0,42	0,46	0,36	0,18	3,54 (matière première mais pas de fabrication)	
% 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.6. Récapitulatif des propriétés des matériaux développés au cours de notre travail.

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

[2] 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.

[3] D'autres teintes sont possibles en fonction de la nature de la base commerciale.

[4] 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.

[5] 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*., 2007)

Outils de simulation CFD pour l'analyse (a priori) de l'efficacité des radiateurs thermiques (2005)

Les résultats obtenus au cours du développement d'un modèle théorique (Section I.7) de compréhension du phénomène de condensation ont montré qu'il était bien adapté à des structures planes avec une composante convection forcée. Ce modèle ne prenait pas précisément en compte la convection libre et surtout la zone de convection mixte caractéristique des évènements de condensation nocturne de vapeur d'eau.

Notre objectif, dans ces différents travaux de conception d'une technologie pour la condensation de vapeur d'eau est la mise en place de structures complexes adaptées à cette fonction. Les modèles empiriques utilisés précédemment ne permettent plus de modéliser correctement les transferts thermiques de telles architectures. Jacobs *et al.* (2004) ont montré que l'utilisation de ces modèles empiriques classiques ne permettaient pas d'obtenir une simulation fiable de la production d'eau par condensation sur une forme complexe telle une pyramide inversée. C'est pourquoi, nous avons entrepris l'analyse des performances de nouvelles structures complexes dédiées à la production d'eau par condensation, par la conception de modèles numériques dynamiques. Les méthodes de CFD (Computional Fluid Dynamic), basées sur la résolution des équations de Navier-Stockes, sont particulièrement adaptées pour l'étude de l'écoulement des fluides sur des structures complexes.

A l'aide d'une subvention OSEO-ANVAR en 2004 (Muselli *et al.*, 2004b), le logiciel CFD PHOENICS a été acheté et programmé pour la définition d'un modèle numérique spécifique à l'étude des performances de condenseurs radiatifs complexes en vue de la production d'eau par condensation. Ces travaux ont donné lieu à diverses communications (Clus *et al.*, 2006a, 2006b ; Clus *et al.*, 2007d) et feront l'objet d'une publication en 2007.

La licence PHOENICS mise à notre disposition ne prenait pas en compte les changements de phase Vapeur/Liquide ; nous avons travaillé donc avec un système en atmosphère sèche. La modélisation du système s'est faite en deux étapes successives :

(1) : détermination de la puissance radiative perdue par un objet en fonction de sa température ;

(2) : simulation du système complexe accompagné de sa loi de dissipation de puissance. Cette approche numérique a été validée par une expérimentation construite au Laboratoire SPE de l'Université de Corse à Ajaccio.

9.1 Lois de dissipation d'énergie pour le refroidissement radiatif

Le bilan radiatif (Clus, 2007a) pour un élément de surface dS pour un angle solide $d\Omega$ (Eq. I.19) peut se représenter selon la Figure I.33 et il résulte de la balance énergétique entre la puissance radiative émise par dS dans $d\Omega$ (Eq.I.20) et l'émittance de l'environnement reçue du ciel par la même surface dS (Eq. I.22):

$$dE_{\alpha,\theta,\varphi} = \left(\frac{\varepsilon_{s,\theta}}{\varepsilon_s} dE_S - (\cos\alpha \cdot \cos\theta + \sin\alpha \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi) dE_C \right) \frac{\sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}{\pi} \qquad \text{I.(19)}$$

avec :

$$dE_{c,\theta,\varphi} = \frac{dE_C}{\pi} (\cos\alpha \cdot \cos\theta + \sin\alpha \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi) \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \qquad \text{I.(20)}$$

où : $dE_C = dS\ \varepsilon_c\ \sigma(273 + T_C)^4$ avec ε_c = 0,94 (Muselli *et al.*, 2002a) I.(21)

et :

$$dE_{s,\theta,\varphi} = \frac{\varepsilon_{s,\theta} dE_S}{\varepsilon_s \pi} \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \qquad \text{I.(22)}$$

où : $dE_S = dS\ \varepsilon_s\ \sigma(273 + T_a)^4$ avec ε_s donnée par Pedro et Gillespie (1982ab) I.(23)

Le ciel standard pris en référence tout au long des modèles numériques est considéré comme clair (N = 0) et la température au sol sera égale à la température ambiante de 15°C.

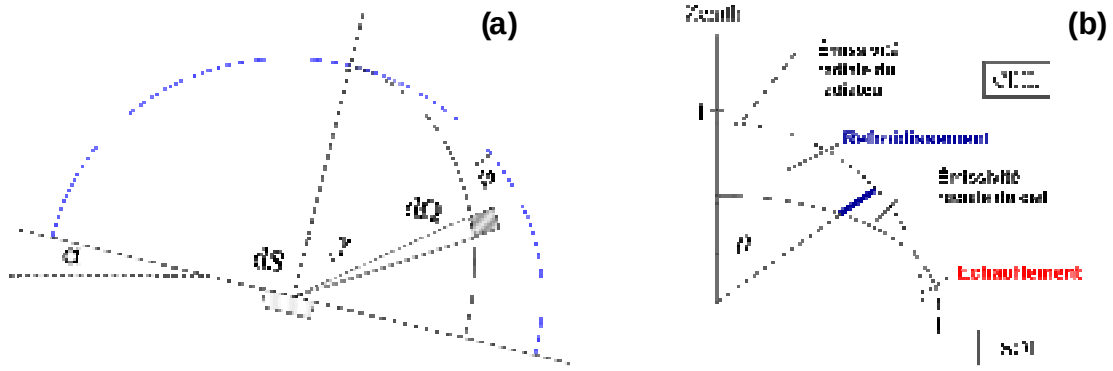


Figure I.33. (a) : Angle solide élémentaire $d\Omega$ vu par un élément de surface dS d'inclinaison α, dans le répère sphérique associé r, γ, φ. (b) : Emissivités angulaires du ciel et du matériau en fonction de l'angle au zénith θ.

La loi de dissipation d'énergie $P_{T,C}$ (W m^{-2}) ramenée à l'unité de surface, de température T_c, s'écrit par intégration de $dE_{\alpha,\theta,\varphi}$ pour 0 < θ <180° et 0 < φ < 360° :

$$P_{C,T} = \frac{1}{S}\sum\left(\int_{\theta,\varphi} dE_{\alpha,\theta,\varphi}\right) \qquad \text{I.(24)}$$

Cette méthodologie a été appliquée aussi bien à des structures planes (plan incliné du type des prototypes P1 et P2, Figure I.34ab) qu'à des structures complexes comme un cône ouvert (Figure I.34cd), qui a l'avantage de limiter les apports de chaleur par convection et de présenter une symétrie de révolution par rapport à un axe vertical rendant son comportement indépendant de la direction moyenne du vent nocturne.

(a) (b)

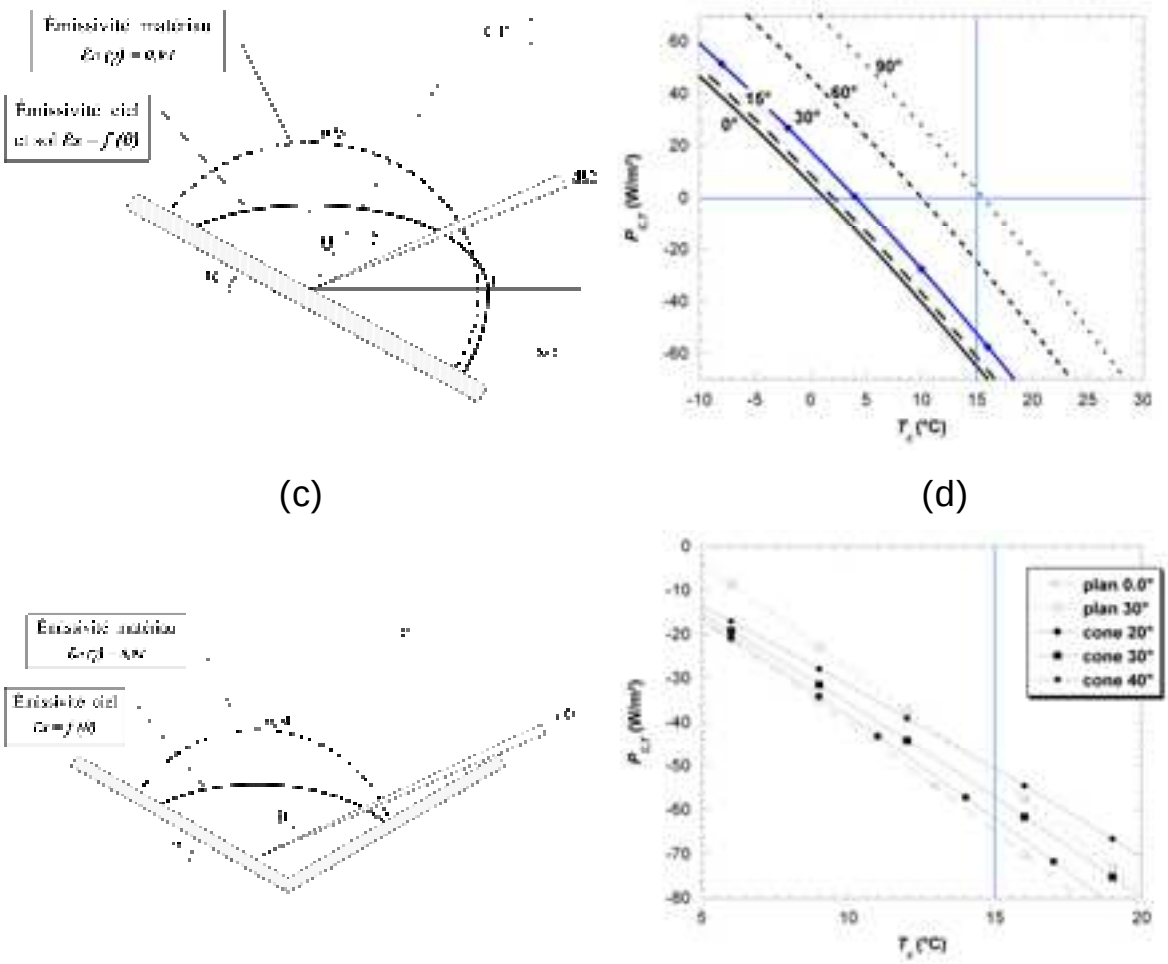


Figure I.34. Lois de dissipation d'énergie en fonction de l'architecture imposée. (a), (b) : plan d'inclinaison α ; (c), (d) : structure conique d'angle au sol α.

La loi de dissipation par élément de volume du radiateur sera déduite de l'équation précédente :

$$P_{V,T} = \frac{P_{C,T}}{e_v} \quad \text{où } e_v \text{ est l'épaisseur du radiateur virtuel} \qquad \text{I.(25)}$$

9.2 Modèle numérique programmé sous PHOENICS

La description du domaine numérique (volume, maillage) et les propriétés intrinsèques des objets virtuels ont été détaillées dans Clus (2007a). Nous ne précisons ici que les conditions aux limites liées au profil de vitesse de l'air en intrant du domaine de simulation numérique : température initiale de l'air et des objets égale à 288,1 K (15°C) avec RH = 85% (nécessaire pour le calcul de la température de rosée T_d = 285,6 K (12,5°C)). Enfin, le profil vertical de vitesse obéit à la loi logarithmique définie par l'Eq. I.(2).

A l'état d'équilibre, le processus itératif de résolution des équations de Navier-Stockes pour un fluide monophasique, a permis la comparaison des systèmes étudiés par la connaissance de la température moyenne de surface $<T_c>$ du radiateur qui donnera une indication sur les performances de l'objet à se refroidir en fonction de son architecture.

9.3 Expérimentation : condenseur conique 7,32 m²

Dans le but de concevoir un modèle numérique universel permettant de simuler aussi bien des structures « simples » comme des toitures planes ou des architectures novatrices, la programmation PHOENICS a permis de tester la méthodologie numérique sur une structure conique d'inclinaison variable et valider l'ensemble de l'étude, par la construction d'un système réel de type cône ouvert. L'objectif a été de comparer les résultats issus de la simulation et de l'expérimentation.

La simulation numérique a été appliquée à un cône tronqué déployant une surface de 7,32 m^2. Il présente les avantages de limiter sur les surface actives, les impacts d'une part, de l'environnement immédiat du condenseur et d'autre part, ceux liés à l'apport de chaleur par convection forcée (Figure I.35a). Enfin, sa symétrie de révolution le rend totalement indépendant de la direction moyenne du vent nocturne. Jacobs *et al.* (2004) ont étudié une pyramide inversée de surface active 1,11 m² aux Pays-Bas dont la surface de condensation est un film radiatif type Nilsson (1994). Ils ont montré par comparaison à une surface plane un gain de 15% sur les rendements en eau.

Par l'étude de la température de surface active moyenne sur le cône, il existe un compromis entre un angle d'ouverture trop grand, favorisant un apport de chaleur par convection et un angle trop faible, réduisant le refroidissement radiatif. La Figure I.35b montre qu'un demi-angle d'ouverture de 60° (α = 30°, idem que pour une surface plane inclinée) permet d'obtenir pour des

vitesses de vent comprises entre 0,25 et 2 m s^{-1}, une température moyenne de surface $<T_c>$ minimale.

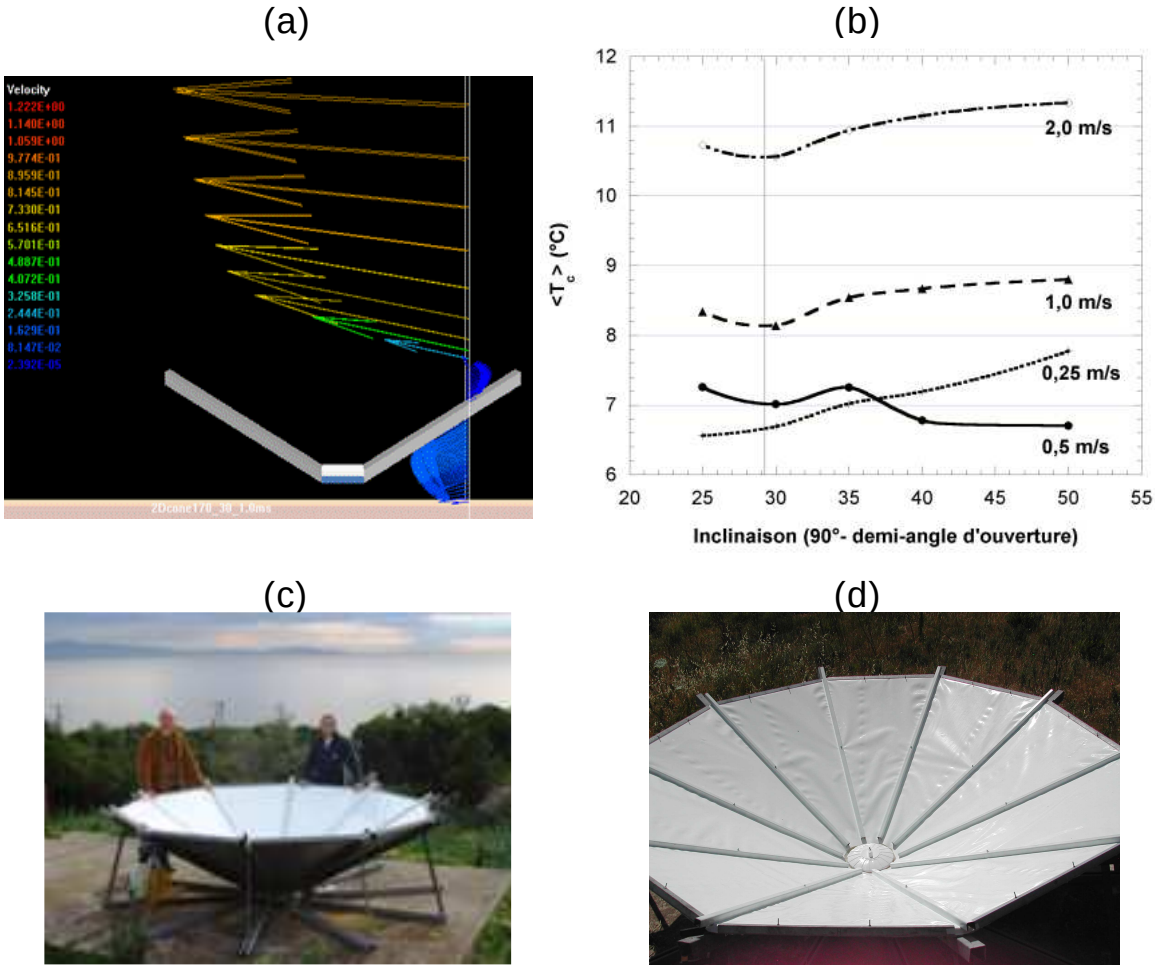


Figure I.35. (a) : Simulation numérique 2D d'une structure conique de 7,32 m² avec un demi-angle d'ouverture de 60°, (b) : Température de surface moyenne en fonction de V_{10}, (c) : Réalisation de la structure en Mai 2005, (d) : Architecture intérieure de la surface active (7,32 m²).

La réalisation de l'expérimentation sur le site de l'Université de Corse à Ajaccio (Figure I.35cd) a permis de valider les résultats du modèle numérique élaboré. Entre Mai 2005 et Octobre 2006, la structure conique obtenait + 36,3% de rendement (mm) par rapport à une surface plane. La quantité d'eau maximale obtenue était de 3,16 L pour 7,32 m² (0,432 mm).

Ainsi, ce prototype pourrait produire en conditions favorables jusqu'à 5 L d'eau par nuit ce qui correspond aux besoins vitaux d'un adulte sur 2 jours.

9.4 Validation de la méthodologie complète

La méthodologie complète a été testée sur 8 architectures complexes de condenseurs (sur une gamme de surface allant de 0,16 m² à 255 m²). Afin de valider le code numérique, 5 structures ont fait l'objet de réalisation pratique (Figure I.36) : 4 sur le site du laboratoire de l'Université de Corse (systèmes A,B,C,D) et 1 en Inde sur un collecteur de grande dimension (système E, description paragraphe I.10) et dont la conception est basée sur l'utilisation des modèles numériques développés au cours de nos travaux (Sharan, 2006 ; Clus *et al.*, 2007e).

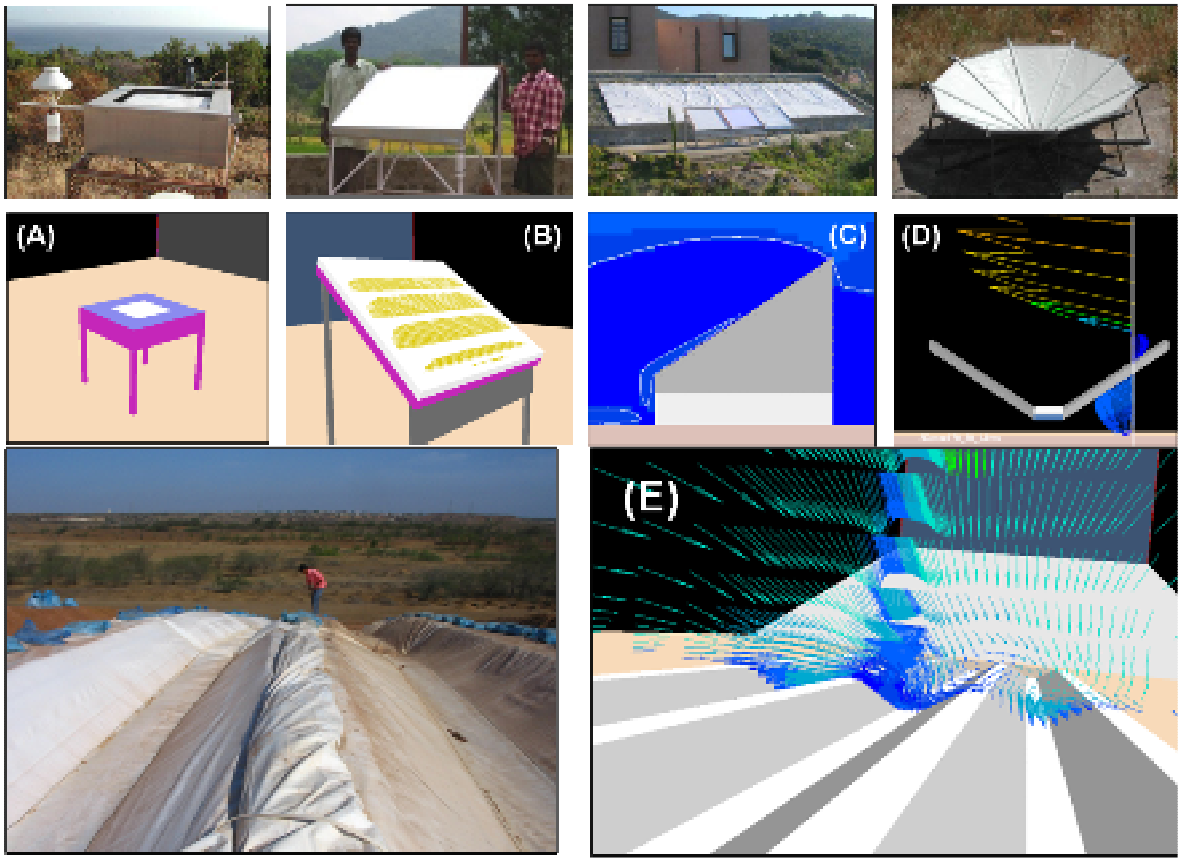


Figure I.36. Condenseurs radiatifs utilisés pour la validation des modèles numériques. Correspondance entre la réalisation numérique et l'expérimentation : (A) : Plaque étalon PMMA, 0,16 m² ; (B) : Condenseur de référence avec peinture radiative, 1 m² ; (C) : Condenseurs P2 plan, film radiatif, 29,83 m² ; (D) : Condenseur conique, film radiatif, 7,32 m² ; (E) : collecteur à rosée en Inde, film radiatif, 255 m².

Nous avons vu depuis le début de ce chapitre que l'orientation des condenseurs joue un rôle crucial sur le rendement en eau. Ainsi, sur la Figure I.36, (A) et (D) sont indépendants de la direction du vent nocturne, contrairement à (B), (C) et (E) où par principe (Beysens *et al.*, 2003a), la face cachée (non active) du condenseur est orientée vers le vent dominant nocturne. Deux paramètres, en autre, permettent de comparer les structures (Figure I.37) : la température moyenne de la surface de condensation et le rapport entre le rendement observé des condenseurs et un rendement de référence sur une plaque de 1 m² correspondant au protocole de mesure N°2 (Section I.3).

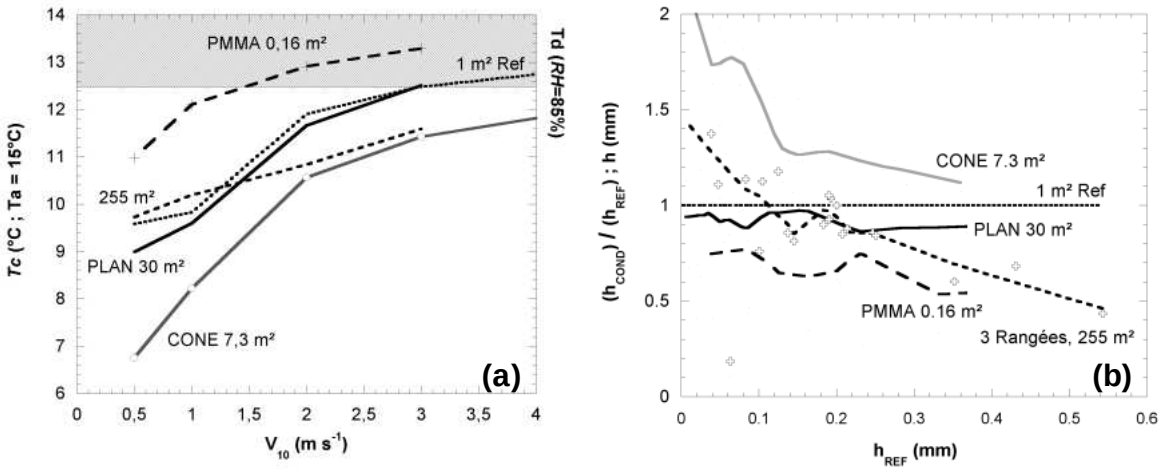


Figure I.37. Performances des condenseurs étudiés (a) : issues des simulations numériques par la détermination de la température de surface de condensation, (b) : issues des mesures expérimentales. Les croix sont les rendements exacts (non lissés) mesurés sur une tranchée de l'usine de rosée.

Il est acquis que dans des conditions identiques de fonctionnement, le condenseur possédant une température de surface la plus basse correspondra au système le plus efficace. Les résultats obtenus montrent une bonne adéquation entre les simulations numérique et les mesures expérimentales (Figure I.37). En effet, les condenseurs radiatifs développés au cours de ces 9 années de recherches montrent progressivement des performances croissantes vérifiées par les modèles de simulation numérique et les mesures in situ. La forte corrélation entre les rendements en eau mesurés à Panandhro (Inde, usine de 3 rangées soit 255 m²) et les

mesures faites par les collaborateurs indique la pertinence des modèles numériques définis. A l'aide de ces codes de calcul, il sera toujours possible de définir des facteurs de forme $f_F(V)$ tels que définis au paragraphe I.4.1 afin d'estimer avant même la construction d'une architecture nouvelle, son efficacité et ses performances par comparaison aux structures existantes.

Transition Prototype de laboratoire / Système réel (2005 – 2007)

Les travaux développés depuis le début des recherches ont permis d'étudier successivement : une estimation de la ressource de vapeur d'eau à condenser, la mise en place des premiers prototypes plan de grande envergure, la définition d'un nouveau matériau de condensation et enfin, des modèles numériques d'estimation des performances des futurs condenseurs à grande échelle qui seront construits. Il était tout naturel de passer à une autre étape du travail, qui a consisté à effectuer la transition entre nos pilotes de laboratoire et des systèmes réels susceptibles de fonctionner au quotidien pour l'approvisionnement en eau des populations concernées.

En partenariat étroit avec l'association OPUR, 2 systèmes à grande échelle ont été successivement construits avec succès. Il s'agit de 2 premières mondiales concernant l'utilisation du refroidissement radiatif pour la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique :

- le premier système est une toiture de démonstration de surface active 15,1 m², installée par nos soins, sur une petite île croate de la mer Adriatique dépourvue de tout système de réseau d'eau potable ;
- le second est une usine à rosée érigée dans l'état du Gujarat en Inde (Panandhro) qui actuellement développe une surface de 850 m². Cette dernière sera progressivement portée à 15 000 m² pour une production d'eau embouteillée à destination de la grande distribution.

Ce paragraphe va expliquer, non seulement, l'apport de nos technologies à la réalisation de ces projets, mais il a pour objectif principal de montrer l'intérêt de l'ensemble des travaux décrits dans ce mémoire sur l'aspect social de l'intégration d'une source d'eau alternative en des milieux présentant un déficit hydrique chronique.

10.1 Toiture de démonstration 15 m² (Biševo, Croatie)

i. Site et collaboration

Le choix du site de Biševo (5,84 km², 42°59' N, 16°01' E, altitude maximum 65 m) s'est tout d'abord appuyé sur les caractéristiques particulières de cette île de la mer Adriatique qui ne présente aucun réseau de distribution d'eau potable. Comptant une quinzaine d'habitants en saison creuse, et voyant sa population augmenter fortement en saison estivale, l'apport en eau des personnes est réalisé grâce à la collecte des eaux pluviales. Cette région du globe possède un passé tourné vers les économies d'eau car des études préalables (Bulletin OPUR, 2005) ont montré, aussi bien sur les îles que dans les grandes cités croates, la présence d'anciens grands collecteurs d'eau (impluviums) érigés voilà plusieurs dizaines d'années afin de retenir les apports pluviométriques.

Une collaboration entre l'Université de Corse-CNRS (M.Muselli), le CEA (D.Beysens), et l'Institut Météorologique et Hydrologique de Zagreb (M.Mileta) a été initiée (Beysens *et al.*, 2007a) pour la réalisation d'une toiture de démonstration (15 m² sur un cabanon au voisinage d'une habitation, Figure I.38a) permettant non seulement la collecte des eaux pluviales mais également, la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique.

Des études préalables menées sur 2 sites croates (Mileta *et al.*, 2004), Zadar (côte occidentale de la Croatie) et Komiza (site insulaire distant de 10 km de l'île de Biševo) ont montré un potentiel (mm) en eau condensée important par l'utilisation de condenseurs de référence 1 m² (Protocole de mesure N°2 décrit dans ce mémoire). L'intérêt était d'estimer la part que pouvait apporter la ressource « vapeur d'eau condensée » dans le bilan hydrique du site.

ii. Ressource actuelle en eau

Pour Komiza (voisine de Biševo à 10 km), la pluviométrie moyenne annuelle (2003-2005) est égale à 817 mm est très disparate à l'échelle mensuelle, puisque le coefficient de variation est de 65%. Ce climat présente une saison sèche entre avril et septembre avec des précipitations très

rares nécessitant une gestion importante de la ressource hydrique. Pour un couple résident sur l'île, en saison sèche, la ressource est estimée à environ 80 L jr^{-1}, pour les taches du quotidien (boisson, hygiène, arrosage des vignobles) mais la pression touristique importante sur les mois estivaux (environ 60 L jr^{-1} $pers^{-1}$), génère des restrictions notables sur cette ressource. Un système de navettes par bateau est mis en place chaque été pour l'approvisionnement de l'île en eau douce embouteillée.

iii. Sélection de la surface de condensation (matériau commercial)

Au delà de la simple évaluation de la ressource rosée rapportée à la pluviométrie locale, l'objectif de cette toiture de démonstration est de montrer la réalité de cette ressource hors protocole scientifique (qui resterait imperméable aux populations locales). De plus, le temps de retour des durées de vie des peintures radiatives développées dans ce travail n'était pas encore connu au moment de la conception du projet Biševo en 2005. C'est pourquoi il a été décidé d'avoir recours à un matériau de toiture disponible dans le commerce et choisi pour ses propriétés favorables à la condensation de la vapeur d'eau (émissivité IR, réflectance dans la bande spectrale UV-Vis-PIR et caractère hydrophile).

13 échantillons de matériaux commerciaux (LDPE, PE, PVC, PMMA, PTFE) ont été comparés sur leurs propriétés vis à vis du refroidissement radiatif à l'aide des techniques décrites dans le paragraphe I.8 par l'utilisation de 2 spectromètres. Deux matériaux ont montré des propriétés intéressantes pour nos applications et des expérimentations en extérieur sur le modèle identique développé sur la Figure I.32 ont permis d'estimer leurs productions d'eau en volume et le caractère hydrophile de leur surface. Les mesures des tests optiques et en extérieur (de septembre 2004 à mars 2005) sur condenseurs 1 m² calibrés des 2 matériaux sont rassemblées dans le Tableau I.7.

Matériau	Caractéristiques	Traitement Anti-buée	Structure	Emissivité IR	Réflectance solaire	rendement en eau (%)	Récupération gravitaire + 50 jours
PC	Epaisseur 0,8 mm	Face	Onde	0,949	0,84	100	55,2 %

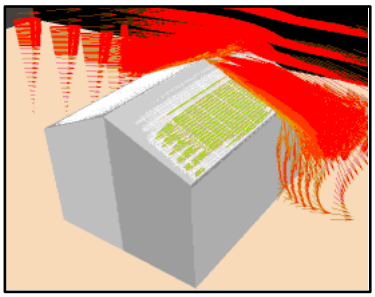
Suntuf	distribué par PALRAM	intérieure	Oméga				
PC Makrolon	Epaisseur 10 mm	Face intérieure	Plaque plane	0,943	(*)	107	95,3%

Tableau I.7. Caractéristiques optiques et efficacités des 2 matériaux sous test. (*) : la structure alvéolaire du Makrolon ne permet pas sous spectromètre d'avoir une valeur fiable de la réflectance.

Le polycarbonate Makrolon, utilisé avec sa face traitée vers l'extérieur, présente une production en volume d'eau de 7% supérieure à son concurrent PALRAM, avec une bonne tenue dans le temps du traitement de surface hydrophile (95,3% de l'eau est récupérée sans une intervention humaine ou mécanique). Malgré son coût désavantageux (près de 20 € m^{-2}), la toiture de démonstration (15,1 m²) sera équipée avec ce polycarbonate (PC) doublé en face arrière de plaque de polystyrène expansé (PS) de 30 mm d'épaisseur, l'ensemble sur une charpente en bois (Figure I.38a). La période d'étude s'étend entre le 14/04/05 et le 31/08/06. Le système d'acquisition des mesures via GSM a déjà été décrit au paragraphe I.4.6.

iv. Simulation numérique

La toiture de Biševo de 15,1 m² est une structure bi-pente de 24,5° d'inclinaison. Elle a été modélisée à l'aide des codes numériques développés au paragraphe I.9 afin d'estimer les performances de cette structure par rapport aux condenseurs connus de nos travaux précédents (Figure I.38b). Le facteur de forme ou gain en température ΔT_0 montre que la toiture doit avoir un comportement proche d'un condenseur 1 m² plan sauf pour des vitesses V_{10} de l'ordre de 1 m s^{-1} où le plan possède une efficacité supérieure sous l'influence d'un vortex de recirculation du même ordre de grandeur que la convection libre (Figure I.38c).



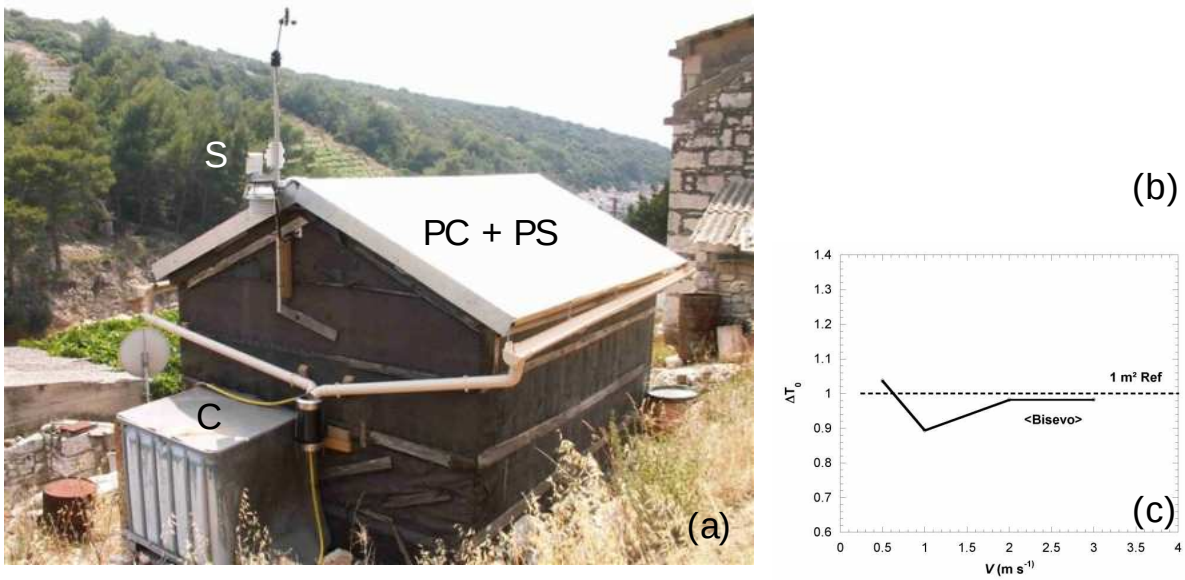


Figure I.38. (a) : toiture de démonstration 15,1 m² sur l'île de Biševo (Croatie). (S) : station météorologique d'acquisition décrite au § I.4.6 (Photo : D.Beysens) (C) : stockage de l'eau, (PC+PS) : PolyCarbonate Makrolon + PolyStyrène. (b) : simulation numérique de la toiture, zone verte : surfaces de condensation vérifiant $T_c < T_d$ pour T_a = 15°C et RH = 85%. (c) : Facteur de forme $f_F(V)$ (ou gain en température ΔT_0) pour la toiture issu des modèles numériques.

v. Résultats – Rendements mesurés

Le potentiel du site ne sera pas discuté ici car il a déjà été présenté préalablement dans l'étude de gisement de la ressource au paragraphe I.3.2. Nous nous intéressons plus particulièrement, sur la saison sèche, à l'apport de la ressource rosée dans le bilan hydrique pour les personnes utilisant l'habitation. Pour cela, nous avons tracé sur la Figure I.39a, les cumuls sur 2 saisons sèches (avril-septembre) des apports hydriques pluie et rosée (Clus *et al.*, 2007c).

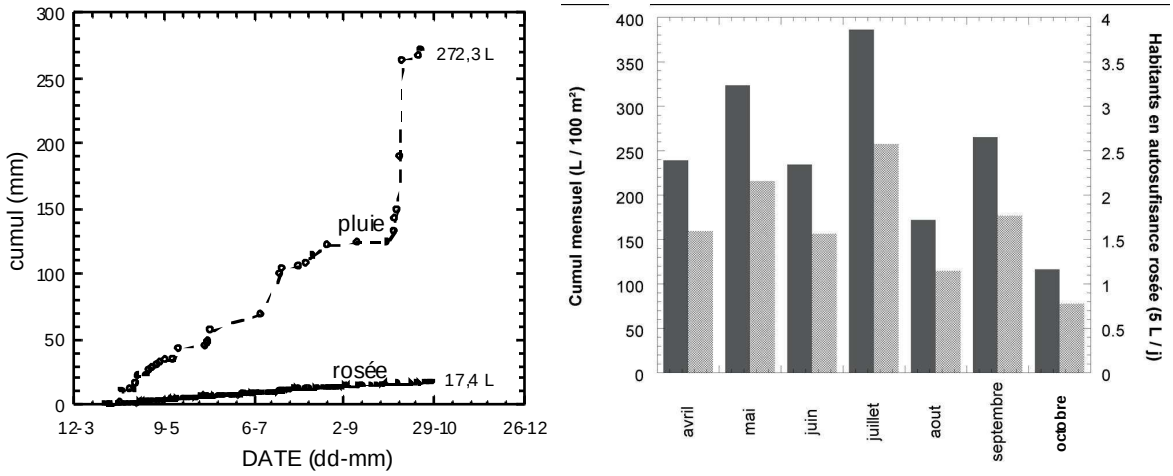


Figure I.39. (a) : Ressources en eau cumulées issues de la rosée et de la pluie (moyenne sur 2 saisons sèches). (b) : Production mensuelle pour une toiture du même type et de surface 100 m² (habitation réelle). Gris foncé : cumul mensuel (L) ; gris clair : nombre de personnes pouvant vivre grâce à la seule ressource rosée (5 L jr^{-1} $pers^{-1}$)

Sur la Figure I.39b, nous avons extrapolé les mesures obtenues sur la toiture de Biševo, à un système de 100 m², et déduit la relation de proportionnalité entre les cumuls mensuels issus de la condensation de la vapeur d'eau et le nombre d'habitants en auto-suffisance correspondant (en considérant les valeurs dictées par l'OMS, 5 L jr^{-1} $pers^{-1}$). Les résultats sont intéressants : en cas de sécheresse totale (aucun apport pluviométrique en saison sèche), cette toiture de 100 m² (typique d'une habitation) pourrait produire 100% des besoins en eau d'un couple d'adultes et pourrait permettre à une famille de 5 personnes de survivre sans ravitaillement extérieur (OMS : 2 L jr^{-1} $adulte^{-1}$ ou 1 L jr^{-1} $enfant^{-1}$).

vi. Conclusion et perspectives

La Croatie, et en particulier, les îles croates de la Mer Adriatique ont depuis des siècles, une culture de l'eau qui, comme nous l'avons déjà précisé, a obligé les habitants à développer des collecteurs de grandes dimensions tels des impluviums (Figure I.40a) ou des puits de grandes dimensions.

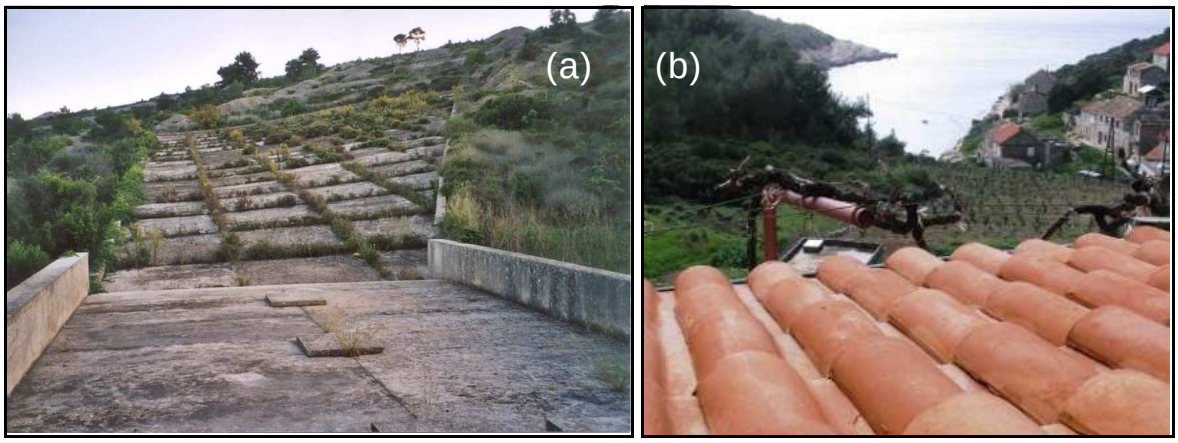


Figure I.40. (a) : Impluvium de Podšpilje (1300 m²) sur l'île de Vis (10 km de Biševo). (b) : Toiture en tuiles de terre cuite caractéristique des îles méditerranéennes.

L'équipement de telles architectures avec des matériaux adaptés, optimisés scientifiquement pour la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, pourrait apporter en certains lieux une source alternative en eau non négligeable. Enfin, le matériau de base des toitures de ces îles méditerranéennes est la tuile de terre cuite (Figure I.40b). A l'aide du prototype P3, construit en Mai 2007 à l'Université de Corse, nous apporterons dans les prochains mois une technologie innovante pour la transformation de ces toitures de tuiles en véritables condenseurs passifs par l'utilisation de peintures radiatives (bases incolores ou colorées naturelles) adaptées pour la collecte de la vapeur d'eau.

10.2 Collecteur à grande échelle 15000 m² (Panandhro, Inde)

i. Site et collaboration

A partir du mois de Mars 2006, la construction d'un condenseur passif de la vapeur d'eau atmosphérique de grande dimension (à terme 15 000 m²) a débuté à Panandhro (23°40'N,

68°46'E, altitude 42 m), dans l'état du Gujarat (région du Kutch) sous l'impulsion du Pr G. Sharan, membre de l'Indian Institute of Management of Ahmedabad (IIMA). L'OPUR, l'Université de Corse-CNRS et le CEA-ESEME ESPCI ont décidé de fédérer leurs connaissances avec l'IIMA pour développer une première mondiale : mettre au point un capteur passif de la vapeur d'eau à grande échelle en vue de l'embouteillage de l'eau condensée via une chaîne de production.

L'Inde possède depuis des siècles, une culture tournée vers les économies d'eau. Sharan (2006) présente les travaux menés depuis de nombreuses années sur l'utilisation de la rosée comme source alternative en eau. Notre contribution à l'étude repose sur la mise à disposition des modèles numériques de simulation de structures complexes et des retours d'expériences passées, pour la définition exacte de ce que sera la première usine à rosée.

Le système a été implanté sur la zone d'une ancienne mine de lignite de 1740 ha. Une colline a été excavée afin d'obtenir une pente, faisant face à la direction 300° (O-NO, déterminée à l'aide des modèles numériques développés précédemment), de 15° sur une largeur de 40m et une longueur de 300 m. Le régime des vents est identique à celui observé à Kothara situé à 80 km au NW de Panandhro avec un régime de brises nocturnes marines (secteur Sud-Ouest) et des bascules occasionnelles en brise de terre (Sharan *et al.*, 2007b).

ii. Ressource actuelle en eau

La zone se situe à la limite des climats de mousson et aride avec des précipitations annuelles moyennes comprises entre 100 et 400 mm (Sharan, 2006) très inégalement réparties au cours de l'année (coefficient de variation de 75%) : forte pluie durant la mousson de juillet à septembre et quasi absence d'évènements pluviométriques entre octobre et juin. Sur la période de conception de l'usine qui s'étend entre Février 2004 et Janvier 2005, 189,5 mm de pluie ont

été mesurés à Panandhro. De même sur la période, 08 oct. 2005 – 17 avr. 2006, aucun événement de pluie n'a été enregistré sur ce site.

iii. Simulation numérique

Compte tenu des surfaces de capteurs envisagées, le choix entre des condenseurs suspendus (type Prototype P1, 30,97 m², Ajaccio) ou leur équivalent au sol (Prototype P2, 29,83 m², Ajaccio) s'est avéré aisé compte tenu des coûts de mise en œuvre qui auraient été disproportionnés par l'utilisation de condenseurs aériens. Cette option a été choisie malgré les meilleurs résultats obtenus à l'Université de Corse sur les premiers condenseurs plans de grandes envergures (Muselli *et al.*, 2002a ; 2006b ; Beysens *et al.*, 2006c) qui avaient montré que P1 (aérien) produisait +14% de rendement en eau que son homologue P2 au sol.

Parr l'utilisation des retours d'expériences des équipes françaises (CEA, UDC), l'usine sera composée de tranchées trapézoïdales juxtaposées les unes aux autres (30° pour les plans inclinés) pour former un condenseur facile de mise en œuvre et offrant un bon compromis entre refroidissement radiatif et apport de chaleur par convection. L'objectif de l'utilisation des simulations numériques (paragraphe I.9) était alors de déterminer avant même la construction de l'usine, l'efficacité d'une telle architecture complexe et la direction exacte à donner à la structure pour augmenter sensiblement ses performances de production d'eau.

Cette usine a été modélisée en 3D (Figure I.41) en utilisant comme collecteur les dimensions suivantes : AD = 2,5 m ; AB = CD = 1 m ; BC = 0,5 m ; DE = 1 m ; longueur de la tranchée 34 m sur une pente de 15°.

(a)

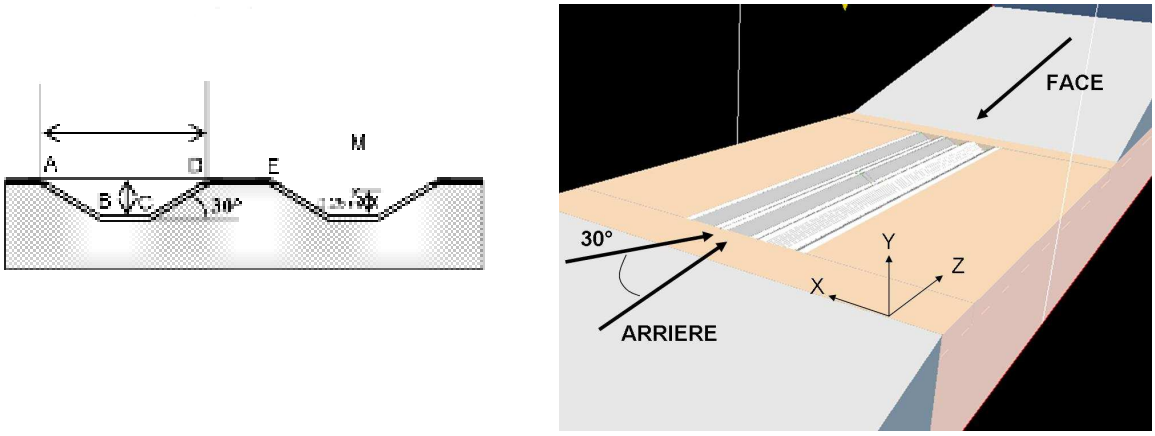


Figure I.41. (a) : Schéma de l'architecture complexe de l'usine de Panandhro. (b) : Interface virtuel du logiciel PHOENICS de 3 tranchées modélisées côte à côte dans le repère (X, Z, Y). Les flèches noires indiquent les directions du vent utilisées en entrée du domaine de simulation (Face, Arrière, 30° correspondant au vent nocturne dominant secteur SO).

L'objectif de la simulation numérique est l'attente de réponses quant à l'orientation à donner à la structure en fonction de la vitesse et la direction du vent. Les paramètres qui permettront les comparaisons entre différentes simulations sont la vélocité de l'air à 25 cm $<V_{0,25}>$ au dessus du fond d'une tranchée moyennée le long d'une tranchée (au point M, Figure I.41a) et le gain en température ΔT_0 construit à partir de la température de surface T_c moyennée sur l'ensemble du condenseur respectivement sur les Figures I.42a et b.

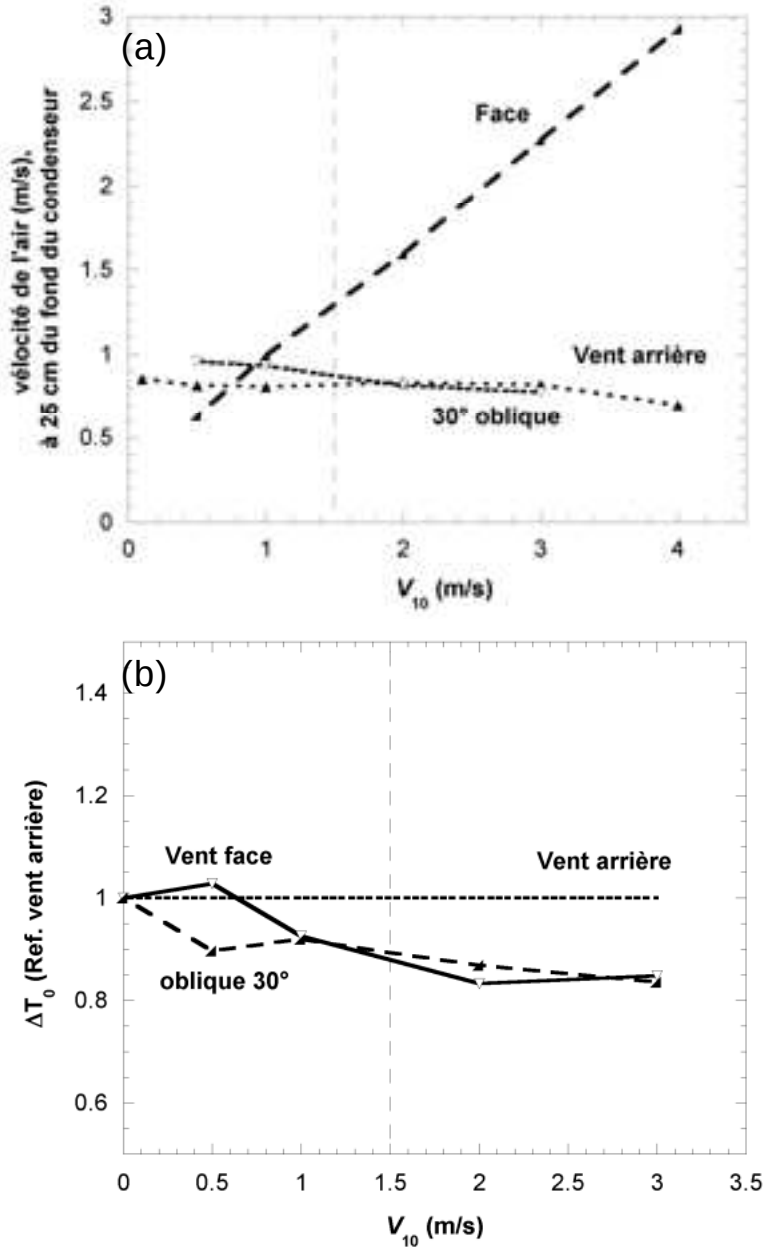


Figure I.42. (a) : Vitesse moyenne du flux d'air $<V_{0,25}>$ au centre du condenseur, en M (voir Figure I.41a) à 25 cm du fond du condenseur, en fonction du vent V_{10} (m s^{-1}). Les données sont une valeur absolue moyennée tout le long du condenseur. (b) : Gain en température (ou facteur de forme) des surfaces T_c en configurations vent de face et oblique à 30°, par rapport à la référence donnée par le vent arrière. Les droites verticales en pointillés correspondent à la valeur moyenne mesurée d'après les données météorologiques du vent durant les événements de rosée.

Sur la Figure I.42a, il est intéressant de noter que les configurations par vent arrière et 30° oblique montrent que la convention libre (obtenue pour $V_{10} \rightarrow 0$, si $V_{10} = 0{,}1$ m s^{-1} alors $<V_{0,25}> =$ 0,85 m s^{-1}) demeure prépondérante pour la gamme de vent envisagée. La configuration vent de face conduit naturellement à une augmentation de $<V_{0,25}>$ proportionnellement à V pour $V_{10} > 1$ m s^{-1}. Pour la vitesse et la direction de vent observées pendant les événements de rosée à Panandhro (1,5 m s^{-1}, 30° oblique), on s'aperçoit que les configurations vent arrière et oblique 30° sont beaucoup plus favorable que la configuration par vent de face.

Sur la Figure I.42b, trois domaines se dégagent de l'étude :

(1) Pour $V_{10} = 0$, les 3 configurations de direction de vent conduisent au même gain en température car seule la convection naturelle est présente sur le collecteur.

(2) Pour $V_{10} > 1{,}2$ m s^{-1}, la convection naturelle devient négligeable devant la vitesse du vent. La configuration par vent arrière présente un gain en température entre 15 et 20 % supérieurs aux 2 autres configurations.

(3) Pour $0 < V_{10} < 1{,}2$ m s^{-1}, les composantes de convections libre et forcée ont le même ordre de grandeur. Les configurations par vent oblique 30° et par vent arrière présentent une baisse de ΔT_0 due à une accélération du fluide car les deux composantes se renforcent dans la même direction. Contrairement aux précédentes, dans la configuration par vent de face, les composantes de convections forcée et libre sont en sens opposé, il en résulte un gain de température d'environ 5%.

En résumé, 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 m s^{-1} correspondant au vent moyen durant les événements de rosée. Ce résultat était déjà montré pour des surfaces planes (Beysens *et al.*, 2003a). Les mesures de rendements effectuées sur le site avec mise à disposition des données météorologiques à partir d'une centrale électrique thermique (située à 2 km du grand condenseur) 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 orientée 123 – 303°, avec le condenseur exposé sur la pente NE à 33°.

iv. Expérimentation

L'usine de rosée de Panandhro a été construite sur un terrain d'une ancienne mine. Cette parcelle offre des possibilités restreintes en fonction de la direction optimale issue de nos simulations numériques. En particulier, la configuration par vent arrière n'est pas envisageable compte tenu du dénivelé sur la parcelle et tout naturellement, le choix de la configuration par 30° oblique a été arrêté. Ainsi, les tranchées feront face à l'angle 300° environ pour un vent nocturne dominant ayant une direction SO soit 210° environ. La Figure I.43 représente l'installation progressive de plusieurs tranchées de longueur 34 m. Après avoir décaissé le sol en forme trapézoïdal, un isolant classique (plaque polystyrène 25,4 mm) est posé par assemblage (collage). La surface de condensation active est un film radiatif fabriqué en Inde selon les préconisations de Nilsson (1994) mais présentant une épaisseur moindre (0,2 mm) et enrichi d'anti-UV. Son émissivité IR est alors réduite mais son épaisseur lui permet d'être extrudé sur des laies de 50 m x 5 m. La surface active par tranchée est de 85 m². En Février 2007, l'usine déployait 10 tranchées (850 m²) pour une surface finale estimée à 15 000 m².

v. Résultats partiels – Rendements mesurés

Les résultats partiels (Clus *et al.*, 2007e) donnés dans ce document (entre le 23/3 et le 20/4/2006) sont les mesures effectuées lors de la présence de notre doctorant sur place lors de l'installation de la première tranchée (85 m²). D'autres résultats sont en attente de l'équipe partenaire en Inde. Au cours de ces 29 jours de mesures, 21 ont donné lieu à de la production d'eau par refroidissement radiatif pour un volume cumulé de 260 L soit 12,4 L par événement.

Par comparaison aux condenseurs « étalon » (4 condenseurs de 1 m² orientés selon les 4 directions cardinales), le rendement cumulé par unité de surface de capteur de la tranchée représente 77,6% du rendement moyen cumulé par les 4 condenseurs (Figure I.44). Ces résultats

partiels sont à confirmer sur une plus longue période afin de voir comment l'apport hydrique de la rosée intervient dans le bilan en eau de la population locale.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figure I.43. Construction du condenseur à grande échelle de Panandhro (état du Gujarat, Inde). (a) : Nivellement et décaissement du sol, (b) : Pose et collage de l'isolant thermique, (c) : installation du film radiatif, (d) : formation de rosée sur la surface active, (e) : usine d'eau condensée en février 2007 850 m², (f) : système de collecte des eaux par tranchée pour stockage (Photos : O.Clus, S.Singh)

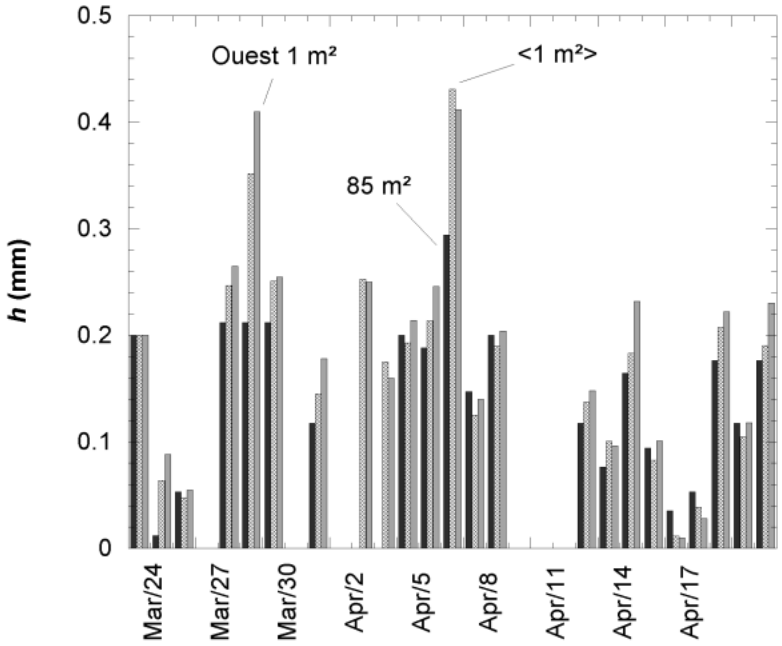


Figure I.44. Rendements de rosée quotidiens mesurés sur le condenseur de 85 m² (barres noires) et comparés aux rendements moyennés pour les 4 condenseurs de 1 m² (barres striées). Le condenseur 1 m² Ouest est présenté correspondant à la direction de l'usine.

vi. Conclusion et perspectives

L'usine de Panandhro est le premier projet, à l'échelle internationale, de production d'eau douce par refroidissement radiatif d'un substrat de condensation optimisé. Nos expertises sur les modèles numériques et nos retours d'expérience sur les premiers prototypes « plan » ont permis de déterminer le meilleur emplacement de cette usine favorisant ainsi le refroidissement radiatif et limitant les effets néfastes convectifs. A terme, l'usine développera une surface de condensation de 15 000 m² pour une production journalière estimée qui pourra atteindre jusqu'à 5 m^3 d'eau douce. Sachant que le coût d'une rangée installée en Inde est d'environ 200 €, il semble raisonnable de produire le litre d'eau condensée embouteillée à environ 0,12 € L^{-1}, soit 40% moins cher que le prix actuel d'un litre d'eau produit par osmose inverse sur site. L'impact social

d'un tel projet sur la population de la région du Kutch a dépassé toutes nos espérances puisque en plus de l'apport en eau pour la boisson, ces populations peuvent à nouveau repenser leur mode de vie en reprenant des activités agricoles, fermières etc… La production décentralisée de ces condenseurs permettra de fixer des populations à des endroits du globe dépourvus de manière chronique de cette ressource indispensable à la vie. A ce titre, et suite aux premiers résultats de Panandhro, un second projet est en cours de construction au village de Satapar toujours dans la région du Kutch.

Conclusion

Au cours de ces 8 années de recherches, le laboratoire SPE CNRS de l'Université de Corse en partenariat étroit avec le CEA ESEME ESPCI et l'OPUR ont mis au point des techniques permettant l'utilisation d'une source renouvelable inexploitée, la vapeur d'eau atmosphérique, pour produire de l'eau douce potable à des populations isolées. Ces travaux ont suivi une démarche logique par l'étude progressive de :

- la ressource en eau condensable en divers lieux du globe ;
- la mise au point numérique puis expérimentale des premiers prototypes «plan» de grandes envergures (30 m²) ;
- la définition de nouveaux matériaux de condensation qui font l'objet actuellement d'un dépôt de brevet et qui correspondent à des cibles de la certification HQE (confort hygrothermique, confort visuel, écogestion, santé pour la potabilité de l'eau) ;
- la définition de modèles numériques permettant l'étude des performances de condenseurs radiatifs à grande échelle avant même leur construction ainsi que l'optimisation de leur structure vis à vis des conditions météorologiques du site ;
- la transition de ces prototypes de laboratoire vers des condenseurs réels permettant la production décentralisée d'eau douce pour des populations en stress hydrique.

Ce travail a nécessité la mise en place, en autre sur le site de l'Université de Corse à Ajaccio, d'une véritable plate-forme de recherches et développement décrite sur la Figure I.45.

Pas moins de 7 expérimentations ont été érigées pour, progressivement aboutir à des systèmes efficaces, viables, économiques et indispensables pour la survie de personnes.

Les perspectives sont nombreuses et permettront dans le futur de développer :

- une meilleure connaissance de la ressource par la définition d'une cartographie de cette vapeur d'eau condensable à l'échelle d'une région, d'un pays ou du globe ;
- l'utilisation accrue de la technologie de refroidissement radiatif pour la climatisation passive de bâtiments couplée à de la production d'eau ; le prototype P3 (Figure I.46) construit en Mai 2007 à Ajaccio répondra en partie à ses objectifs avec l'adaptation d'une peinture radiative à des toitures classiques de pays PVD (tôle ondulée, bac acier, fibrociment, tuiles de terre cuite, modules photovoltaïques).

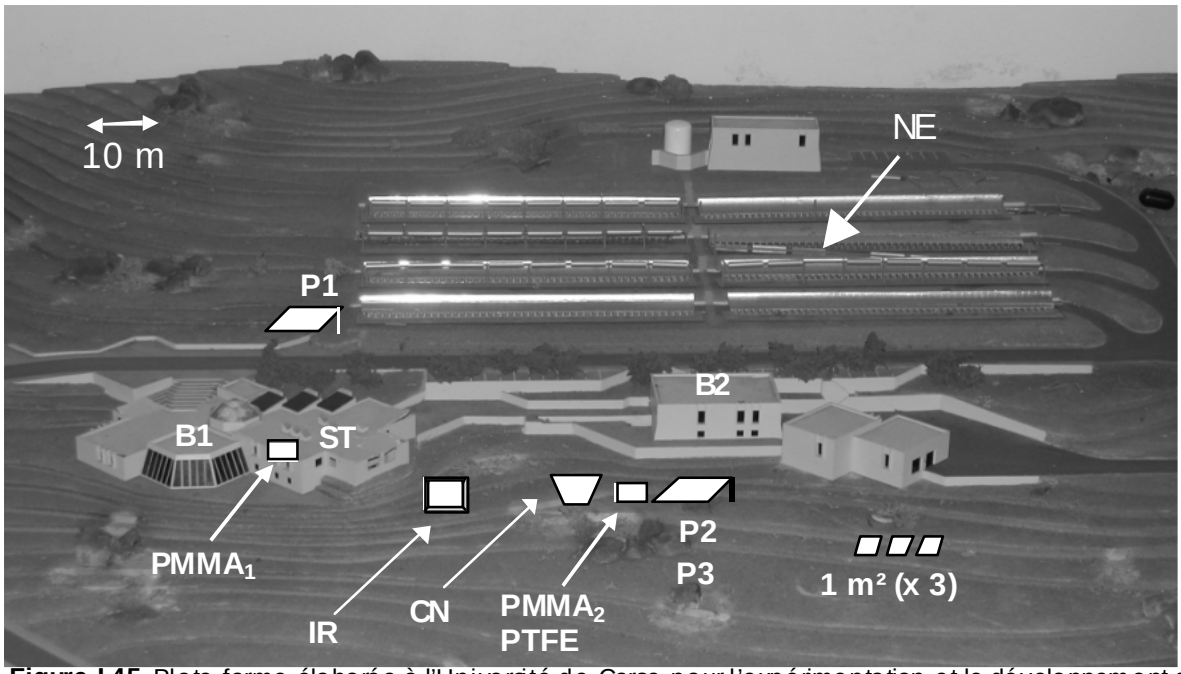


Figure I.45. Plate-forme élaborée à l'Université de Corse pour l'expérimentation et le développement des condenseurs radiatifs. (B1, B2 : bâtiments administratifs et techniques, 7 m de haut)

ST : station météorologique du laboratoire de l'Université de Corse

PMMA$_1$, PMM$_2$, PTFE : Protocole de mesure N°1 : balance électronique, 0,16 m²

1 m² (x 3) : Protocole de mesure N°2 : 3 mini-condenseurs, 1 m²

IR : Radiomètre VIS-IR Kipp & Zonen, mesure des puissances radiatives, 1 m²

P1, P2 : prototypes « plan » aérien (P1) et au sol (P2), 30 m²

P3 : dernier prototype utilisant les nouveaux matériaux développés dans ce travail (mai 2007)

CN : condenseur radiatif conique développé dans ce travail, 7,32 m²

NE : direction dominante du vent lors des évènements de condensation

- le couplage de ces technologies passives décentralisées de production d'eau à des capteurs photovoltaïques pour la fourniture simultanée d'un vecteur énergétique (électricité) mais également de l'eau douce pour le développement et la fixation de populations dans des régions très arides.

Figure I.46. Prototype 3 (40 m²) construit en mai 2007 à l'Université de Corse (Ajaccio) pour une étude simultanée de l'efficacité des peintures pour la condensation de l'eau mais également pour la climatisation passive de bâtiments. (a) : construction de la charpente, (b) : dépose de l'isolant (laine de roche 70 mm), (c) : 5 natures de toitures typiques des PVD, teintes blanches pour les pays chauds en mode climatisation passive et condensation l'eau, teinte incolore pour respect de la nature du substrat et en mode condensation de vapeur d'eau.

1 : bac acier (peinture radiative blanche) ; 2 : fibrociment (double teinte)

3 : tuiles de terre cuite (double teinte) ; 4 : cellules photovoltaïques brutes
5 : tôle ondulée (peinture radiative incolore)

SECONDE PARTIE

II – LES SYSTEMES ENERGETIQUES A SOURCES RENOUVELABLES D'ENERGIE

Introduction

Au même titre que les ressources en eau pour le développement de la vie ou pour limiter les déplacements de population, l'apport d'un vecteur énergétique tel que l'électricité permet à des populations isolées de se fixer sur des sites décentralisés, proches de leurs habitudes de vie courante. Les Energies Renouvelables s'imposent aujourd'hui comme autant de réalités économiques, énergétiques, qu'industrielles. En effet, après les chocs pétroliers des années 70, les stratégies des pays industrialisés ont été nombreuses. Une diversification des échanges énergétiques, un changement de structure du PIB, une augmentation et une substitution des offres nationales représentent autant de mesures essentielles prises à divers degrés d'importance par les différents pays pour réduire le taux de dépendance pétrolière. Cette dernière mesure compte les énergies renouvelables comme vecteur de substitution.

Cette dernière décennie, on a assisté dans cette filière à une montée en puissance d'industries de plus en plus structurées et à l'émergence de technologies matures. L'Union Européenne se trouve ainsi à la pointe du progrès technique en ce qui concerne les énergies renouvelables. Aussi, le cadre politique de développement des SRE[1] commence à être solidement structuré. Les taux de croissances affichés, des années 2002 à 2003[2], en sont le meilleur témoignage : 22,12% pour l'éolien, 26,1% pour les biocarburants, 46% pour le photovoltaïque, 22% pour le solaire thermique et 7,2% pour la géothermie.

La réussite industrielle a incité des pays industrialisés à développer leur propre gisement. Le Royaume-Uni, la France et l'Italie font actuellement de gros efforts pour rattraper leur retard vis-à-vis de l'Allemagne en mettant en place des mécanismes de soutien plus incitateurs. Ces mécanismes peuvent porter sur l'offre en électricité verte comme le soutien de la production par tarifs d'achats (c'est le cas en Allemagne, en France et en Espagne). Ils peuvent également concerner la demande en électricité via un système de certificats verts (comme au Royaume-Uni, en Italie et en Suède). La mise en place, en parallèle, de quotas de consommation constitue une mesure de soutien à la demande en électricité verte qui garantit le développement des filières renouvelables. Cette dynamique est liée à la directive européenne sur la consommation d'électricité renouvelable (21 % à fin 2010) et à l'augmentation continue des coûts des combustibles fossiles.

D'autres pays comme l'Inde et la Chine se positionnent déjà comme des acteurs majeurs dans le domaine de l'éolien et du photovoltaïque. L'Indien Suzlon est, par exemple, devenu en 2005 le 5ème plus grand fournisseur d'éoliennes (il était 11ème en 2003 et 6ème en 2004), devançant de grands noms de l'industrie européenne comme Siemens, Repower, Nordex et Ècotecnia. Le Chinois Suntech est, quant à lui, devenu en 2005 le 8ème fabricant de cellules photovoltaïques, se plaçant désormais devant des fabricants comme Shell Solar, Isofoton, Deutsche Solar ou

---

[1] Sources Renouvelables d'Energie
[2] Réf. EUROBSERV'ER

Photowatt. L'appropriation chinoise et indienne s'explique moins par la volonté de ces pays de prendre des parts sur les marchés occidentaux en pleine expansion, que par la nécessité de répondre à leurs propres besoins en nouvelles capacités de production d'énergie. Il s'agit également pour eux de se positionner sur les marchés d'autres pays en développement. Il est impératif qu'ils continuent dans ce sens car un développement de ces deux grands pays (1,3 milliard d'habitants en Chine et 1,1 milliard en Inde) fondé uniquement sur le recours aux énergies fossiles serait catastrophique pour l'environnement.

Les pays en développement qui ne disposent pas de ressources en hydrocarbures ont subi de plein fouet l'augmentation des prix des combustibles fossiles. Cette situation les incite à se tourner vers des solutions renouvelables, que ce soit sur un plan centralisé, avec le développement de la grande hydroélectricité, ou sur un plan décentralisé, avec le développement de systèmes autonomes. Il est en effet économiquement plus rentable de développer des infrastructures électriques centralisées vers les lieux de forte consommation et de multiplier la mise en place de générateurs autonomes dans les villages éloignés du réseau, là où les besoins sont plus limités. La Figure II.1 montre la forte disparité du taux d'électrification dans le monde avec des régions très fortement déficitaires comme l'Afrique sub-Saharienne ou l'Asie Centrale (hors Inde). D'autres pays possèdent encore de nos jours, 10, 20, 30% voire plus de leur population n'ayant pas accès à l'électricité (Amérique latine, Afrique du Nord, Afrique Australe, Chine etc…).

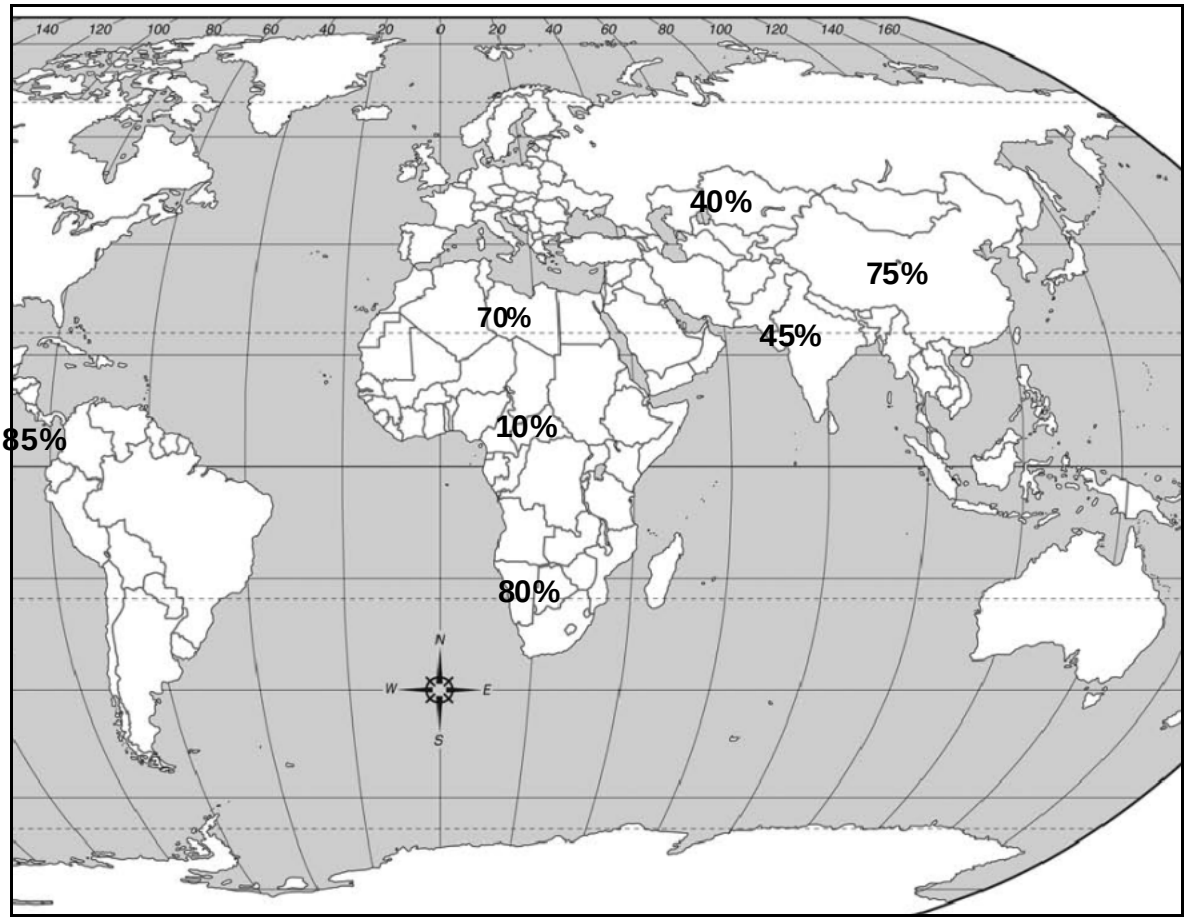


Figure II.1. Taux d'électrification de certains pays ou régions du globe (source : Extrapolation 2000 depuis rapport CNRS ECOTECH de 1990)

Ainsi, la diversification progressive de la production d'électricité en faveur des énergies renouvelables répond à une logique économique incontestable en intégrant le renchérissement continu des combustibles fossiles et les conséquences économiques du réchauffement climatique. Les énergies renouvelables ont d'ores et déjà prouvé qu'elles pouvaient se substituer à une partie de ces combustibles. Il est crucial de faire usage de ce contexte favorable pour créer un effet levier qui leur permettra d'aller plus loin.

Le laboratoire de l'Université de Corse, UMR CNRS 6134, travaille depuis plus de 25 ans, sur la problématique de la fourniture d'électricité et/ou de chaleur à partir de plusieurs sources renouvelables telles que le solaire ou l'éolien. La Corse s'inscrit dans cette dynamique puisque la région est labellisée « pôle de compétitivité » avec la région PACA (CAPENERGIE) depuis 2005 ; l'objectif étant le mariage réussi entre Industriels, Centres de Recherches et de Développement et Formation sur un même territoire. Dans ce cadre, l'Université porte un projet de plate-forme technologique Hydrogène, Solaire, Eolien et Biomasse inscrit dans le prochain CPER.

Depuis mon intégration en 1993, au sein de l'équipe « Energies Renouvelables » de l'Université de Corse - CNRS, j'ai eu l'occasion, au cours de mes travaux de doctorat puis en tant

que Maître de Conférences à l'UDC, de développer différentes approches sur l'utilisation des systèmes énergétiques travaillant avec une voire plusieurs sources renouvelables d'énergie (Figure II.2).

Cette partie du mémoire aura pour objectif de montrer la démarche scientifique permettant une utilisation rationnelle de l'énergie dans un système énergétique complexe utilisant des sources renouvelables aléatoires.

Ainsi, dans la Section II.2 de ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'étude physique de **l'estimation de la ressource renouvelable (solaire et éolienne)**. Pour cela, nous avons utilisé différentes méthodes basées sur des modèles physiques, statistiques dans le but de mettre en place des générateurs de profils horaires de cette ressource indispensables au dimensionnement optimal des systèmes énergétiques compte tenu des coûts encore élevés de ces techniques (Figure II.2).

Dans le but d'effectuer les transferts technologiques pour une utilisation courante, ces systèmes énergétiques pourront avoir deux applications principales :

- **l'électrification décentralisée de sites isolés** afin de limiter les déplacements de populations et d'envisager de nouvelles activités économiques pour ces populations sur leurs lieux d'habitations. Cela nécessite l'étude du couplage entre un générateur d'électricité (cellules photovoltaïques CC, éoliennes de petites dimensions CC ou CA) avec un système de stockage d'énergie (électrochimique de type batterie, vecteur d'énergie hydrogène par électrolyse de l'eau : projet PEPITE) et une voire plusieurs sources auxiliaires (groupes électrogènes, pile à combustibles) pour l'alimentation d'une charge représentant les besoins de l'utilisateur (Section II.3).

  Nous distinguerons ainsi, les **systèmes mono-sources** composés d'une source renouvelable et d'un système de stockage, des **systèmes hybrides** composés d'une voire plusieurs sources renouvelables avec stockage et source(s) auxiliaire(s). Ce travail a nécessité non seulement la construction de codes numériques d'optimisation de ces systèmes mais également l'adaptation de charges moins énergivores dites de « basse consommation » pour une meilleure maîtrise de la demande d'électricité (MDE).

- **la production d'électricité à moyenne ou grande échelle** par la connexion de systèmes à SRE sur un réseau de distribution (Section II.4). Pour ces systèmes, différentes applications ont été envisagées :
  - couplage directe d'un champ PV de puissance P_{PV} via un onduleur de puissance nominale $P_{nom\text{-}ond}$ sur un réseau de transport d'électricité. Une expérimentation a été mise en place depuis l'an 2000 pour optimiser le couple $P_{PV}/P_{nom\text{-}ond}$ à partir d'un champ PV de 850 Wc (BP solar Modules 585F) et un onduleur de 700 W (SMA Sunny Boy 700) ;

- l'étude du relevage par des systèmes photovoltaïques (PV) avec ou sans stockage des chutes de tension en bout de ligne électrique ;
- entre 2007 et 2015, le développement d'un projet de plate-forme technologique composée d'une centrale photovoltaïque couplée à une chaîne de conversion hydrogène (électrolyseur, compresseur, pile à combustible PAC) en connexion au réseau de distribution (3,6 MW PV avec une PAC de 100 à 200 kW, projet MYRTE).

Ces travaux de recherches ont impliqué plusieurs partenaires : le CEA-LITEN (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les Nanomatériaux, Grenoble), les sociétés HELION (Aix-en-Provence) et le groupe RAFFALLI (Ajaccio), l'INPT (Institut National Polytechnique de Toulouse), ARMINES (Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis), ALPHEA Hydrogène (Forbach), un programme ERASMUS MUNDUS avec la Bulgarie qui s'est matérialisé par un échange d'étudiants et d'enseignants.

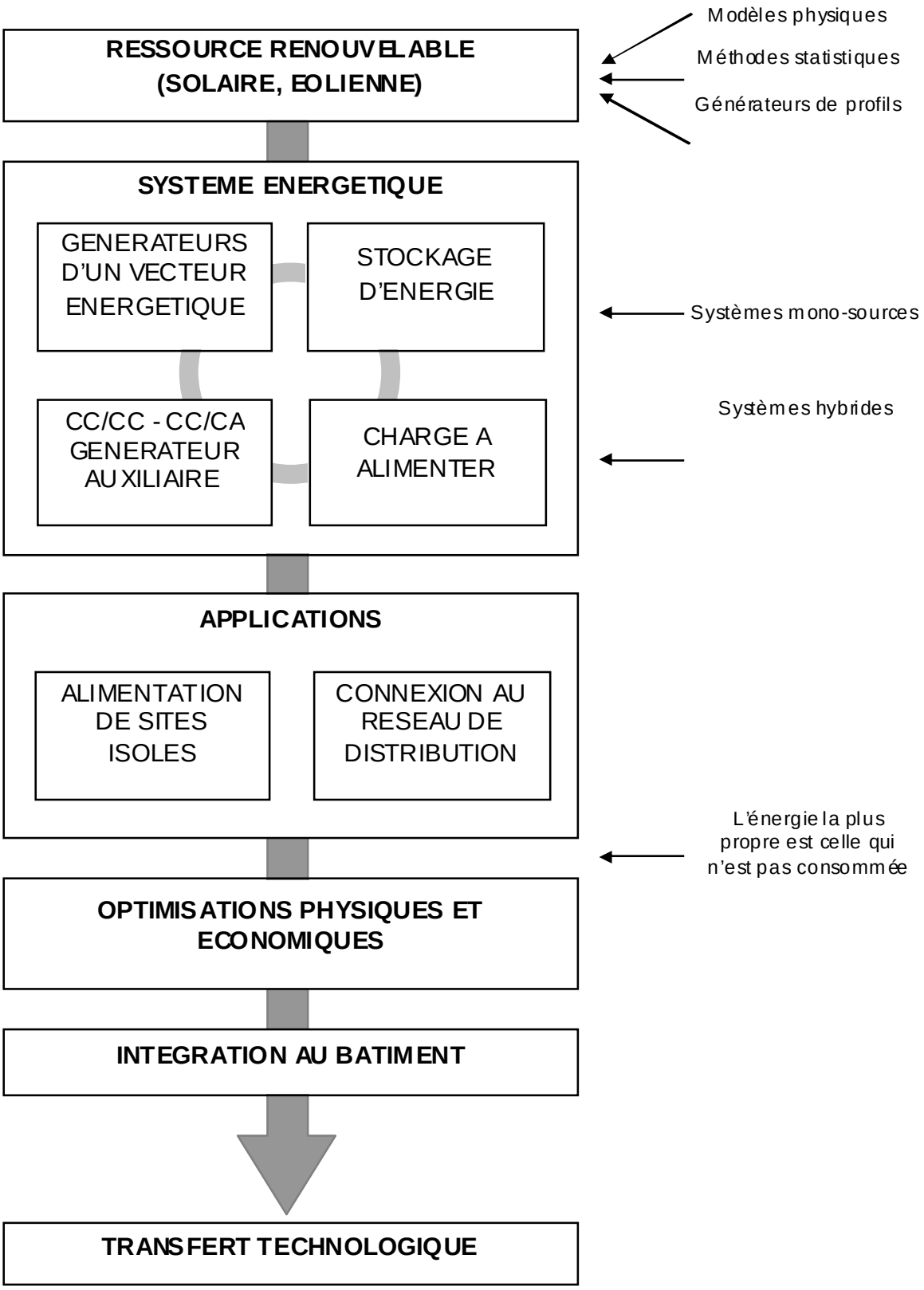

RESSOURCE RENOUVELABLE
(SOLAIRE, EOLIENNE)
Modèles physiques
Méthodes statistiques
Générateurs de profils
SYSTEME ENERGETIQUE
GENERATEURS D'UN VECTEUR ENERGETIQUE
STOCKAGE D'ENERGIE
Systèmes mono-sources
CC/CC - CC/CA GENERATEUR AUXILIAIRE
CHARGE A ALIMENTER
Systèmes hybrides
APPLICATIONS
ALIMENTATION DE SITES ISOLES
CONNEXION AU RESEAU DE DISTRIBUTION
L'énergie la plus propre est celle qui n'est pas consommée
OPTIMISATIONS PHYSIQUES ET ECONOMIQUES
INTEGRATION AU BATIMENT
TRANSFERT TECHNOLOGIQUE

Figure II.2. Développement des méthodologies d'étude des systèmes à SRE dans le cadre de mes travaux de recherches

Estimation Physique des ressources renouvelables

Depuis 1998, nous disposons sur le site du laboratoire (latitude 41°55'N, longitude 8°48'E) une station météorologique située sur une terrasse du bâtiment administratif. Avec l'aide du technicien, j'ai installé cette station de mesure afin de pouvoir utiliser des données météorologiques fiables et mesurées simultanément avec un pas de temps très fin (1 minute). Cette station se substitue à une plus ancienne qui avait fonctionnée sur la période 1985-1989.

La Figure II.3 détaille la station de mesure ainsi que les différents capteurs présents sur un enregistreur de données de type VAISALA QLI50.

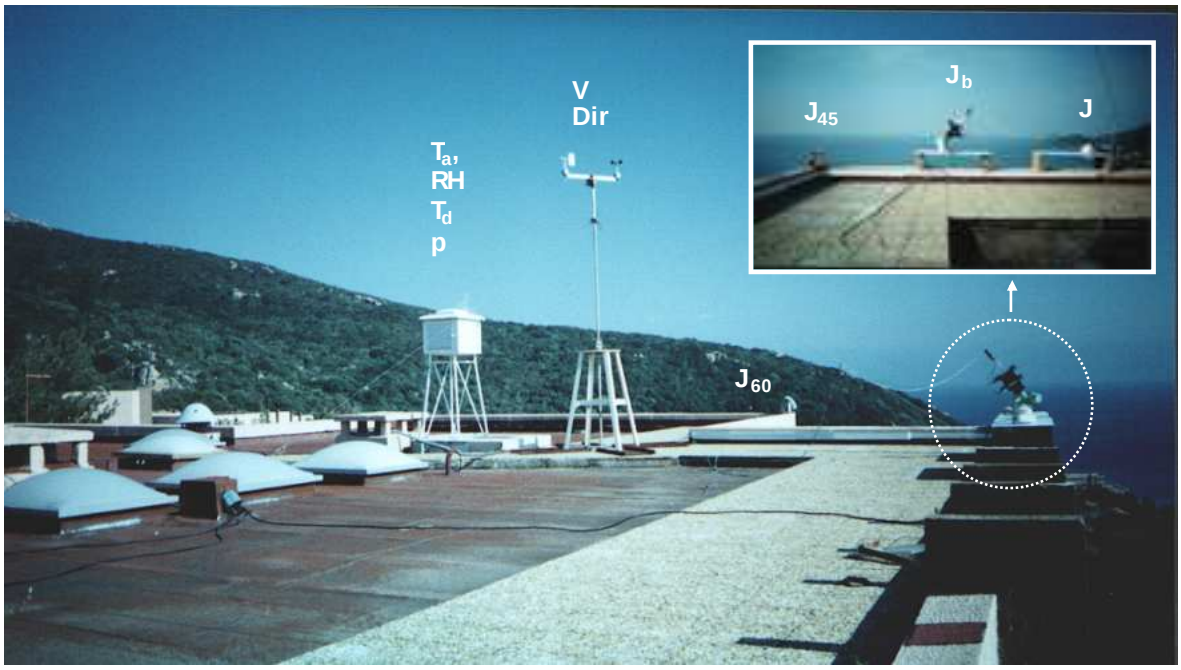


Figure II.3. Station météorologique du laboratoire de l'Université de Corse – CNRS à partir de Mars 1998, données minute : T_a : température ambiante (°C) ; RH : humidité relative (%) ; T_d : température de rosée (°C) sonde Pt100 ; p : pression atmosphérique (Pa, type BAROCAP PTB100 VAISALA) ; V : vitesse du vent (m s^{-1}, mesurée 3 m au dessus d'une terrasse, anémomètre type WAA151 VAISALA) ; Dir : direction du vent (°, type WAV151 VAISALA) ; J, J_{45}, J_{60} : composantes de l'irradiation globale sous des angles de 0, 45 et 60° (W m^{-2}, pyranomètres CM5, CM11, Kipp & Zonen) ; J_b : composante directe du rayonnement solaire (W m^{-2}, pyrhéliomètre NIP Eppley).

Les travaux de recherches entrepris sur la connaissance des intrants énergétiques (solaire, éolien) ont comme but principal, une meilleure description des composantes du rayonnement solaire (et/ou du vent) pour l'obtention avec une bonne précision de l'irradiation horaire globale inclinée sur une surface I_β qui est la donnée indispensable pour le dimensionnement de systèmes photovoltaïques.

13.1 Modélisation physique et approches statistiques de la ressource

i. Composantes du rayonnement solaire

La Figure II.4 présente les différentes composantes du rayonnement solaire à partir du flux incident extraterrestre jusqu'aux flux global, diffus et direct à la surface du globe.

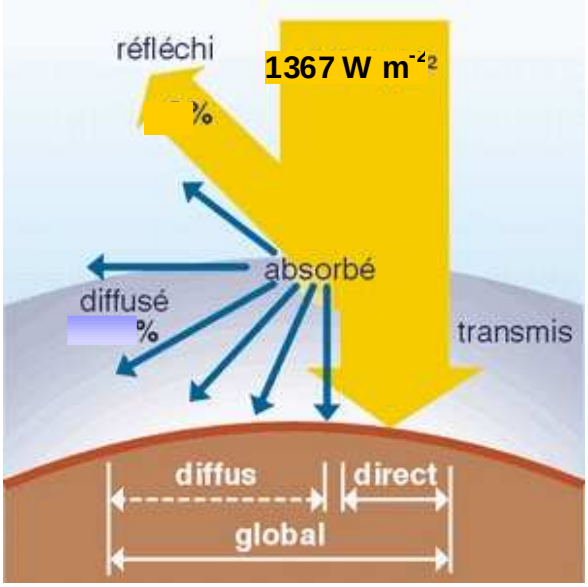


Figure II.4. Composantes du rayonnement solaire

Nos contributions à l'estimation de l'intrant énergétique solaire peuvent se représenter selon la Figure II.5 où :

- ✓ H, H_0 représentent respectivement les rayonnements globaux horizontaux journaliers sur une surface au sol et extraterrestre, $\beta = 0$ (Wh m^{-2}),
- ✓ I, I_0 les rayonnements globaux horizontaux horaires sur une surface au sol et extraterrestre, $\beta = 0$ (Wh m^{-2}),
- ✓ I_d le rayonnement diffus du ciel horaire (Wh m^{-2}),
- ✓ I_β le rayonnement global horaire sur une surface inclinée d'un angle β avec l'horizontal (Wh m^{-2}),
- ✓ J le rayonnement global horizontal mesuré à la station météorologique (W m^{-2}),

✓ les écritures surmontées d'une barre représentent les moyennes mensuelles des variables considérées.

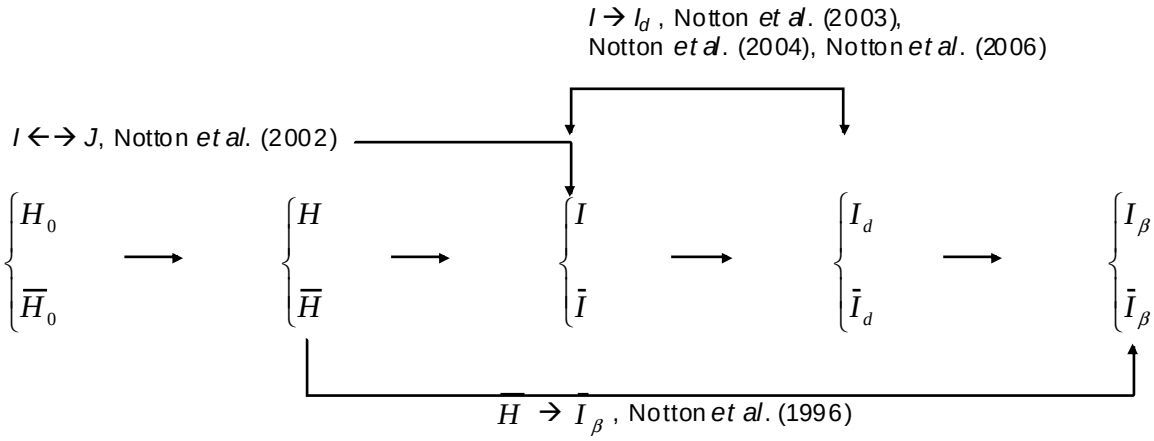


Figure II.5. Description de nos contributions de recherches pour la détermination de la composante inclinée du rayonnement global I_β

Les premiers travaux ont débuté en 1996, où notre équipe de recherches développait des modèles numériques de dimensionnement de systèmes photovoltaïques nécessitant a minima des longues séries temporelles de I_β.

La connaissance de $\bar{I}_\beta$ pour une heure donnée d'un mois donné à partir de $\overline{H}$, a fait l'objet de plusieurs articles scientifiques au cours des dernières décennies. Nous avons proposé (Notton *et al.*, 1996b) une méthodologie rapide permettant de déduire $\bar{I}_\beta$ de $\overline{H}$ en limitant le nombre d'étapes intermédiaires tout en obtenant des coefficients statistiques équivalents aux méthodes développées précédemment dans la littérature. Dans ce mémoire, je m'efforcerai de décrire principalement les nouvelles corrélations élaborées dans ce travail par comparaison aux modélisations précédentes (Figure II.6).

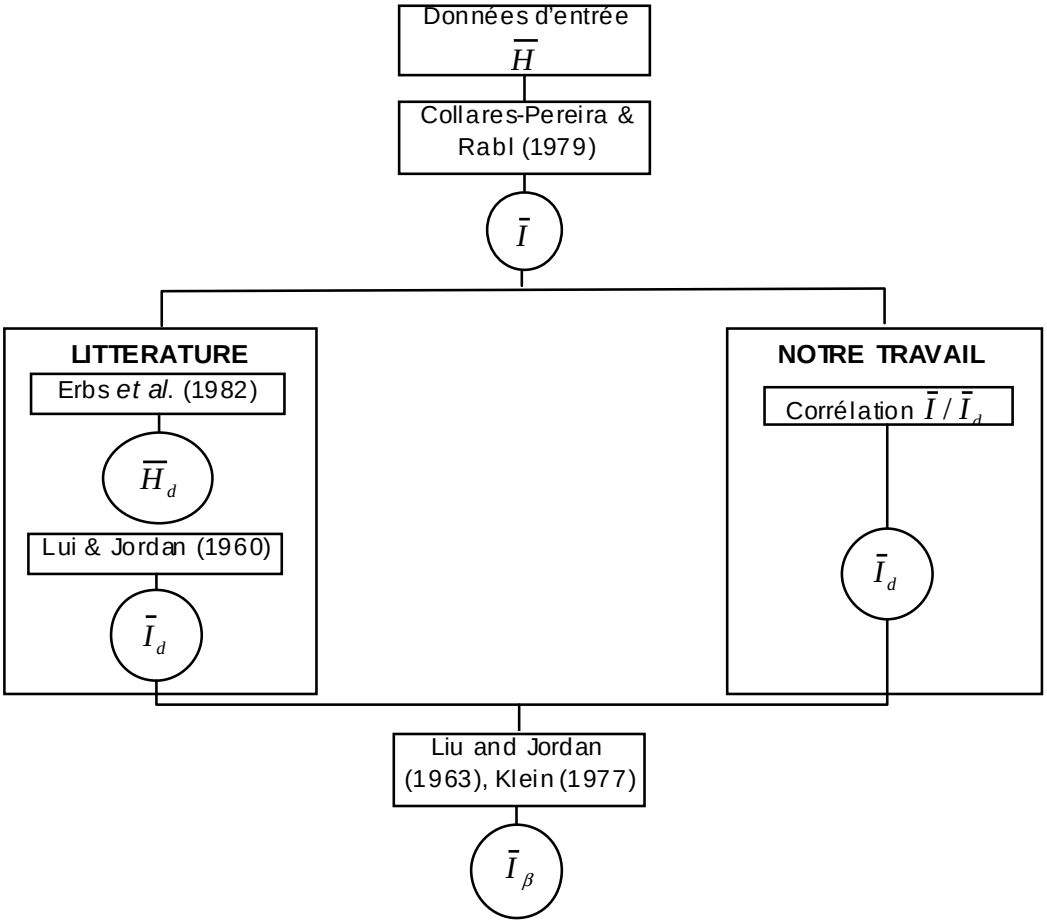


Figure II.6. Schématisation de la méthodologie développée pour l'obtention de $\bar{I}_\beta$.

L'obtention de I_β nécessite dans la littérature, pas moins de 4 étapes de transformations de données météorologiques. La première étape, basée sur Collares-Pereira et Rabl (1979), permet de transformer $\overline{H}$ en $\bar{I}$ suivant :

$$\overline{r_t H} = \bar{I} \qquad \text{II.(1)}$$

où r_t est un coefficient dépendant essentiellement de l'angle horaire ω suivant l'expression :

$$\frac{\overline{r_t H_0}}{a + b\cos\omega} = \bar{I}_0 \qquad \text{II.(2)}$$

où a et b sont fonction de l'angle horaire du lever de soleil sur le site de mesure.

Cette corrélation, étape commune des 2 approches (littérature et personnelle), conduit à partir des données mesurées sur la station entre 1985 et 1989 a des RMBE (Relative Mean Bias Error) = -1,4% et des RRMSE (Relative Root Mean Square Error) = 8,6% (définition des coefficients statistiques en Annexe I).

Contrairement à la littérature qui détermine $\bar{I}_d$ par 2 modèles successifs (Figure II.6), augmentant ainsi le temps de calcul et les erreurs potentielles, nous proposons une corrélation unique permettant d'obtenir $\bar{I}_d$ à partir de $\bar{I}$ (calculées à partir de 5 ans de mesures) et de la composante extraterrestre $\bar{I}_0$ facilement estimable (Soller, 1992) :

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}} = -1{,}2\frac{\bar{I}}{\bar{I}_0} + 1{,}07 \qquad \text{II.(3)}$$

La Figure II.7 représente les corrélations comparées issues des 2 méthodes. Les coefficients statistiques, relatifs aux deux approches (RMBE = -0,025% et 2% respectivement pour la littérature en 3 étapes et notre travail en 2 étapes et RRMSE = 9,7 % et 9,4 %) présentent des erreurs quadratiques relatives similaires avec, pour notre contribution, un temps de calcul plus faible.

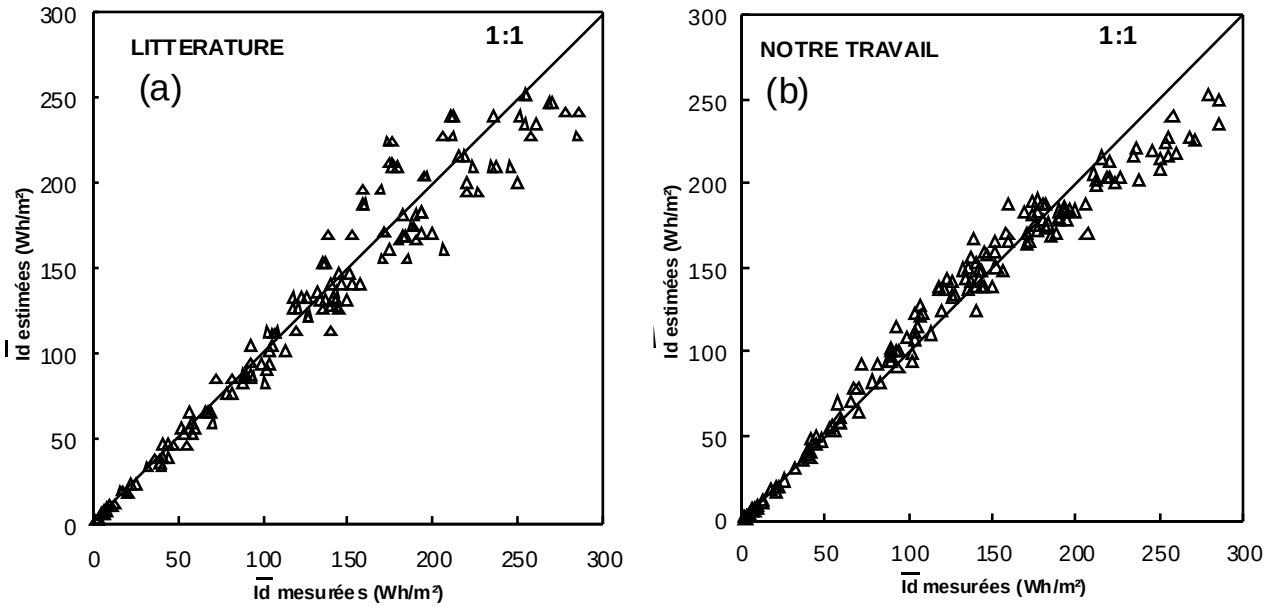


Figure II.7. $\bar{I}_d$ estimées et mesurées. (a) : littérature : combinaison des modèles de Erbs *et al*. (1982) et Liu et Jordan (1960). (b) : Notre contribution en utilisant 5 ans de données météorologiques sur Ajaccio.

Dans la méthodologie dénommée « Littérature », nous avons choisi la corrélation de Erbs *et al.* (1982) pour quantifier $\overline{H}_d$ puis $\overline{I}_d$ à partir de $\overline{H}$. Cette corrélation n'est pas la seule présente dans la littérature et une autre contribution de notre équipe de recherches (Notton *et al.*, 2004) a permis de comparer à partir des mêmes données météorologiques, 7 modèles de la littérature permettant d'obtenir I_d à partir de I. Les modèles présentés (Orgill et Hollands (1977) ; Erbs *et al.* (1982) ; Hollands (1985) ; Hollands et Crha (1987) ; De Miguel *et al.* (2001) ; Skartveit et Olseth (1987) ; Maxwell (1987)) ont été apliqués, validés et comparés à partir des données météorologiques du site d'Ajaccio sur l'année 2002 (3925 données horaires de rayonnement). La description des modèles et des résultats a été effectuée dans Notton *et al.* (2004). Pour Ajaccio, les coefficients statistiques utilisés montrent qu'il existe peu de différences entre ces approches mathématiques. L'utilisation de corrélations qui prennent en compte l'élévation du soleil (Shartveit et Olseth, 1987 ; Maxwell, 1987) n'améliore pas sensiblement la connaissance de I_d. De plus, si l'on supprime les heures de lever et de coucher de soleil (γ < 5°), les résultats ne montrent pas globalement de corrélation supérieures exceptés pour la RRMSE. Enfin, le modèle qui donne les meilleures performances est celui de De Miguel *et al.* (2001). Construit à partir de données solaires de 3 sites méditerranéens et baptisé CLIMED2, il détermine I_d avec des coefficients statistiques égaux à MBE = 1,82 Wh m^{-2}, RMSE = 49,53 Wh m^{-2}, RMBE = 1,34 % et RRMSE = 36,52 % (Tableau II.1). Nos travaux sont antérieurs à ceux de De Miguel *et al.* (2001), c'est pourquoi, au vu des résultats, notre choix s'est porté sur le modèle de Erbs *et al.* (1982).

Coefficients Statistiques	**Elévation du soleil °**	**MBE Wh m^{-2}**	**RMSE Wh m^{-2}**	**RRMBE %**	**RRMSE %**	**CC**
Orgill et Hollands (1977)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	7,30 7,90	50,18 51,74	5,38 5,51	37,00 36,10	0,848 0,828
Erbs *et al.* (1982)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	-0,88 **-0,82**	50,24 51,81	-0,65 **-0,57**	37,05 36,14	0,844 0,825
Hollands (1985)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	0,60 0,78	50,74 52,31	0,44 0,54	37,41 36,49	0,840 0,820
Hollands et Crha (1987)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	10,56 11,35	53,46 55,13	7,79 7,92	39,42 38,46	0,832 0,810
De Miguel *et al.* (2001)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	1,82 2,07	**49,53** 51,07	1,34 1,44	36,52 **35,63**	0,850 0,831
Skartveit et Olseth (1987)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	13,49 14,48	50,04 51,62	9,94 10,10	36,90 36,01	**0,860** 0,843
Maxwell (1987)	$\forall\gamma$ $\gamma > 5°$	-4,14 -4,28	51,61 53,20	-3,06 -2,98	38,06 37,11	0,842 0,822

Tableau II.1. Comparaison de 7 modèles de la littérature pour la détermination de la composante diffuse horaire de l'irradiation solaire (Notton *et al.*, 2004). Les valeurs en gras représentent les meilleurs résultats statistiques.

La dernière étape de la détermination de l'irradiation horaire globale inclinée I_β est commune aux 2 méthodes de la Figure II.6. Elle est basée sur une corrélation classique

développée par Lui et Jordan (1963) et améliorée par Klein (1977) et elle détermine les valeurs moyennes horaires pour chaque mois de l'irradiation sur des surfaces inclinées selon :

$$\overline{I_{s,\beta}} = \overline{I_d}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \qquad \text{II.(4)}$$

où β est l'angle d'inclinaison du plan. Pour déterminer les valeurs moyennes horaires pour chaque mois du rayonnement direct sur une surface inclinée, Klein (1977) propose :

$$\overline{I_{b,\beta}} = (\bar{I} - \bar{I}_d)\overline{r_b} \qquad \text{II.(5)}$$

où $\overline{r_b}$ est le rapport entre les valeurs moyennes mensuelles des irradiations incidentes extraterrestres sur une surface inclinée et sur un plan horizontal :

$$\overline{r_b} = \overline{I_{0,\beta}} / \overline{I_0} \qquad \text{II.(6)}$$

La combinaison de ces composantes solaires (Iqbal, 1983) permet d'obtenir les valeurs moyennes mensuelles de $\overline{I_\beta}$ pour les 2 méthodes présentées dans ce travail. Les coefficients statistiques et les corrélations graphiques, à titre d'exemple pour β = 30°, sont présentées respectivement dans le Tableau II.2 et la Figure II.8.

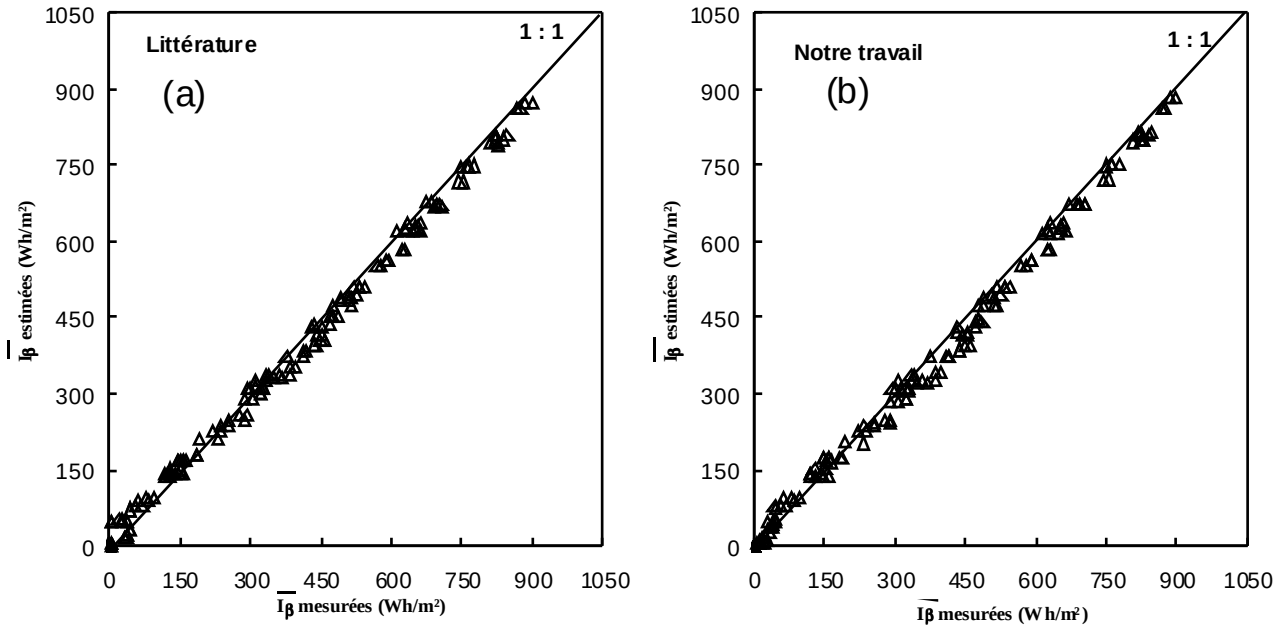


Figure II.8. $\overline{I_\beta}$ estimées et mesurées pour β = 30°. (a) : littérature en 4 étapes à partir des Eqs II.1, II.2 et des références Erbs *et al*.(1982), Liu et Jordan (1960, 1963), Klein (1977). (b) : notre contribution en 3 étapes à partir des Eqs II.1, II.2, II.3 et des références Liu et Jordan (1960, 1963), Klein (1977).

β	Méthode « Littérature »		Notre contribution	
	RMBE (%)	RRMSE (%)	RMBE (%)	RRMSE (%)
30°	0,6	9,9	1,9	8,9
45°	0,6	11,0	1,6	11,0
60°	1,6	8,1	1,3	12,0

Tableau II.2. Principaux coefficients statistiques pour l'obtention de $\overline{I_\beta}$ à partir du modèle de la littérature en 4 étapes et à partir du modèle proposé dans ce travail en 3 étapes pour différentes inclinaisons β.

Les valeurs des coefficients statistiques valident la méthodologie du fait qu'ils sont voisins malgré une diminution du nombre d'opérations sur les données météorologiques. En effet, les 2 méthodes ne nécessitent que les valeurs moyennes pour chaque mois de l'irradiation journalière sur un plan horizontal. Cette technique peut, lorsque les données de base sont connues, caractériser des intrants énergétiques de systèmes photovoltaïques pour un dimensionnement optimal.

Un autre aspect du travail sur les composantes du rayonnement solaire a consisté à déterminer et vérifier la pertinence de certaines corrélations permettant de calculer des profils de l'irradiation globale horaire sur un plan horizontal I non constant sur l'heure. En effet, il est classique de dimensionner des systèmes photovoltaïques à partir de données horaires de l'irradiation dont la répartition est constante sur une même heure. Malheureusement, la répartition en puissance de la charge à alimenter est souvent décrite à des pas de temps inférieurs à l'heure ce qui oblige à recalculer une distribution horaire induisant des pertes d'informations. Dans ce travail (Notton *et al.*, 2002), nous suggérons, à partir de 2 modélisations simples des nouvelles répartitions horaires de l'irradiation, non constante. Les données horaires estimées sont comparées aux données minutes intégrées mesurées sur le site.

La première répartition proposée est basée sur une régression linéaire du rayonnement solaire entre le début et la fin de l'heure de type :

$$I(t) = a(h)t + b(h) \qquad \text{II.(7)}$$

Ainsi entre 2 évènements h et $h + 1$:

$$\int_h^{h+1} I.dt = \int_h^{h+1} [a(h+1)t + b(h+1)].dt = I(h+1) \qquad \text{II.(8)}$$

Par intégration et en simplifiant les expressions, on obtient :

$$\begin{cases} a(h+1) = 2[I(h+1) - I(h)] \\ b(h+1) = I(h) - a.h.(h+1) \end{cases} \qquad \text{II.(9)}$$

Les conditions aux limites fixées par les heures de lever et de coucher du soleil sont des cas particuliers (Notton *et al.*, 2002), caractérisés par exemple pour l'heure de lever h_{SR} :

$$\begin{cases} I(h_{SR}) = 0 \\ \int_{h_{SR}}^{h} [a(h)t + b(h)].dt = I(h) \end{cases} \qquad \text{II.(10)}$$

La Figure II.9 illustre, pour 2 journées météorologiques différentes (ciel clair et ciel couvert), l'efficacité du modèle linéaire par comparaison aux données minutes expérimentales mesurées sur le site d'Ajaccio.

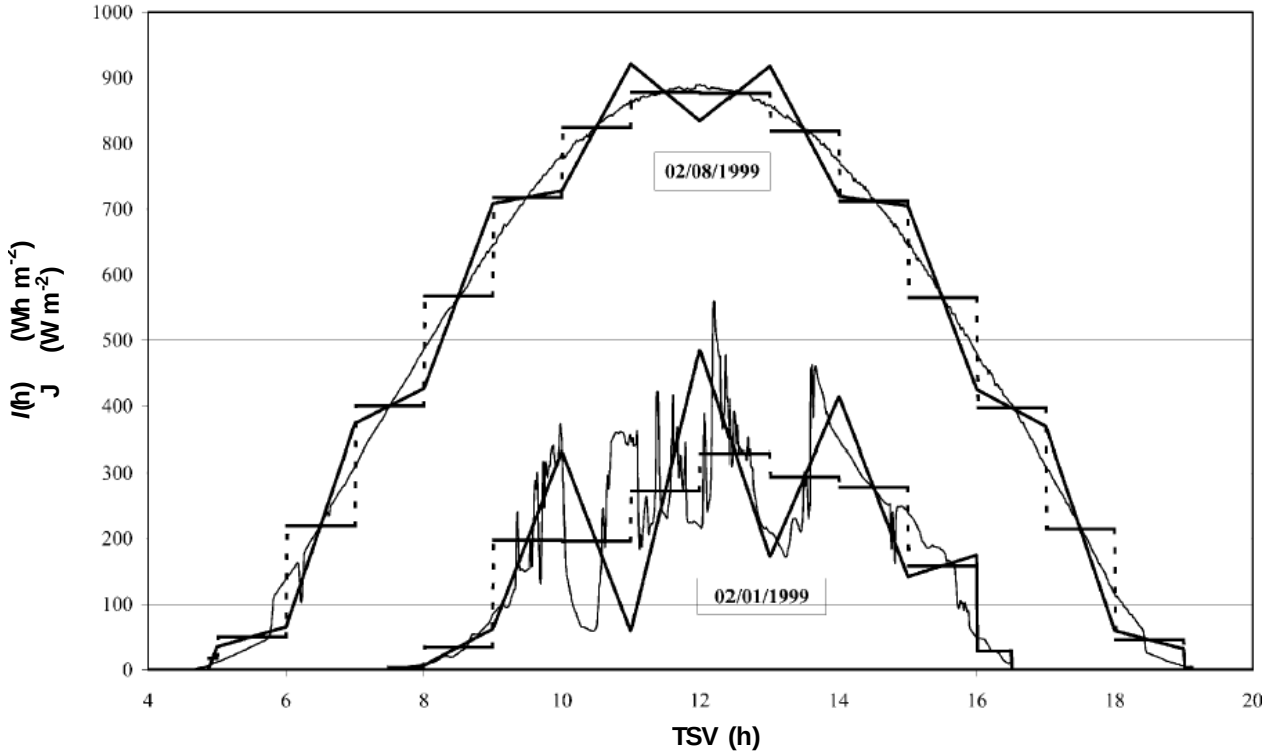


Figure II.9. Répartition horaire linéaire de la composante *I(h)* (trait plein épais) du rayonnement solaire par comparaison d'une part, à une répartition horaire constante (trait plein « pallier ») et d'autre part, aux données minutes *J* (W m^{-2}, trait fin) pour deux journées de couvertures nuageuses différentes.

La modélisation linéaire de *I(h)* ne présente pas de résultats satisfaisants pour la journée du 02/01/1999 (ciel couvert). En effet, entre 10h et 11h (TSV), le modèle linéaire et les données expérimentales varient en sens opposé (Figure II.9). Les coefficients statistiques comparatifs confirment cette tendance (Tableau II.3). Selon le coefficient statistique choisi, le meilleur modèle varie : la répartition horaire constante de *I(h)* est plus adaptée au ciel couvert selon la RMSE (Wh m^{-2}) mais moins adéquate selon la RRMSE (%). Cette remarque s'explique par une efficacité des modèles différentes en fonction des heures de la journée comme nous l'avons montré dans nos travaux (Notton *et al.*, 2002).

La seconde modélisation proposée dans ce travail est basée sur la connaissance aisée des profils horaires *I(h)* et journaliers *H(d)* de l'irradiation solaire par ciel clair à partir des

irradiations extraterrestres I_0. En effet, la radiation émanant du soleil est atténuée (absorption et diffusion) dans l'atmosphère avant d'atteindre la surface terrestre. Nous proposons d'utiliser dans ce modèle un facteur de transmission $\tau(h)$ qui prend en compte cette atténuation telle que (Iqbal, 1983) :

Par ciel clair : $I(h) = E_0.I_{SC}.(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega(h))$ II.(11)

Par ciel couvert : $I(h) = \tau(h).E_0.I_{SC}.(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega(h))$ II.(12)

Où : E_0 Facteur correctif d'excentricité de l'orbite de la Terre (Spencer, 1971) ;

I_{sc} Constante solaire = 1367 W m^{-2} selon les recommandations de l'OMM ;

δ Déclinaison (Spencer, 1971) ;

ϕ Latitude du site de mesure.

Ainsi,

$$\int_{h-1}^{h} I.dt = I(h) = \int_{h-1}^{h} \tau(h).E_0.I_{SC}.(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega(h)).dt \qquad \text{II.(13)}$$

Par intégration et suite à plusieurs simplifications, nous obtenons la valeurs du facteur de transmission $\tau(h)$ en fonction de l'angle horaire $\omega(h)$ (Notton *et al.*, 2002). Les conditions aux limites de cette intégration sont définies par les heures de lever h_{SR} et de coucher h_{SS} du soleil suivant le couple :

$$\begin{cases} h_{SR} = h-1 \\ h_{ss} = h \end{cases} \qquad \text{II.(14)}$$

Nous avons validé ce modèle sur les 2 journées expérimentales précédentes. Les profils mesurés (données minutes) et estimés (répartition construite sur un modèle prenant en compte la transmission du rayonnement dans l'atmosphère) sont représentés sur la Figure II.10. Les coefficients statistiques liés à cette modélisation sont résumés dans le Tableau II.3.

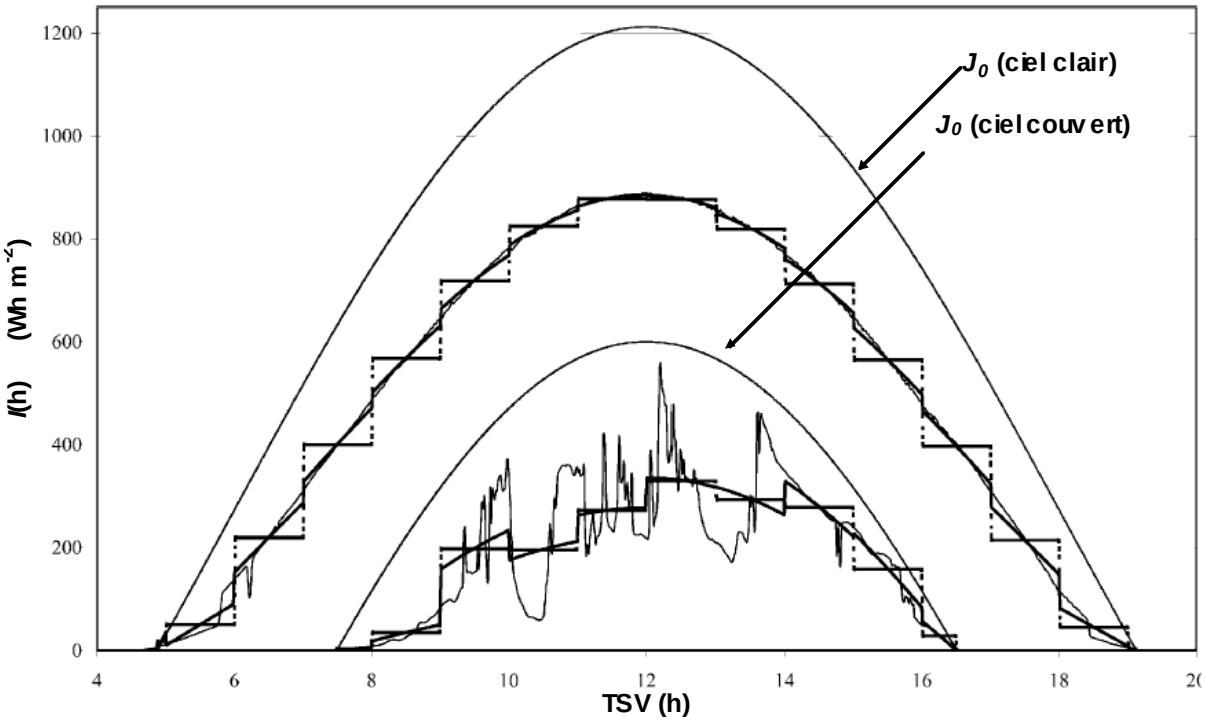


Figure II.10. Répartition horaire de la composante *I(h)* selon le modèle extra-terrestre (trait plein épais) du rayonnement solaire par comparaison d'une part, à une répartition horaire constante (trait plein « pallier ») et d'autre part, aux données minutes *J* (W m^{-2}, trait fin) pour deux journées de couvertures nuageuses différentes. A titre de comparaison, les profils J_0 extraterrestres sont ajoutés.

La Figure II.10 montre la bonne adéquation du modèle « extraterrestre » avec les données expérimentales confirmée par les tests statistiques. Il apparaît comme la meilleure représentation du profil minute mesuré sur le site (Tableau II.3) avec des RRMSE acceptables pour les 2 journées testées. Ce modèle, somme toute, construit sur la base d'un horizon libre, n'est pas capable de prendre en compte les légères distorsions du profils de *I(h)* correspondant à $h = h_{SR}$ et $h = h_{SS}$ dues à la présence d'un masque montagneux sur le site de mesure.

Répartition Horaire	Ciel	MBE Wh m^{-2}	RMBE %	RMSE Wh m^{-2}	RRMSE %	CC
Constante						
02/08/1999	Clair	**0,08**	15,45	39,77	70,49	0,933
02/01/1999	Couvert	**-0,02**	31,30	74,86	140,63	0,853
Linéaire						
02/08/1999	Clair	0,09	10,10	32,79	50,59	0,996
02/01/1999	Couvert	-42,76	19,51	91,92	76,02	0,793
Extraterrestre						
02/08/1999	Clair	0,17	**5,33**	**11,82**	**23,46**	**0,999**
02/01/1999	Couvert	-42,87	**17,66**	**69,51**	**60,21**	**0,875**

Tableau II.3. Coefficients statistiques calculés pour les 3 répartitions horaires de *I(h)* en fonction de l'état de la couverture nuageuse par comparaison aux données minutes mesurées sur le site d'Ajaccio. Les valeurs en gras représentent les meilleures valeurs pour chaque type de journée (ciel clair ou ciel couvert)

Les travaux effectués sur 2 journées « type » ont été étendus de manière systématique à une année complète (1999) de mesures de rayonnement solaire global horizontal soient 3500 valeurs. Les 3 répartitions horaires (constante, linéaire et extraterrestre) ont été comparées sur la base des tests statistiques calculés pour chaque heure de la journée. Le principal résultat mentionné uniquement dans ce mémoire (détails dans Notton *et al.*, 2002) montrent la pertinence du modèle « extraterrestre » avec comme valeurs des tests statistiques : $\overline{RRMSE(h)}$ = 30,48% ; $\overline{RMSE(h)}$ = 52,31 Wh m^{-2} ; $\overline{MBE(h)}$ = -0,00018 Wh m^{-2}. Enfin, pour 57% des données horaires, le modèle extraterrestre est plus fiable que les 2 autres formulations (28,5% et 14,5% respectivement pour les répartitions linéaires et constantes). Ces résultats montrent l'intérêt de telles modélisations pour le dimensionnement optimal futur de systèmes photovoltaïques dont les charges à alimenter présentent des profils au cours de la journée la plupart du temps décrits avec des pas de temps inférieurs à l'heure.

ii. Méthodologie de classification en journée-type

Dans le but de faciliter l'utilisation de données météorologiques comme entrées de simulations de systèmes photovoltaïques ou pour appliquer des méthodes de pré-dimensionnement, nous avons proposé une méthodologie pour réduire une série temporelle de l'irradiation solaire en « journées-type » météorologiques caractérisant des classes liées par des probabilités de transition et des distributions de fréquence (Muselli *et al.*, 2000a). Dans ce mémoire, je ne porterai à la connaissance du lecteur que les points principaux de la démarche et les résultats majeurs liés à ce travail.

L'état de l'art de ces méthodologies de classement en journées type présentait un certain nombre de travaux qui nécessitaient un grand nombre de paramètres météorologiques indispensables à la mise en œuvre de la technique. Ainsi, Sacré (1984), Fabero *et al.* (1997), Bouiller et Le Chapellier (1984) utilisent au minimum 10 paramètres (I, T_a, V, RH, N, etc.) pour la détermination de plusieurs classes complexes (voire sous-classes) de journées. Dans nos travaux (Muselli *et al.*, 2000a), une méthode basée sur la connaissance de l'irradiation globale horizontale et inclinée couplée à sa composante extraterrestre s'appuie sur l'utilisation de 4 paramètres discriminants permettant de définir des indices de clarté horaires $k_t(h)$ ou journaliers $KT(d)$ tels que :

$$k_t(h) = \frac{I(h)}{I_0(h)} \qquad \text{II.(15)}$$

$$KT(d) = \frac{H(d)}{H_0(d)} \qquad \text{II.(16)}$$

De la même manière, nous avons considéré $k_{t\beta}(h)$ et $KT_\beta(d)$ pour des inclinaisons de capteurs différentes de l'horizontale. Deux sites de mesure, distants de 10 km, ont été exploités : la station météorologique du laboratoire (données minutes J, J_{45} et J_{60} intégrées sur l'heure) et la station Météo-France de l'aéroport d'Ajaccio - Campo del'Oro (4 m d'altitude, données horaires I sur un plan horizontal). Pour ce dernier site, les données I_β (β = 30, 45 et 60°) sont obtenues par un modèle classique (Hay et Davis, 1980) reconnu par la communauté scientifique et vérifié au préalable sur nos données du laboratoire (RMBE = 1,4% ; RRMSE = 8,6% et CC = 0,994 ;

Muselli *et al.*, 1998). La période expérimentale commune sur les deux sites s'étend entre Janvier 1994 et Août 1998 soit 1448 journées (15% perte).

Deux autres paramètres discriminants ont été construits : le premier dénommé S2 estime l'état de perturbation du signal de l'indice de clarté horaire horizontal ou incliné au cours d'une journée :

$$S2 = \sum_h [k_t(h+2) - (2.k_t(h+1) + k_t(h)]^2 \qquad \text{II.(17)}$$

Le second introduit la notion d'un seuil *ktm*, basé sur une étude préalable dans notre laboratoire (Louche *et al.*, 1991), qui représente la valeur moyenne de l'indice de clarté horaire pour le mois *m* et un angle d'inclinaison β :

$$ktm = \overline{k_t(h, m, \beta)} \qquad \text{II.(18)}$$

Ainsi, le dernier paramètre discriminant appelé *Sl* représente le nombre d'heures pour un jour donné où $k_t(h) < ktm$.

La méthode de classification proposée est celle de Ward utilisant une distance euclidienne entre échantillons. Cette méthode permet une représentation graphique de la classification progressive et localise les points de rupture distinguant les classes au sens de l'inertie. Utilisant une méthode itérative, la classification groupe les journées de telle sorte que les classes présentent un minimum d'inertie. Cette méthodologie est alors vérifiée et validée par une analyse factorielle discriminante et permet de représenter l'homogénéité dans un même groupe et les différences entre les groupes. Un résultat d'analyse est présenté sur la Figure II.11 avec (a) : l'agrégation de Ward sur le site Météo-France avec β = 30° et pour le mois de Janvier (pour 4 années consécutives) ; (b) : l'analyse discriminante générant les groupes d'échantillons ayant des facteurs discriminants proches.

Cette méthodologie a été appliquée sur chaque site, pour chaque mois et pour chaque angle d'inclinaison β. Le processus de classification a montré que les journées étudiées se groupaient quasi-exclusivement en 3 classes : I : ciel clair, II : partiellement couvert au cours du jour, III : complètement couvert. Ces résultats rejoignent une précédente étude d'Aranovitch *et al.* (1984) qui arrivaient aux mêmes résultats en utilisant des paramètres différents ($\overline{H}$, T_a, V). Notre méthodologie se distingue par l'utilisation de paramètres discriminants construits sur des mesures de rayonnements solaires classiques sur des stations synoptiques. Muselli *et al.* (2000a) décrivent les caractéristiques de chaque classe (fréquence, moyenne, écart-type) afin de comprendre l'influence de chaque paramètre discriminant. Ainsi, on s'aperçoit que *KT(d)* et *Sl* sont 2 paramètres corrélés et que *S2* tel que défini dans ce travail est plus faiblement discriminant. La méthodologie complète basée sur les 3 classes distinctes a été élargie à l'ensemble des 1448 journées reparties séquentiellement. Cette étude avait pour but à terme de développer des séquences synthétiques de l'irradiation solaire globale pour l'étude de performances et de pré-dimensionnement de systèmes photovoltaïques (en sites isolés ou en connexion au réseau de distribution). Ainsi, chaque paramètre discriminant $k_t(h)$, *KT(d)*, *Sl*, *S2* a été caractérisé par ses propriétés statistiques. En particulier, pour chaque groupe (I, II ou III), il a été possible d'attribuer

pour chaque heure *h*, une valeur moyenne et un écart-type de l'indice de clarté horaire $k_t(h)$ afin de reconstituer des profils « type » de l'irradiation solaire globale sur le site étudié (Figure II.12).

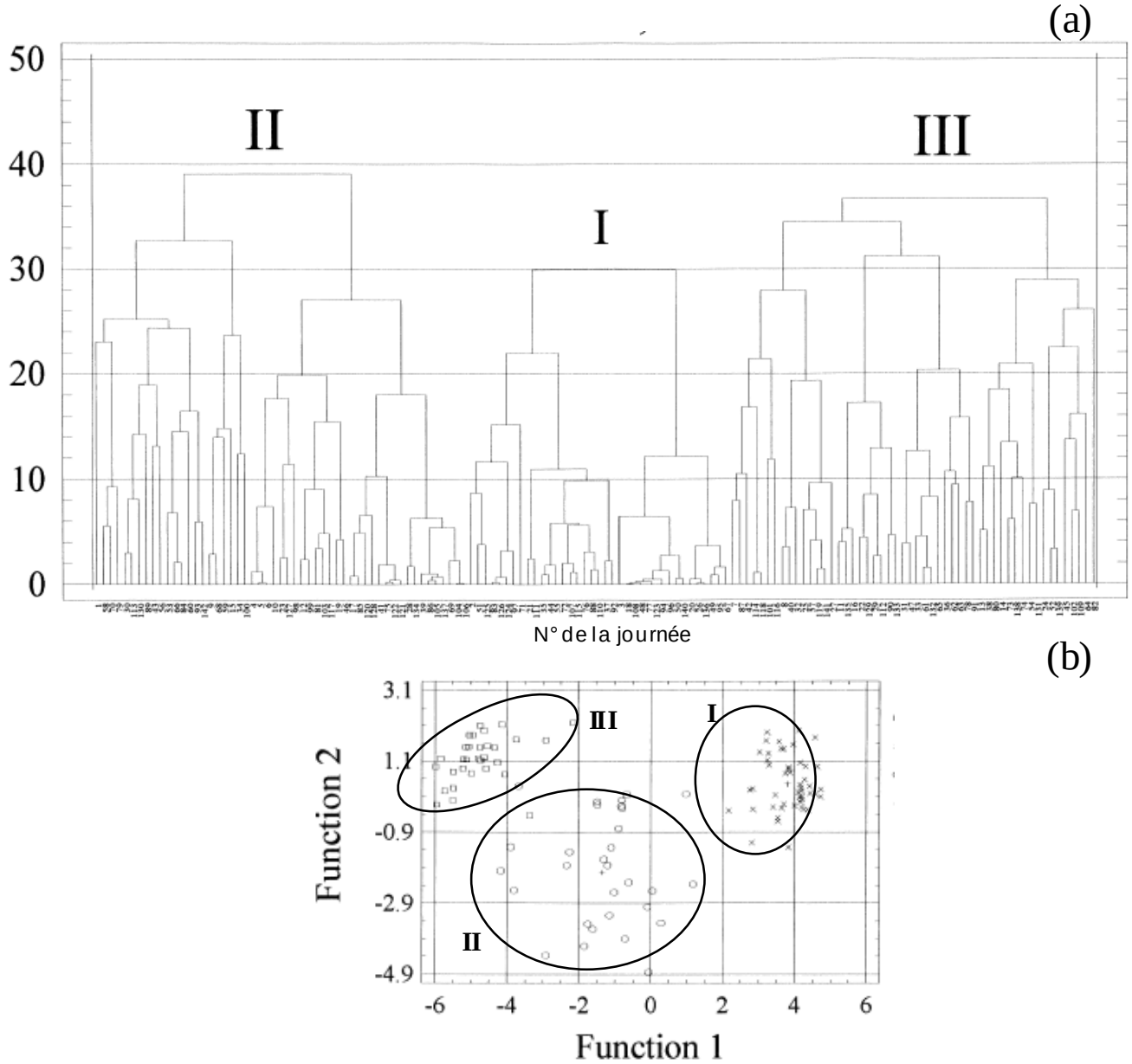
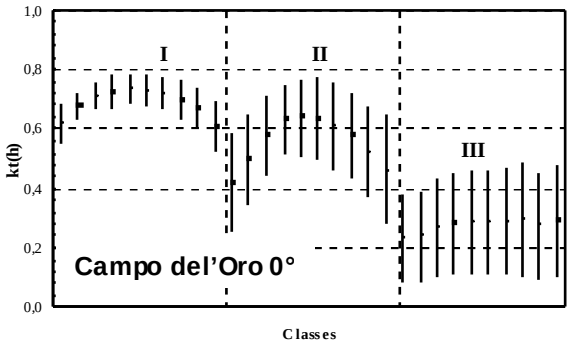
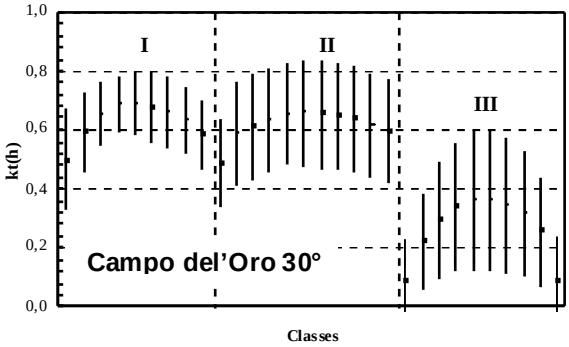
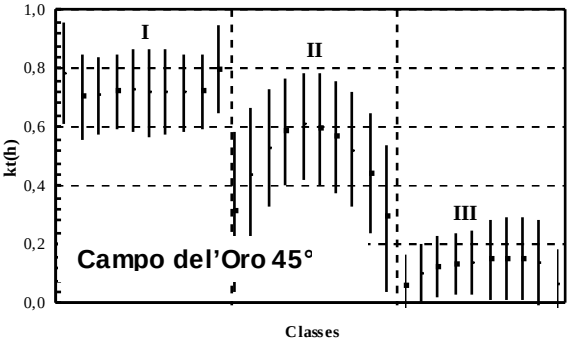


Figure II.11. Méthode de classification de Ward (a) couplée à une analyse factorielle (b) construite sur les facteurs discriminants décrits par les Eqs II.15 à II.18. Les étiquettes I, II, III correspondent aux groupes de journées-type identifiés lors de la classification.

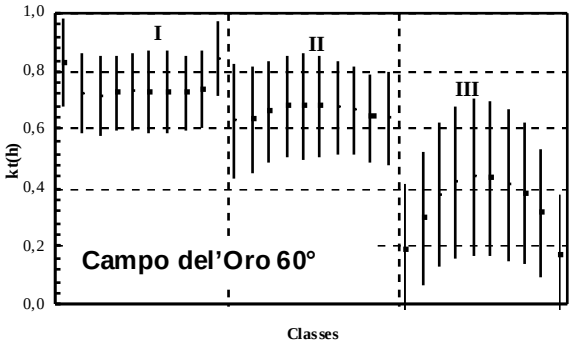


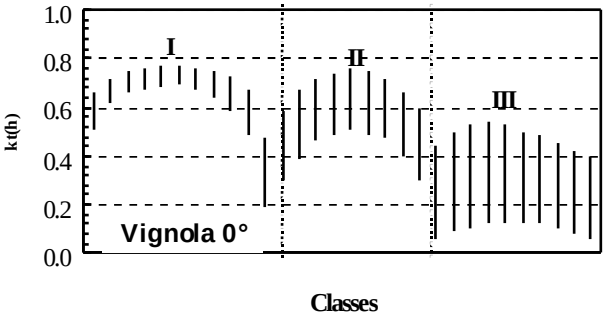


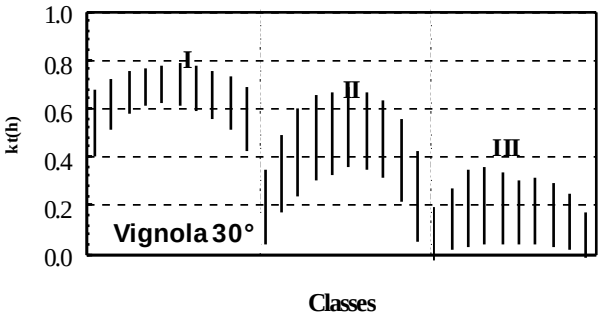
Campo del'Oro (45°)

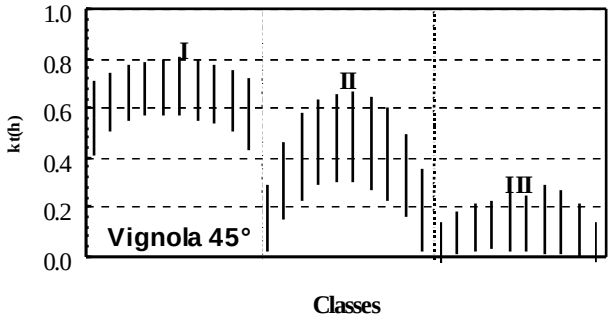


Campo del'Oro (60°)









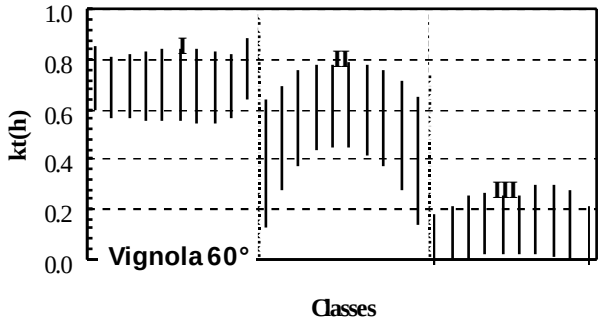


Figure II.12. Reconstitution des profils de $k_t(h)$ pour chaque classe et chaque site en fonction de l'angle d'inclinaison β.

Cette étude met en évidence différentes classes de journées « type » pour l'étude de performances de systèmes. La conclusion principale de ce travail est que 2 sites marins distants seulement de 10 km ne sont pas sujets aux mêmes conditions climatiques sur la base du rayonnement solaire car leurs propriétés statistiques sur $k_t(h)$ présentent des différences notables en fonction des classes considérées. Ce résultat est en accord avec les études préalables de corrélations temporelles et spatiales en Corse qui ont montré qu'au delà de 10 km, la corrélation sur le rayonnement solaire est très faible (Muselli, 1997).

13.2 Générateurs de profils de l'intrant à l'aide de modèles auto-régressifs

La mesure du rayonnement solaire (global, direct, diffus) nécessite un investissement important et des territoires, plus ou moins étendus, se retrouvent alors totalement dépourvus d'un réseau d'estimation de la ressource solaire. C'est le cas de la Corse où dans les années 1990, seules 2 stations synoptiques mesuraient le rayonnement global horizontal. Cet état de fait nous a conduit à développer des techniques alternatives d'estimation de ce potentiel solaire via l'utilisation de données satellitaires (Muselli, 1997 ; Muselli *et al.*, 1998a, 1998b). Ces techniques, au mieux, permettent d'avoir une évaluation du gisement solaire à savoir une valeur sur chaque pixel (25 km² en 1995) du rayonnement global horizontal journalier H, donnée satisfaisante mais insuffisante pour le dimensionnement optimal de systèmes PV.

Afin d'obtenir à partir de H des profils horaires I et I_β de l'irradiation globale, nous avons proposé une méthodologie basée sur l'utilisation de modèles auto-régressifs (Muselli *et al.*, 1998b). La donnée d'entrée du modèle est l'indice de clarté journalier $KT(d)$ tel que défini à l'Eq. II.(16) issu des estimations satellitaires.

L'indice de clarté $k_t(h)$ est considéré comme la somme d'une composante déterministe $k_td(h)$ liée à la hauteur du soleil pendant la journée (égale à la valeur moyenne de $k_t(h)$ pour un angle au zénith donné) et d'une composante aléatoire $\alpha(h)$ (Aguiar et Collares-Pereira, 1992) :

$$k_t(h) = k_t d(h) + \alpha(h) \qquad \text{II.(19)}$$

où :

$$k_t d(h) = \lambda(KT) + \varepsilon(KT).e^{-[\kappa(KT)/\cos\theta_Z]} \qquad \text{II.(20)}$$

où : λ, ε, et κ sont des fonctions de l'indice de clarté journalier KT selon Graham *et al.* (1987). Enfin, selon ces auteurs, $\overline{\alpha(h)} = 0$ et $\sigma[\alpha(h)] = f(KT, \theta_Z)$.

Le modèle baptisé TAG (Aguiar et Collares-Pereira, 1992) utilisé dans ce travail est construit sur l'indice de clarté $k_t(h)$; il est auto-régressif, non stationnaire et conduit à une distribution gaussienne de la variable. Ainsi, $k_t(h)$ est centrée-réduite pour obtenir $y(h)$ et son évolution séquentielle ne dépend que de l'état précédent de la variable :

$$y(h) = \phi_1.y(h-1) + A(h) \qquad \text{II.(21)}$$

où : ϕ_1 est le coefficient d'auto-corrélation du premier ordre lié à *KT* ; *A(h)* est une variable gaussienne aléatoire avec $\overline{A(h)} = 0$, $\sigma[A(h)] \approx 1$.

Ainsi, le modèle proposé utilise en entrée l'unique donnée de rayonnement journalier *H* ramenée à un indice de clarté journalier *KT*.

Ce modèle a été testé à partir de 19 ans de rayonnement horaire global mesuré à la station météorologique de Météo-France à Ajaccio. La pertinence de la composante déterministe $k_t d(h)$ (Eq. II.20) par comparaison aux données expérimentales a été vérifiée (RMSE = 0,01 ; RRMSE = 2,67 % ; CC = 0,998) ainsi que la modélisation de l'écart-type de $k_t(h)$ (RMSE = 0,01 ; RRMSE = 15,03 % ; CC = 0,977) Pour chaque jour, les coefficients d'autocorrélation du premier et du second ordre ϕ_k (Eq. II.22) ont été calculés afin de valider l'ordre du processus autorégressif par classes de *KT* de 0,05 (Figure II.13a). Le coefficient du second ordre est proche de 0 alors que ϕ_1 n'est pas négligeable.

$$\phi_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k}[y(t)-\overline{y}].[y(t+p)-\overline{y}]}{[\sum[y(t)-\overline{y}]^2]^{1/2}.[\sum[y(t+p)-\overline{y}]^2]^{1/2}} \qquad \text{II.(22)}$$

Une répartition gaussienne de *y(h)* a été établie et vérifiée (Eq. II.23, Figure II.13b) en considérant des pas d'indice de clarté centré-réduit de 0,25. Ainsi, $\overline{y} = -0{,}03$; $\sigma[y(h)] = 1{,}2$ et CC = 0,999 :

$$p[y(h)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma[y(h)]^2}}.\exp\left[-\frac{[y(h)-\overline{y}]^2}{2.\sigma[y(h)]^2}\right] \qquad \text{II.(23)}$$

(a) (b)

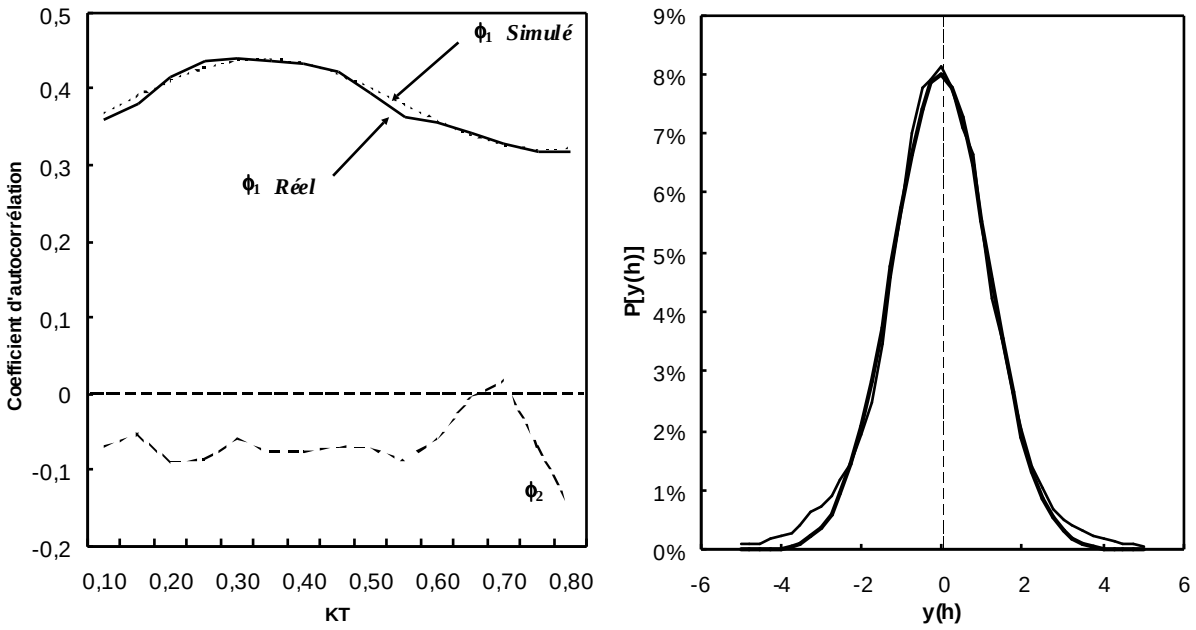
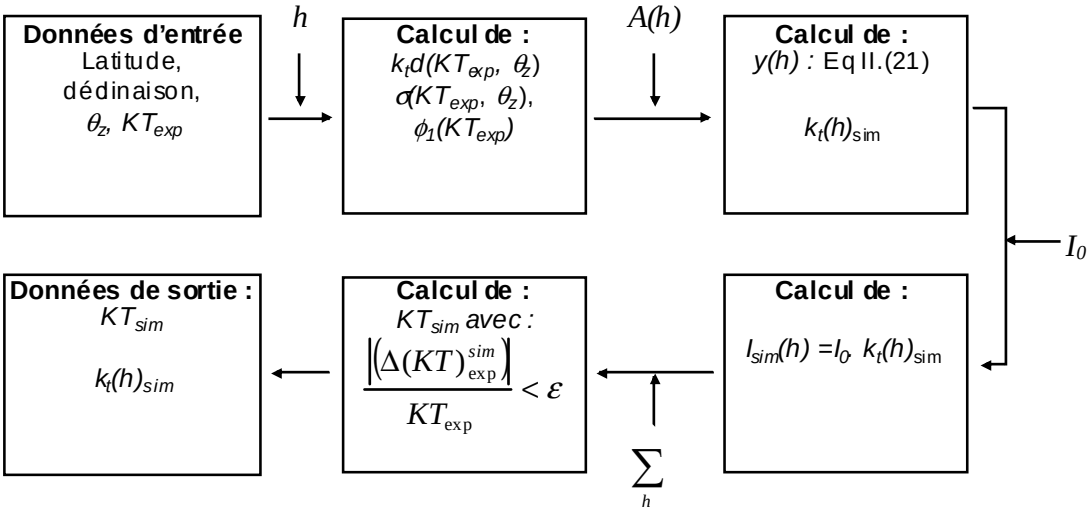


Figure II.13. (a) : Fonctions d'autocorrélation ϕ_1 et ϕ_2 en fonction de l'indice journalier *KT*. (b) : Vérification de la normalisation du signal *y(h)* : données expérimentales (trait épais) et données simulées (trait fin)

La dernière étape du travail a consisté à développer un simulateur de données horaires du rayonnement global en entrée des codes numériques de simulation de systèmes photovoltaïques. La Figure II.14 schématise les étapes nécessaires à la mise en place de ce



simulateur.

Figure II.14. Simulateur de données utilisant un modèle autorégressif de reconstitution de profils horaires de l'indice de clarté horizontal $k_t(h)$.

Les données d'entrée sont la latitude du lieu, la déclinaison solaire et le KT_{exp} journalier estimé par exemple via des images satellites. Le simulateur détermine alors la composante déterministe du modèle TAG et construit un signal aléatoire type bruit blanc. Il simule $y(h)_{sim}$ pour en extraire $k_t(h)_{sim}$ et reconstituer par intégration sur chaque heure un KT_{sim} journalier, qui sera comparé avec une tolérance $\varepsilon = 3$ % au KT_{exp}.

La Figure II.15 valide la méthodologie de reconstitution des profils horaires $k_t(h)$ simulés et expérimentaux pour 19 ans de données de rayonnement sur le site d'Ajaccio (RMSE = 0,01 ; RRMSE = 6,33 % et CC = 0,97).

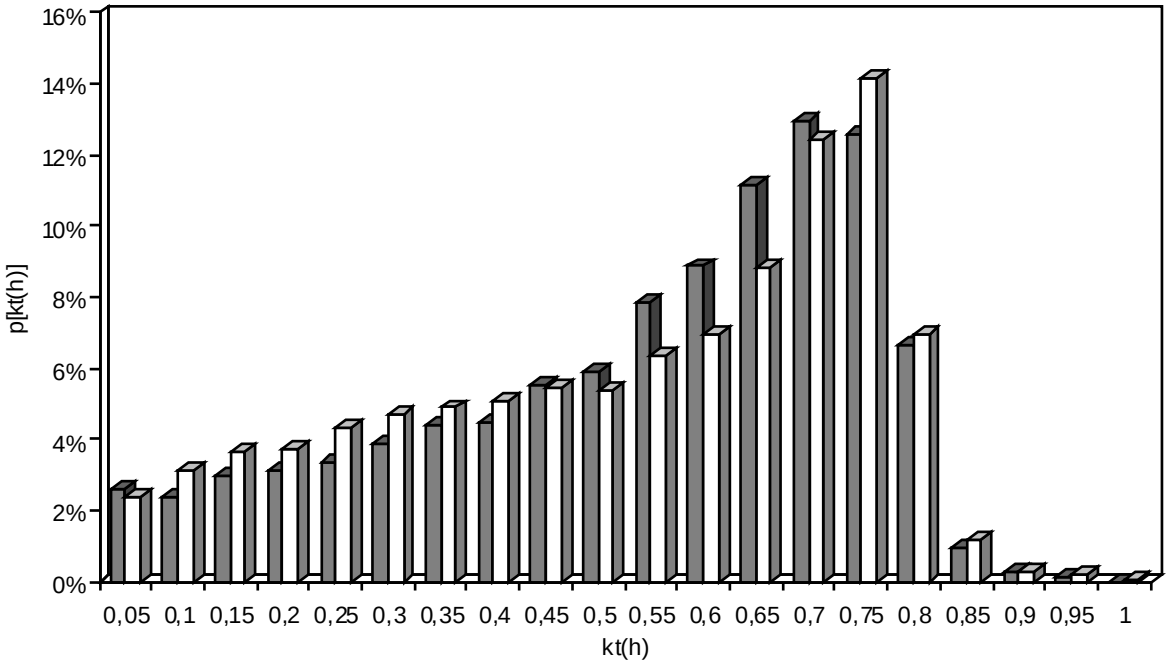
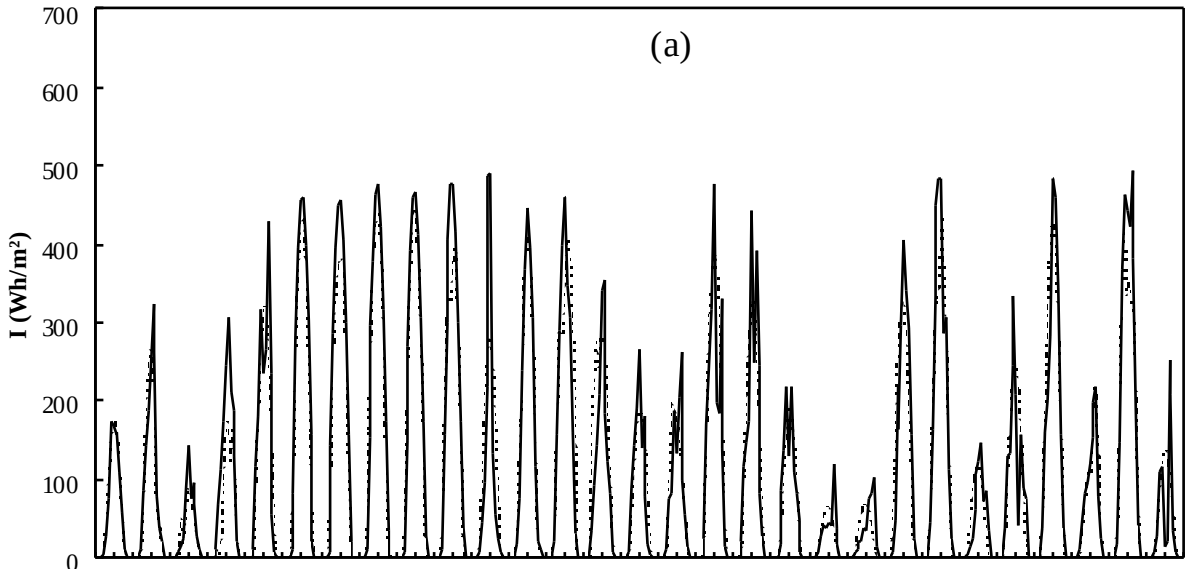


Figure II.15. Distributions de probabilité de l'indice de clarté horaire horizontal $k_t(h)$ expérimentale (histogrammes blancs) et simulée (histogrammes noirs) sur une période de 19 ans à Ajaccio (station de mesure Météo France)

A titre d'exemple, nous présentons deux profils mensuelles de $k_t(h)$ construits à partir de *KT* journaliers issus d'images satellites METEOSAT. Les coefficients statistiques sont acceptables (Janvier 1993, Figure II.16a : MBE = -3,84 Wh m^{-2}, RMSE = 80,35 Wh m^{-2}, CC = 0,945 ; Fevrier 1993, Figure II.16b : MBE = -4,16 Wh m^{-2}, RMSE = 85,4 Wh m^{-2}, CC = 0,955) compte tenu des résultats obtenus sur les courbes de dimensionnement photovoltaïques issues de ces données d'indice de clarté (cf. Muselli *et al.*, 1998b).



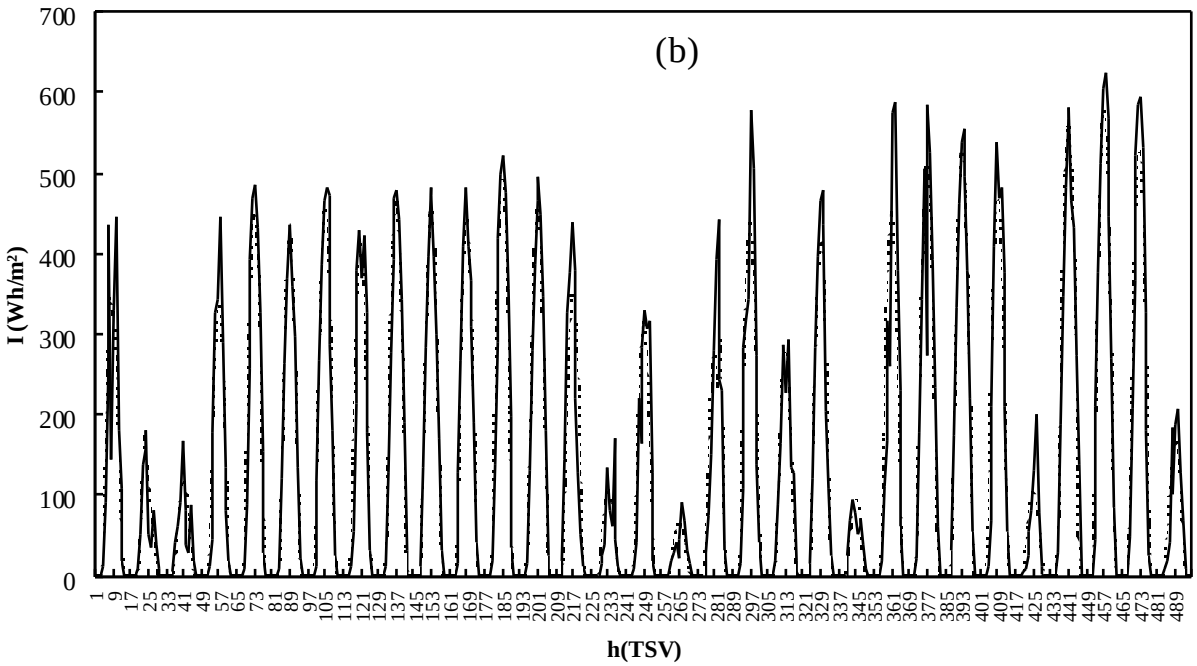


Figure II.16. Reconstitution des profils du rayonnement global horizontal *I* par l'utilisation d'un modèle autorégressif utilisant comme données d'entrée un indice de clarté journalier *KT* issu d'images satellites. (a) : Janvier 1993, (b) : Février 1993, trait plein : données expérimentales, trait pointillé : données simulées.

Nous disposons ainsi d'une méthodologie fiable, robuste qui a l'avantage d'utiliser des données estimées via des images satellite (*KT* journalier) permettant la reconstitution de profils horaires de l'indice de clarté ($k_t(h)$ et/ou $k_{t\beta}(h)$) indispensables au dimensionnement de systèmes photovoltaïques en tout point d'une région lorsque la mesure au sol n'est pas suffisante ou non accessible.

Cette méthodologie a été élaborée et validée avec succès sur une autre ressource renouvelable : l'estimation de la ressource éolienne (Poggi *et al.*, 2003). En effet, la vitesse du vent est un phénomène aléatoire qui ne peut pas être complètement décrit par une distribution de probabilité car cette vitesse du vent à chaque heure est corrélée avec les heures précédentes. Ainsi, ces auto-corrélations n'étaient pas prises en compte dans les travaux scientifiques décrits dans la littérature (Chou et Cortis, 1981 ; Conradsen *et al.*, 1984 ; Luna et Church, 1974 ; Morgan, 1995).

La technique mathématique reposant sur l'utilisation d'un modèle autorégressif (AR) est suffisamment flexible pour étudier d'une part, les caractéristiques principales de la vitesse du vent et d'autre part, les performances des systèmes éoliens de petites ou grande puissances. Afin de valider la méthode, nous avons appliqué un modèle AR sur des données triheures (soit 8 données par jour) de la vitesse du vent mesurée à 10 m sur 3 sites insulaires corses : Ersa (31 ans, 1962-1992), Pertusato (29 ans, 1962-1990), Figari (12 ans, 1980-1991). Les données trihoraires (m s^{-1}), issues des bases de Météo-France, ont été notées *V(h, d, m, y)*. L'originalité de ces travaux dans la littérature scientifique (Box et Jenkins, 1976 ; Daniel et Chen, 1991 ; Kamal et Jafri, 1997 ; Nfaoui *et al.*, 1997) repose sur 3 axes : l'utilisation de données trihoraires pour la reconstitution des propriétés statistiques de la vitesse du vent, la décomposition de cette analyse sur un pas de temps mensuel pour isoler éventuellement une composante saisonnière et le travail

sur des séries temporelles de mesure très importantes (plus de 20 ans). Pour le modèle AR d'ordre *p* d'une variable *Z(t)*, nous généralisons l'expression de l'Eq. II.(21) :

$$Z(t) = \sum_{i=1}^{p} \phi_i . Z(t-i) + a(t) \qquad \text{II.(24)}$$

La construction d'un signal *a(t)* de type bruit blanc est identique à celle définie dans Muselli *et al.* (1998b). En accord avec Balouksis *et al.* (1986) et Nfaoui *et al.* (1997), la transformation de *V(h, d, m, y)* en une variable gaussienne repose sur la construction d'une autre variable $V^x(h, d, m, y)$ transformée et standardisée par la méthode basée sur le coefficient S_x (skewness statistical coefficient) défini, pour chaque mois *m* par :

$$S_x(m) = \frac{1}{DMY} \sum_{y=1}^{Y} \sum_{d=1}^{M} \sum_{h=1}^{D} \left(\frac{V^x(h,d,m,y) - \overline{V^x(m)}}{\sigma'(m)} \right)^3 \qquad \text{II.(25)}$$

où : *D, M, Y* : nombres de jour, mois et année d'étude ;

σ'(m) : écart-type mensuel de la variable $V^x(h,d,m,y)$;

$\overline{V^x(m)}$: moyenne mensuelle de la variable $V^x(h,d,m,y)$.

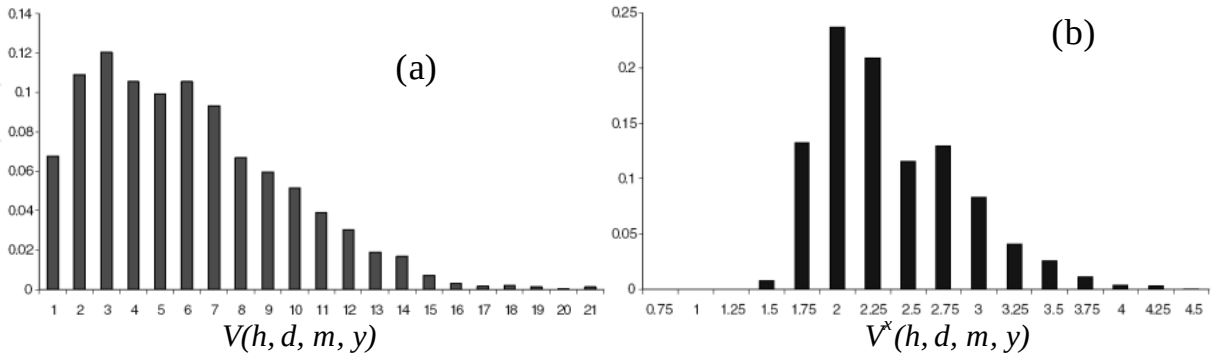
La valeur de la puissance *x* de *V* a été déterminée pour chaque site et chaque mois. Afin d'obtenir la stationnarité de la variable pour l'utilisation dans le modèle AR, nous avons enlevé la non-stationnarité journalière en considérant une nouvelle variable $V^{x*}(h, d, m, y)$ définie par :

$$V^{x*}(h,d,m,y) = \frac{V^x(h,d,m,y) - \overline{V^x(h,m)}}{\sigma(V^x)} \qquad \text{II.(26)}$$

où : $\overline{V^x(h,m)}$: moyenne mensuelle de *V* à la puissance *x* pour une triheure donnée *h* ;

$\sigma(V^x)$: écart-type mensuel de V^x pour une triheure donnée *h*.

En utilisant la loi de probabilité normale (Eq. II.23), V^{x*} obéit aux propriétés d'une variable gaussienne comme nous pouvons le voir sur la Figure II.17 par la transformation progressive de *V(h, d, m,y)* vers V^x puis $V^{x*}(h, d, m, y)$.



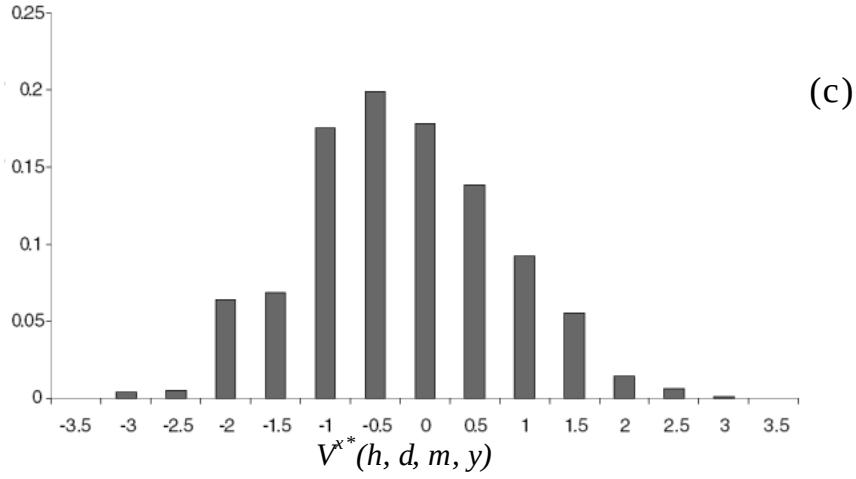


Figure II.17. Processus de transformation et de standardisation de la vitesse du vent (m s^{-1}) en une variable gaussienne. Densité de probabilité de (a) : *V(h, d, m, y), (b) :* $V^x(h, d, m, y)$, *(c) :* $V^{x*}(h, d, m, y)$.

L'étape suivante à la construction d'un simulateur de données trihoraires de la vitesse du vent à 10 m est la détermination de l'ordre *p* du processus AR. Pour cela, une analyse combinée de 3 paramètres a été élaborée considérant la variable V^{x*} :

- $\varphi_k(m)$: fonction partielle d'autocorrélation mensuelle PACF ; ces fonctions présentent des valeurs proches de 0 pour des ordres supérieurs à *p* ;
- *BIC(p)* : « *Bayesian Information Criterion* » qui considère le principe de parcimonie dans la construction du modèle (Schwartz *et al.*, 1997) ; le meilleur choix de *p* minimise la valeur de *BIC(p)* ;
- *AIC(p)* : « *Akaike Information Criterion* » qui représente un test du modèle pour la valeur de son ordre qui est obtenu par minimisation de ce test.

L'analyse systématique sur chaque site, chaque mois et pour *p* = 1, 2, 3 ou 4 a conduit, dans plus de 75 % des cas à un modèle AR d'ordre 2. Ce résultat est confirmé par l'étude des autocorrélations des résidus qui sont normalement distribuées dans un intervalle de confiance selon la méthode décrite par Ménard (1990). La construction d'un simulateur de vitesses de vent aura pour but de reproduire les propriétés statistiques du signal mesuré afin d'étudier les performances de grands systèmes éoliens. La comparaison sur la base mensuelle des signaux simulés et mesurés conclut à une bonne représentation du phénomène physique par un modèle AR(2). En effet, l'erreur moyenne quadratique relative RRMSE sur $\overline{V(m)}$ (vitesse moyenne du mois *m*) est de 3,05% pour un CC = 0,984. Il est en de même pour $\sigma[V(m)]$ avec RRMSE = 5,23% pour CC = 0,965 et pour les fonctions d'auto-corrélations du premier et second ordre : RRMSE (ϕ_1) = 3,44%, RRMSE (ϕ_2) = 9,38% avec CC (ϕ_1) = 0,973 et CC (ϕ_2) = 0,957.

Nous avons également comparé les distributions de probabilités annuelles réelles et simulées de la vitesse de vent trihoraire et nous obtenons RRMSE = 4,26% et CC = 0,916 (Poggi *et al*., 2003).

En résumé, les différentes techniques stochastiques élaborées et validées pourront être utilisées en entrée de simulation de systèmes (photovoltaïques et/ou éolien) afin d'étudier leurs performances vis à vis d'une ressource aléatoire dans l'espace et le temps avant même leur construction sur site.

Systèmes énergétiques à SRE (sources renouvelables d'énergie) pour les sites isolés

Comme nous venons de le voir, les ressources renouvelables, de part leur caractère aléatoire, demandent, lorsqu'elles ne sont pas mesurables sur de longues séries temporelles, une connaissance statistique suffisante pour être utilisées en entrée de systèmes. En partant du principe trivial que « l'énergie la moins chère est celle qui n'est pas consommée », les travaux suivants la thèse de Doctorat (dimensionnement de systèmes hybrides photovoltaïques en sites isolés) se sont focalisés sur plusieurs aspects :

- la généralisation de la méthode de dimensionnement globale développée dans Muselli (1997), Muselli *et al*. (1999) aux systèmes éoliens de petites puissance (< 10 kW) ;
- la définition de profils de « basse consommation » pour une réduction de la taille des sous-systèmes et nécessairement du coût de production de l'énergie via des systèmes à SRE ;
- l'étude d'une éventuelle réduction de puissances des systèmes par la mise en place d'une probabilité de pertes de charge non nulle, générant une absence d'alimentation sur de courtes périodes en fonction des besoins mais diminuant fortement les coûts énergétiques.

Ces systèmes seront vus dans la modélisation comme un ensemble de sous-systèmes échangeant de l'énergie (générateurs mono ou bi-source, stockage électrochimique de type batterie, source auxiliaire de type groupe électrogène) en alimentation d'une charge représentant soit une habitation ou un groupe d'habitations. Le cas particulier d'une chaîne de conversion hydrogène (électrolyseur, compresseur, pile à combustible), en substitution d'une partie, voire de la totalité du stockage « batteries », sera traité plus en détails dans le paragraphe II.3.4. Ainsi, les énergies renouvelables bien adaptées à une production décentralisée d'électricité peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés et ouvrir de vastes marchés notamment pour les entreprises des secteurs photovoltaïque et éolien.

14.1 Utilisation rationnelle de l'énergie

La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un système de production à SRE comme pour tout autre système énergétique est la demande, qui va être déterminée par rapport à la et/ou les charges à alimenter. Cette demande doit être estimée aussi précisément que possible tant d'un point de vue des puissances appelées que de sa répartition temporelle, même si son caractère aléatoire rend cette tache bien difficile (Notton et Muselli, 1998a).

Les charges pourront être en courant continu ou alternatif, « conventionnelles » (équipements électriques disponibles sur le marché de rendement de conversion faible) ou « adaptées » c'est à dire à hauts rendements énergétiques, plus chères mais de durées de vie et rendements de conversion supérieurs. A titre d'exemple, une maison équipée de manière conventionnelle consomme en moyenne 3000 kWh/an (8,2 kWh/jr). Cette consommation peut être réduite à 700 kWh annuels soit 1,9 kWh/jr sans pour autant diminuer le degré de confort de l'usager.

Cette logique d'économie de l'énergie, a été intégrée dans nos recherches par la définition de 2 profils saisonniers de consommation conduisant tous deux au même niveau de confort (Muselli, 1997 ; Notton et Muselli, 1998a) : le profil « économe » utilise des équipements à hauts rendements énergétiques pour une consommation de 623 kWh/an (Figure II.18a) ; le profil « standard » mesuré à partir d'appareils énergétiques de consommations courantes sur le marché pour 1517 kWh/an (Figure II.18b).

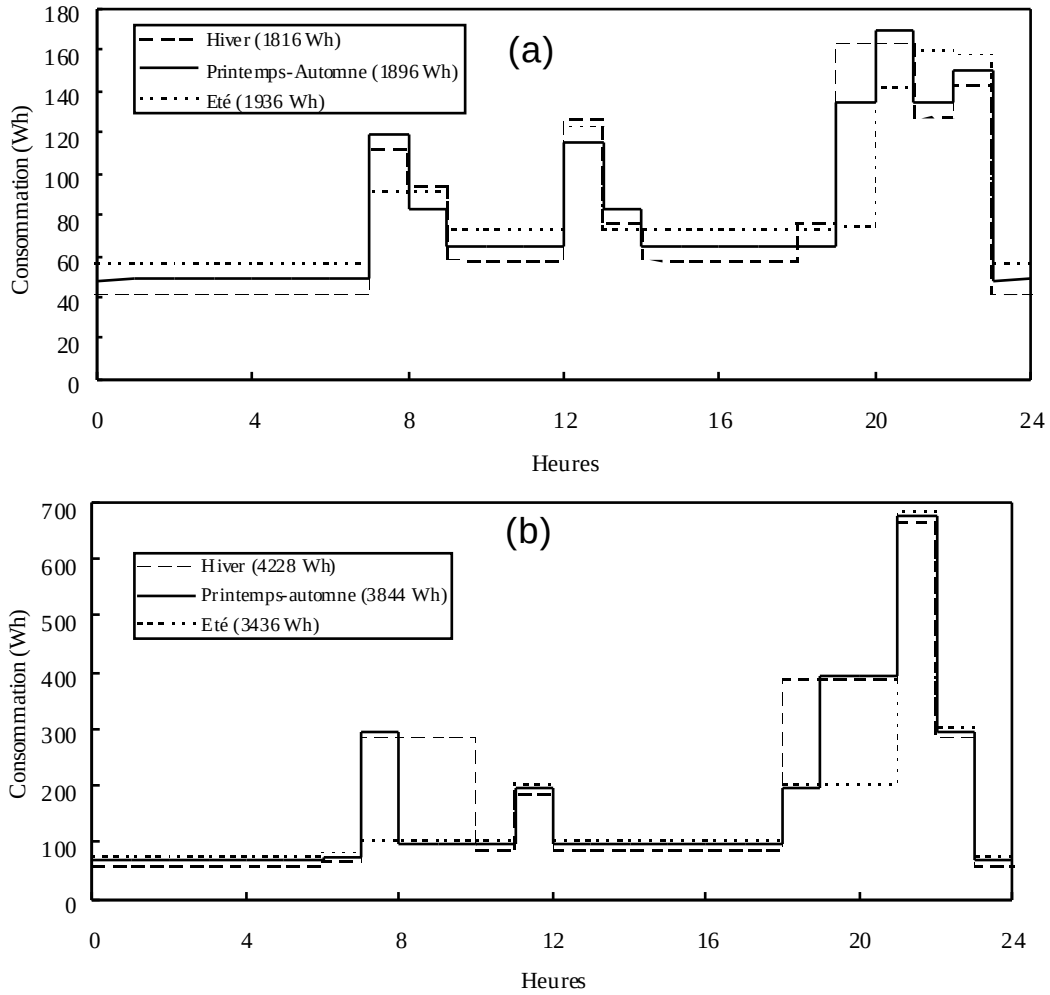


Figure II.18. Profils de consommation (a) « économe » et (b) « standard » utilisés comme charges à alimenter pour les systèmes énergétiques.

A cette maîtrise de la demande d'électricité, et avant d'aborder le dimensionnement physique des systèmes, nous avons développé une procédure complète de la détermination du coût d'un kWh produit par un système PV (Notton *et al.*, 1998b). Compte tenu de l'importance de la valeur du coût de l'énergie produite par ces systèmes (entre quelques euros à quelques dizaines d'euros par kWh), il est important d'avoir une estimation fiable de ce coût sur la durée de vie pour pouvoir le comparer éventuellement à ceux d'autres systèmes de production d'électricité décentralisés ou non (groupe électrogène, petits systèmes éoliens, raccordement

au réseau de distribution). Cette procédure décrite dans Notton *et al.* (1998b), prend en compte et optimise l'ensemble des paramètres intervenants dans ce coût : durée de vie du système, prix des composants par unité de puissance (modules PV, supports PV, contrôleur, onduleur, source auxiliaire, convertisseur AC/DC, parc de batteries, etc…), coût de l'installation, de remplacement et de maintenance sur la durée de vie (taux d'actualisation).

Cette procédure ainsi que les travaux préalables menés sur les premiers modèles numériques de dimensionnement (Muselli, 1997) ont été étendus à l'utilisation de petits systèmes éoliens en sites isolés.

14.2 Photovoltaïque et/ou éolien en alimentation de sites isolés

Les premiers travaux suivant la thèse de Doctorat (Notton et Muselli, 1998a) ont permis de montrer l'importance du choix du profil de consommation d'une charge sur le dimensionnement d'un système photovoltaïque avec batteries de stockage. Une variation de la probabilité de perte de charge LOLP (Loss Of Load Probability, LOLP = 0 pour l'autonomie du système et LOLP = 0,01 soit 3 jours de charge non satisfaite par an) a contribué à comprendre l'importance de la bonne définition du profil de consommation en fonction des appareils énergétiques utilisés. Pour des utilisations de maintien de froid ou d'alimentation de relais hertziens de type secours, la LOLP est plus contraignante comprise entre 0,001 et 0,0001.

La méthodologie de dimensionnement est basée sur les travaux préalables (Muselli, 1997) en simulant numériquement le comportement du système sur la base des équations de conservation de l'énergie et de continuité du stockage. Les données météorologiques proviennent de la station météorologique du laboratoire au pas de temps horaire et sur une période de 5 ans.

La Figure II.19 montre les courbes de dimensionnement (couples S_{PV}, C_{batt} : surface du champ PV et capacité de batteries) établies selon la méthode prédéfinies dans Muselli (1997) ainsi que la configuration optimale de fonctionnement pour les 2 profils de consommation et les 2 valeurs de LOLP. Au niveau de la configuration optimale, on constate selon les profils, que la perte d'un point de LOLP conduit à -8 à -30% pour S_{PV} et -50 à -60% pour C_{batt} ce qui permet d'économiser 30 à 40% du coût du kWh produit. Si l'on s'intéresse à ce coût sur la durée de vie du système (20 ans), on montre que le profil « économe » permet une économie de près de 72% par comparaison au profil « standard ». L'inconvénient majeur de ces systèmes simples est la quantité importante d'énergie perdue produite par le champ PV et dont la charge n'a pas besoin au moment de cette production. Cette perte sera diminuée par l'ajout dans le système, d'une source auxiliaire type groupe électrogène pour constituer ainsi un système de production hybride analysé dans le paragraphe suivant.

Ce travail permet de conclure que la production décentralisée d'électricité par SRE et l'utilisation rationnelle de l'énergie sont des alliés indéniables.

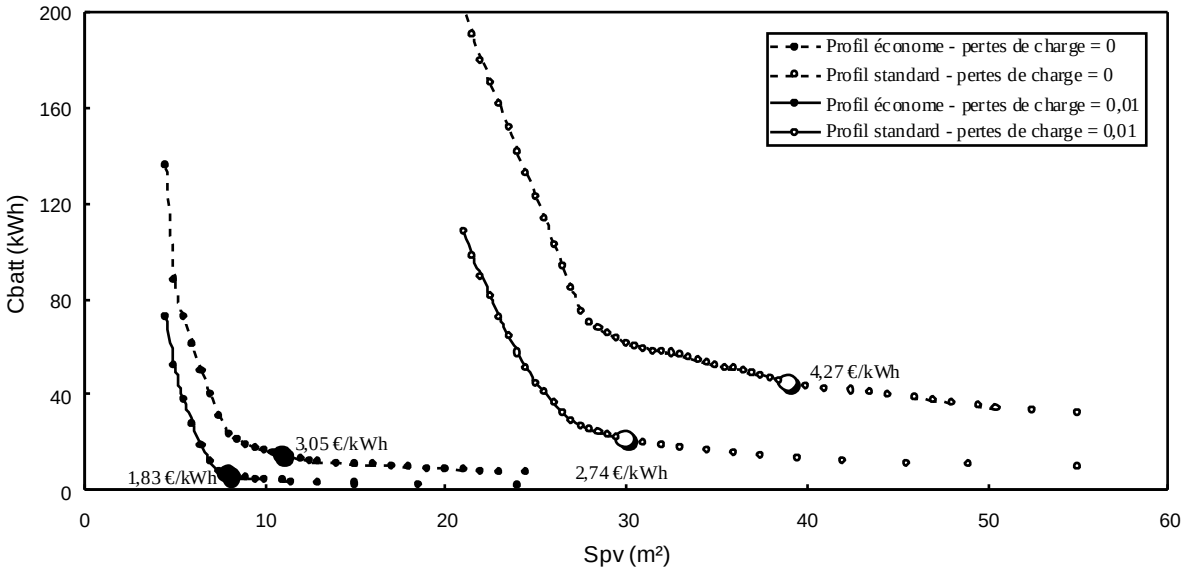


Figure II.19. Courbes de dimensionnement (S_{PV}, C_{batt}) en fonction de la demande en électricité et de la contrainte LOLP. Les marques de taille importante indiquent les configurations optimales.

Ainsi, la méthodologie développée jusqu'à présent a été étendue et adaptée à l'électrification de sites isolés par l'utilisation d'un système mono-source éolien de petite puissance (Notton *et al.*, 2001a).

Parallèlement aux cellules photovoltaïques dont la caractéristiques I-V détermine, pour un flux donné, la puissance de sortie de la cellule par des modèles linéaires ou électriques, la courbes de puissance d'une éolienne est propre à chaque machine.

Il est bien connu que la puissance du vent varie selon V^3 mais la puissance en sortie d'une machine n'obéit pas précisément à cette règle. Le modèle le plus simple pour simuler une courbe de puissance d'une éolienne est construit sur 4 paramètres : V_c, V_r, V_f (m s^{-1}) et $P_r^{'}$ (W) respectivement la vitesse de démarrage, la vitesse à puissance nominale, la vitesse de coupure et la puissance nominale en sortie. Afin de s'affranchir de $P_r^{'}$, nous avons construit des modèles de courbes de puissance définis par rapport à une puissance normalisée P_n telle que :

$$P_n = P / P_r^{'} \qquad \text{II.(27)}$$

La littérature présente plusieurs descriptions de la courbe de puissance d'une éolienne : modèle linéaire (Powell, 1981) ou polynomial (Justus, 1978 ; Palabazzer, 1995). Nous

retiendrons un modèle globalement linéaire pour la courbe de puissance excepté entre V_c et V_r où le modèle de Palabazzer (1995) a obtenu les meilleurs résultats (Olsen et McKenna, 1996).

La construction systématique de courbes de puissance P_n de différents constructeurs du marché pour des puissances $P_r^{'} < 10$ kW a conduit à considérer 2 types de courbes pour le modèle de puissance de la machine (Figure II.20) et à les comparer au modèle linéaire le plus couramment utilisé dans la littérature (Powell, 1981) :

- Type 1 : construit sur la combinaison des modèles de Palabazzer (1995) et Olsen et McKenna (1996). Il demande la connaissance de V_c et V_r.
- Type 2 : construit à partir d'une régression polynomiale d'ordre 4 de la courbe de puissance d'une éolienne du marché.

La vitesse du vent est corrigée à hauteur du moyeu par la régression usuelle :

$$V = V_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\alpha_r} \qquad \text{II.(28)}$$

où α_r représente la rugosité du lieu, prise égale à 0,2 pour nos travaux.

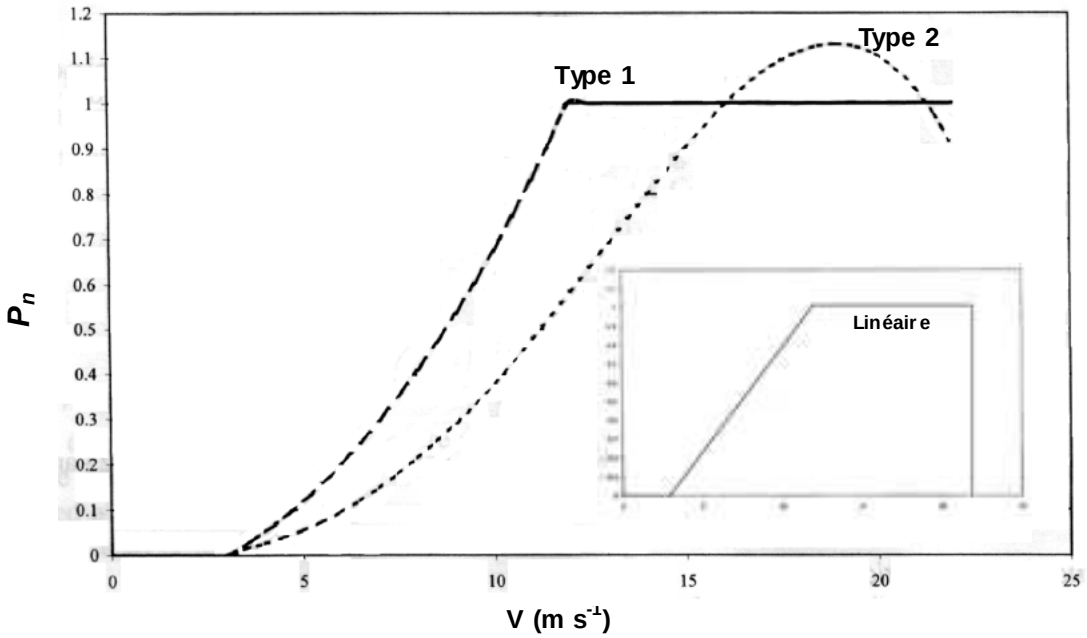


Figure II.20. Deux types de courbes de puissances normalisées P_n en fonction de V. A titre indicatif, le modèle linéaire couramment utilisé dans la littérature est présenté en incrustation.

La méthode de dimensionnement utilisée est l'extension de celle développée lors de précédents travaux (Notton *et al.*, 1996b ; Muselli, 1997) basée sur les équations de conservation de l'énergie au sein du système étudié décrit par la Figure II.21 (Notton *et al.*, 2001a). La détermination des couples (P_n, C_{batt}), répondant à une probabilité de perte de charge donnée LOLP, conduira aux courbes de dimensionnement telles que définies pour les systèmes PV à la Figure II.19. Les hypothèses de fonctionnement de chaque sous-système sont les suivantes : un rendement global charge/décharge de la batterie constant égal à 72%, une profondeur de décharge DOD de 30%, un courant de charge qui ne peut excéder 1/5 de la capacité de stockage, LOLP = 0 (autonomie) ou 0,01 (pour des applications typiques d'électrification rurales décentralisées) ou 0,1 (éclairage).

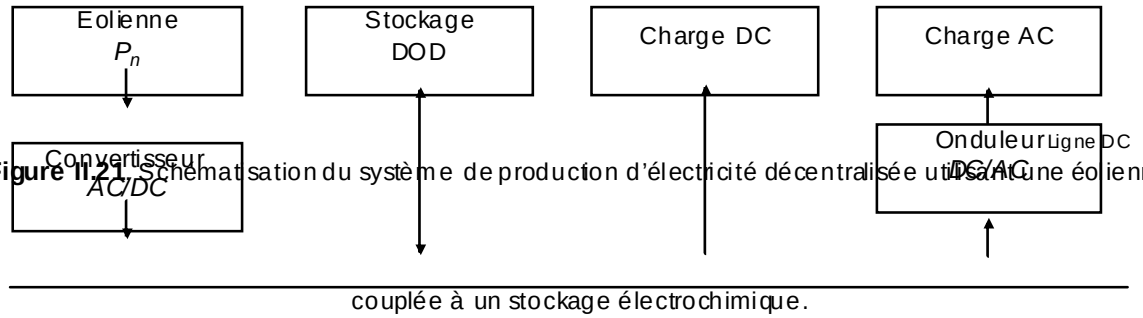


Figure II.21. Schématisation du système de production d'électricité décentralisée utilisant une éolienne couplée à un stockage électrochimique.

Les données de vent en entrée du modèle sont issues de la station agronomique de l'INRA sur la côte Est de la Corse : 20 ans de données horaires (1980-1999) dont $\overline{V_{10}} = 4{,}39 \pm 2{,}30$ m s^{-1}. La charge à alimenter est le profil « basse consommation » décrit par la Figure II.18a. Comme

attendu, la modélisation numérique conduit a une infinité de couples ($P_r^{'}$, C_{batt}) répondant à la contrainte de LOLP fixée (Figure II.22).

La première étape est la réduction de ce nombre de couples par la limitation du courant de charge de la batterie ; l'optimisation économique sera la seconde étape permettant d'isoler la configuration optimale de fonctionnement.

La Figure II.22 (courbes de dimensionnement) et le Tableau II.4 (optimisation économique) montrent l'importance du choix du modèle de P_n sur la courbe de dimensionnement. Pour une même LOLP, des variations de 7 à 15% sur $P_r^{'}$ et de 11 à 16% sur C_{batt} sont observées. La littérature utilisant par défaut exclusivement un profil linéaire sur P_n peut générer des différences allant jusqu'à 52% sur $P_r^{'}$ et 32% sur C_{batt}.

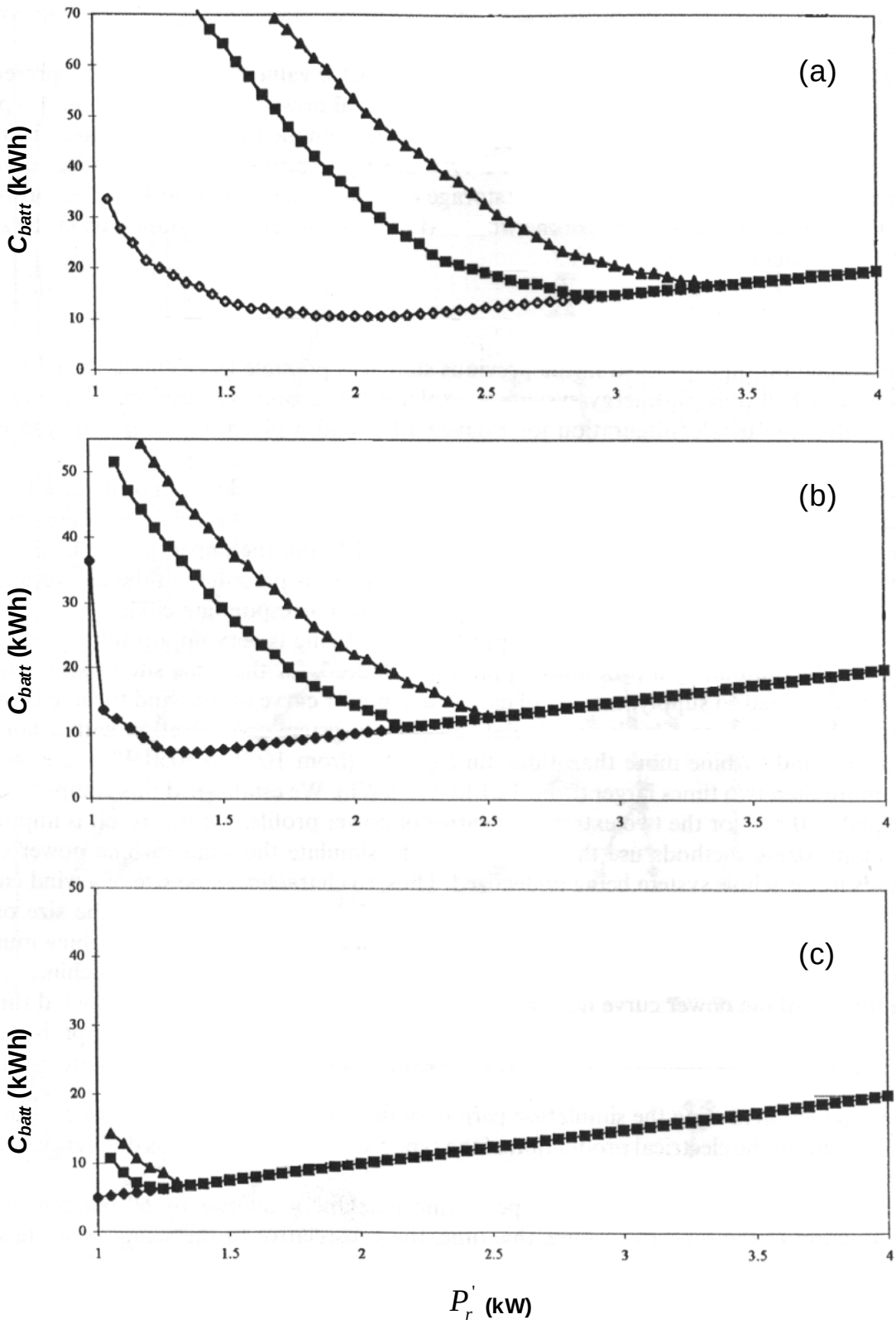

(a)
(b)
(c)
C_{batt} (kWh)
$P_r^{'}$ (kW)

Figure II.22. Influence du profil de puissance de l'éolienne sur la courbe de dimensionnement ($P_r^{'}$, C_{batt}) pour différentes valeurs de LOLP (a) : LOLP = 0 ; (b) LOLP = 0,01 ; (c) LOLP = 0,1. (modélisation courbes de puissance de l'éolienne : ◆ : type linéaire ; ■ : type 1, ▲ : type 2)

	LOLP = 0		LOLP = 0,01		LOLP = 0,1	
	Type 1	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**	**Type 1**	**Type 2**
$P_r^{'}$ **(W)**	2800	3300	2100	2500	1300	1400
C_{batt} **(kWh)**	15,0	17,9	11,4	12,8	6,0	7,1

Tableau II.4. Influence du profil de la courbe de puissance normalisée P_n et du LOLP sur le dimensionnement optimal du système.

Le choix de la courbe de puissance de la turbine éolienne est capital sur le dimensionnement du système. Nous avons montré que ce choix avait des répercutions, non seulement sur le dimensionnement comme nous venons de le voir mais aussi (Notton *et al.*, 2001a) :

- sur la part d'énergie excédentaire produite et non utilisée par le système ramenée à l'énergie totale produite : + 11% entre LOLP = 0,1 et LOLP = 0 pour les Types 1 & 2 et jusqu'à + 35% avec le profil linéaire. Cette part d'énergie excédentaire pourra être corrigée par l'utilisation d'une source auxiliaire au sein d'un système hybride ;
- sur le coût du kWh produit par le système : entre 3 et 11% entre Type 1 et Type 2 pour LOLP $\in$ [0 ; 0,1] et jusqu'à + 28% par comparaison à un profil linéaire de P_n.

Cette étude a permis de dimensionner des systèmes éoliens de petites puissances pour l'électrification rurale décentralisée de sites isolés. L'utilisation d'une méthode de dimensionnement a montré :

- la caractérisation optimale de la taille des sous-systèmes éoliens dans des conditions de non raccordement au réseau de distribution ; ainsi, la courbe de puissance de l'éolienne a une importance capitale dans le dimensionnement car elle affecte la répartition énergétique entre l'intrant et la demande ;
- que le dimensionnement de l'éolienne pour LOLP = 0,01 induit une forte diminution de la taille des sous-systèmes et du kWh produit par comparaison à LOLP = 0 ;
- lorsque LOLP = 0, l'observation d'une part très importante d'énergie excédentaire par rapport à la production de la machine, énergie dissipée par effet Joule ; cette énergie baisse fortement lorsque LOLP augmente d'où la nécessité de coupler à la source de production éolienne, une source auxiliaire type groupe électrogène pour la modélisation numérique de systèmes hybrides à source(s) renouvelable(s) d'énergie.

14.3 Systèmes hybrides en alimentation de sites isolés

Le choix d'une production d'électricité par une unique source type « groupe électrogène » a été considéré depuis longtemps comme une alternative économique et robuste. Malheureusement, cette solution n'est pas profitable en tout point du globe compte tenu, en particulier, de l'isolement de certains sites à alimenter entraînant des coûts de maintenance et d'opération élevés, une dépendance de l'utilisation vis à vis de l'approvisionnement en carburant, une durée de vie des groupes courte (quelques milliers d'heures) mais aussi des nuisances sonores et la production d'huile à recycler.

Par contre, le couplage de cette source auxiliaire avec un système de production d'électricité utilisant une ou plusieurs sources renouvelables d'énergie (système hybride) conduit à des performances intéressantes :

- le système ENR réduit la consommation de carburant du groupe ;
- la présence d'un stockage d'énergie réduit la puissance nominale du groupe ;
- la présence du groupe réduit les tailles de chaque sous-système (champ PV, éolienne, batteries) ;
- la fiabilité du système hybride augmente notablement.

Il est nécessaire alors de définir des modélisations numériques capables de dimensionner correctement les différents sous-systèmes, de gérer les flux d'énergie et d'effectuer une optimisation économique conduisant à la configuration optimale pour une charge à alimenter donnée.

Un système hybride (PV et/ou éolien) sera construit sur le modèle précédent de la Figure II.21 en y ajoutant en sortie de la ligne DC un onduleur vers un groupe électrogène qui peut servir à recharger les batteries et alimenter simultanément la charge. Les différents travaux menés sur les systèmes photovoltaïques (Muselli *et al.*, 1998c ; Muselli *et al.*, 1999 ; Muselli *et al.*, 2000b ;

Notton *et al.*, 2000) ont permis d'élaborer de nouvelles méthodes de dimensionnement de systèmes éoliens hybrides en sites isolés (Notton *et al.*, 2001b).

La méthode de dimensionnement basée sur les équations de conservation de l'énergie est étendue en y ajoutant les principales hypothèses suivantes :

- système hybride autonome (LOLP = 0) ;
- la puissance nominale du groupe électrogène est calculée à partir de la capacité nominale des batteries C_{batt} et du rendement de conversion du convertisseur DC/AC en amont de celui-ci :

$$P_G = (C_{batt} / 5) / \eta_{DC/AC} \qquad \text{II.(29)}$$

- le profil de la charge a été décrit précédemment sur la Figure II.18b ;
- le module gestionnaire de l'énergie au sein du système est considéré comme idéal : il contrôle à chaque instant (1 h) l'état de charge de la batterie (SOC) et active ou désactive le groupe lorsque cela est nécessaire. Ainsi, lorsque SOC atteint la DOD = 30% de C_{batt}, le moteur est démarré jusqu'à ce que SOC = C_{batt}.
- nous simulons le fonctionnement du système hybride pour plusieurs puissances d'éoliennes (1, 4 et 7 kW) et des paramètres de comparaison sont calculés (tels que le nombre de démarrage et le temps de fonctionnement du groupe, la consommation de carburant, l'énergie excédentaire, les énergies produites par le sous-système renouvelable et le groupe etc.).

La capacité de stockage C_{batt} (kWh) peut être adimensionnée (jours d'autonomie) en la divisant par la charge moyenne journalière du profil. Il en est de même pour l'énergie excédentaire E_{WAS} et l'énergie produite par le groupe E_{AUX} qui peuvent être adimensionnées en les divisant par l'énergie éolienne produite E_{WT}.

La Figure II.23 illustre les évolutions de ces flux d'énergie en fonction de la capacité de stockage pour 3 puissances d'éoliennes dont les courbes de puissance sont décrites par 2 types de profils (Figure II.20).

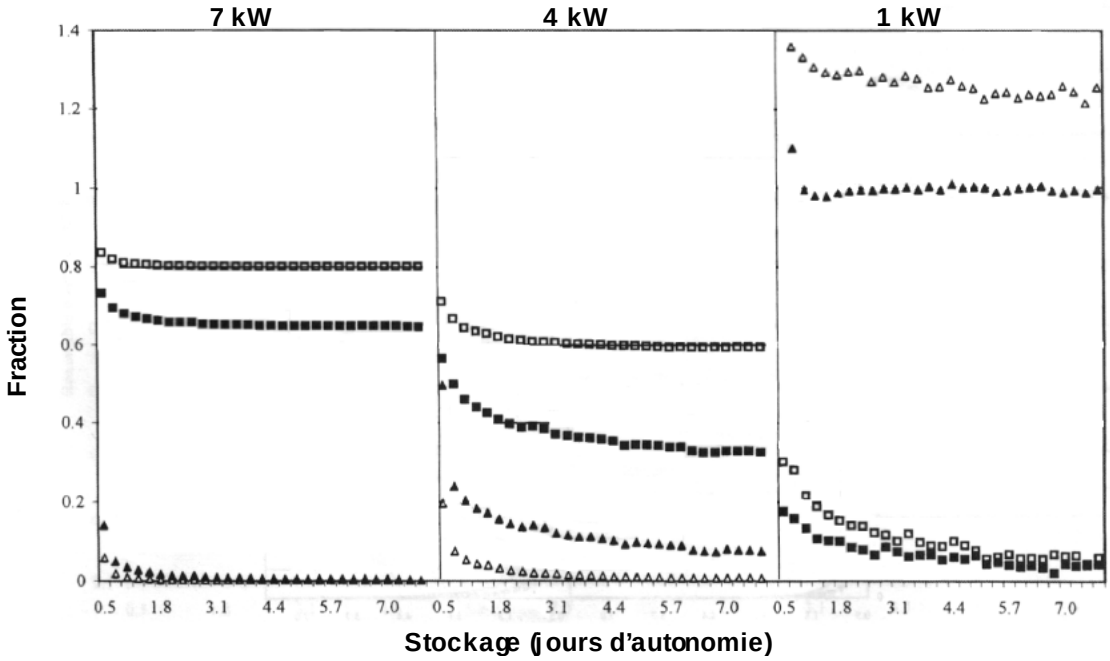


Figure II.23. Evolutions de E_{WAS}/E_{WT} (□ : Type 1, ■ : Type 2) et E_{AUX}/E_{WT} (△ : Type 1, ▲ : Type 2) en fonction de la capacité de stockage en jours d'autonomie pour 3 puissances d'éoliennes (1, 4 et 7 kW) dont les courbes de puissance dépendent des profils Type 1 ou Type 2.

Nous observons que le cas de l'éolienne de 1 kW n'est pas envisageable pour notre application car le groupe produit plus d'énergie que le système ENR ($E_{AUX} > E_{WT}$). De 1 à 7 kW, ce rapport diminue de manière sensible puisque pour une éolienne de 7 kW, E_{AUX} ne représente plus que quelques % de E_{WT} (< 10%). De plus, sur la même gamme de puissance, la part d'énergie excédentaire E_{WAS} augmente fortement (+70 % en moyenne) ce qui impose une étude précise de la puissance de l'éolienne à installer.

Lorsqu'on regarde d'autres critères de comparaison propres au groupe électrogène (nombre de démarrage, consommation de carburant etc.), le paramètre discriminant est le temps de fonctionnement. En effet, l'augmentation de puissance de l'éolienne diminue le nombre de démarrage du groupe mais l'impact est plus important sur le temps de fonctionnement : celui-ci peut varier, pour des capacités de batteries de 2 ou 3 jours d'autonomie, de 25 à 150 h / an selon les éoliennes alors que pour des capacités de stockage inférieures à 1 jour d'autonomie, ce temps peut atteindre 3500 h/an ce qui n'est pas concevable économiquement puisque la durée de vie des groupes actuels peut atteindre classiquement entre 3000 et 5000 h.

La fraction renouvelable f_{ENR} définie par l'Eq. II.30 permet de connaître la part de production du système par comparaison à la source auxiliaire. Elle est souvent couplée à l'étude de la production brute de l'éolienne E_{WT} par rapport aux besoins de la charge et matérialisée par le paramètre PRG.

$$f_{ENR} = \frac{E_{WT} - E_{WAS}}{E_{WT} - E_{WAS} + E_{AUX}} \qquad \text{II.(30)}$$

La Figure II.24 illustre l'évolution de ces 2 paramètres f_{ENR} et PRG en fonction de la capacité de stockage pour différentes puissances de l'éolienne. Il est intéressant de noter qu'il n'est pas envisageable d'utiliser des capacités de stockage supérieures à 2 voire 3 jours

d'autonomie car celles-ci induisent peu de variation sur f_{ENR} et par contre, augmentent fortement les coûts du kWh produit.

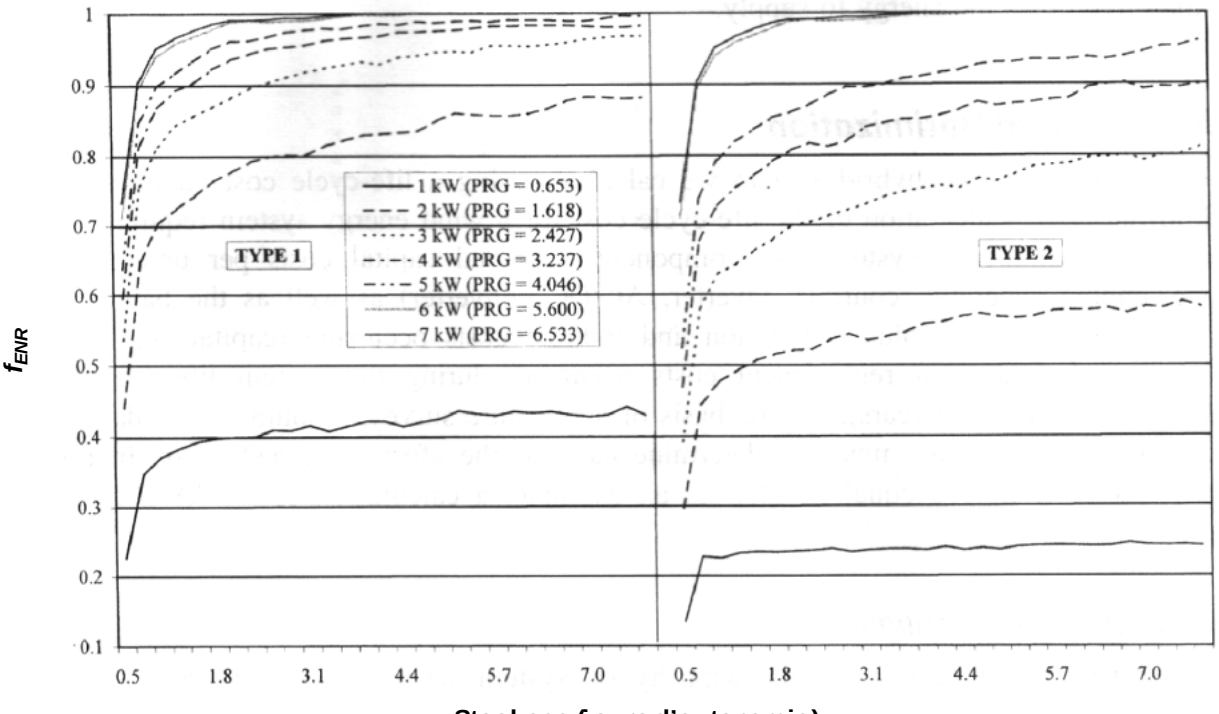


Figure II.24. Fraction renouvelable f_{ENR} en fonction de la capacité de stockage pour plusieurs puissances d'éoliennes selon les 2 modélisations de courbes de puissance (Types 1 & 2).

Seule l'optimisation économique permet de dégager pour cette charge à alimenter, la configuration optimale de fonctionnement. Pour cela, nous avons élaboré un calcul économique prenant en compte les différentes variables discriminantes entrant dans le calcul du coût du kWh produit par ce système (Notton *et al.*, 2001b) :

- *investissement* : éolienne, groupe électrogène, onduleur convertisseur, batteries, carburant en fonction du temps de fonctionnement ;
- *remplacement* : durée de vie des batteries, des groupes ;
- *maintenance* : sur groupe électrogène, éolienne ;
- *Economie* : durée de vie du système, taux d'actualisation.

Il est ainsi possible de tracer les courbes de dimensionnement obtenues pour chaque éolienne, et pour chaque capacité de batterie et d'en déterminer la configuration conduisant au coût du kWh produit le plus faible (Figure II.25, éolienne de 4 kW et Tableau II.5 pour l'ensemble des configurations).

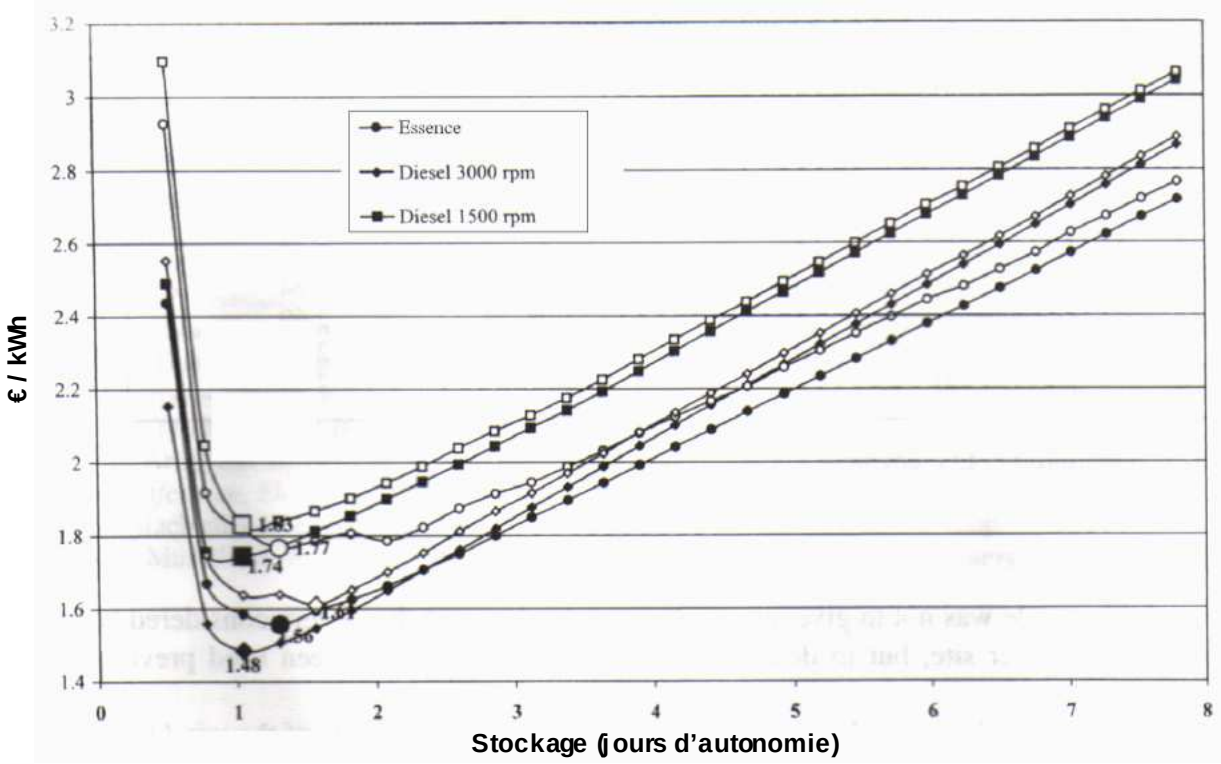


Figure II25. Exemple d'évolution du coût du kWh produit en fonction de la capacité de stockage pour une éolienne de 4 kW

(courbes de puissance des turbines : marques *noires* : Type 1 et marques *blanches* : Type 2).

		Configuration optimale de fonctionnement			
Type Eolienne	**Type de Groupe**	$P_r^{'}$ **(kW)**	***Stockage* (jours)**	P_G **(kW)**	**Coût du kWh (€ kWh^{-1})**
1	**Essence**	**3**	**1,56**	**2,02**	**1,52**
1	**Diesel 3000**	**2**	**1,56**	**2,02**	**1,36**
1	**Diesel 1500**	**2**	**1,04**	**1,34**	**1,59**
2	**Essence**	**3**	**2,08**	**2,69**	**1,75**
2	**Diesel 3000**	**2**	**1,56**	**2,02**	**1,53**
2	**Diesel 1500**	**2**	**1,82**	**2,35**	**1,74**

Tableau II.5. Configurations obtenues par optimisations physique et économique des systèmes hybrides pour l'alimentation d'un site isolé.

Les coûts de production du kWh par ces systèmes sont élevés en moyenne de 1,5 € kWh^{-1} mais dans certains cas, lorsque la charge à alimenter est située loin d'une ligne de distribution électrique, ces coûts restent compétitifs vis à vis de l'extension d'un réseau de distribution traditionnel. Nous disposons alors d'une méthodologie globale d'optimisation de systèmes hybrides utilisant une source renouvelable couplée à une source conventionnelle pour la production d'électricité en sites isolés. Nous ne présentons ici que des résultats qualitatifs dans la mesure où la méthode se veut universelle mais les intrants (données météorologiques) et les charges à alimenter vont nécessairement différer entre les sites.

14.4 Systèmes hybrides énergies renouvelables - hydrogène

Le couplage entre ces systèmes de production d'électricité utilisant des sources renouvelables d'énergie et une chaîne de conversion hydrogène est une solution innovante au problème du stockage de l'électricité produite.

Le remplacement partiel ou total d'un stockage classique composé d'un parc de batteries par une chaîne de conversion hydrogène doit être une solution d'avenir pour l'alimentation en électricité des sites isolés.

Ces systèmes hybrides comprennent en plus du (ou des) générateur(s) ENR, un électrolyseur pour la production de H_2 et d'O_2 lorsque le(s) système(s) de production fournit(ssent) plus d'énergie que nécessaire à la charge. Ces gaz sont en général comprimés pour en diminuer leur volume et stockés dans des réservoirs. A l'inverse, une pile à combustible consomme ces gaz afin de fournir le complément d'énergie lorsque la demande excède la capacité de production du (ou des) générateur(s) renouvelable(s).

En avril 2007, dans le cadre de l'appel à projets PAN-H, l'équipe « Energies Renouvelables » a déposé en tant partenaire un projet de recherches à l'ANR (36 mois) dont l'acronyme PEPITE (ANR-07-PANH-0) signifie « **P**rojet d'**E**tudes et d'expérimentation de **P**uissance pour la gestion des énergies **I**ntermittentes par les **T**echnologies **E**lectrochimiques ».

Afin de développer ces solutions dans le futur, il est nécessaire de constituer un ensemble de références architecturales correspondant aux applications cibles pour les systèmes hybrides EnR-H_2 (amélioration des rendements de la chaîne de conversion électrique, de la chaîne H_2, des processus de contrôle-commande). Un outil de dimensionnement des systèmes EnR-H_2 sera développé dans le cadre de PEPITE en y intégrant des critères d'optimisations physiques et/ou économiques (coût du kWh ou efficacité du système). A partir de ces travaux génériques, une expérimentation de terrain sera réalisée par l'électrification d'un pylône météorologique afin de valider la méthodologie globale de dimensionnement et les aspects techniques des sous-systèmes précités. La puissance de cette expérimentation (25 – 30 kW) est représentative des marchés ciblés.

Les retombées scientifiques, économiques sont nombreuses :

- une bibliothèque de références architecturales « électrique et procédé » adaptée à plusieurs applications, intégrant notamment des composants innovants sur le plan international (piles anaérobies et électrolyse PEM haute pression) ;
- un outil de dimensionnement, développé particulièrement pour les solutions hybrides EnR-H_2 ;
- la possibilité d'études architecturales variées (système pile à combustible PAC H_2/air et H_2/O_2) permettant d'optimiser les chaînes de rendement entre les différents composants ;
- la réalisation d'un système hybride avec PAC PEM (30 kW) et d'un électrolyseur PEM HP de 10 kW constituant des références internationales.

Les partenaires incluant industriels privés et organismes publics sont au nombre de 6 :

- *Société HELION* (Aix-en-Provence) : conception électrolyseur/PAC ;
- *U. de Corse-UMR SPE 6134* : Systèmes Physiques de l'Environnement (Ajaccio) : dimensionnement de systèmes EnR/H_2 ;
- *CEA LITEN* : Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les Nanomatériaux (Grenoble) : stockage de l'énergie ;
- *INPT* : Institut National Polytechnique de Toulouse, LAPLACE : Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie : Electrotechnique, électronique, conversion d'énergie ;
- *ARMINES* Ecole des Mines de Paris (Sophia Antipolis) : étude des PAC ;
- *ALPHEA Hydrogène* (Forbach) : pôle de compétence sur l'hydrogène et ses applications.

Ce projet ANR a été déposé avec l'ambition de prendre en commun un Doctorant identifié ayant pour formation le Master SEER « Systèmes Energétiques et Energies Renouvelables » de l'Université de Corse et dont la bourse de Doctorat serait cofinancée sous contrat CIFRE par l'industriel privé (HELION) dès le mois de Septembre 2007.

En préambule à ce travail, notre équipe de recherches a cherché à faire évoluer les codes de dimensionnement de systèmes hybrides EnR pour des couplages hybrides EnR-H_2. Ces travaux ont donné lieu à diverses publications et communications dont nous détaillons ici les concepts d'élaboration et les premiers résultats (Poggi *et al.*, 2006a ; Poggi *et al.*, 2007).

L'objectif est d'estimer comment un système hybride composé d'un champ PV, un électrolyseur et une pile à combustible (PAC), peut alimenter une charge représentant une habitation moyenne dont le profil est décrit à la Figure II.18b. Les schématisations des chaînes de conversion électrique et H_2 sont représentées sur la Figure II.26. Nous avons volontairement omis un stockage par batterie pour considérer à terme un stockage purement H_2. En fait cette solution n'est économiquement pas la meilleure puisque une batterie « tampon » de faible capacité couplée à une chaîne H_2 serait sans doute économiquement la configuration la plus viable compte tenu du coût de la chaîne de conversion H_2 et de son rendement global (environ 50%).

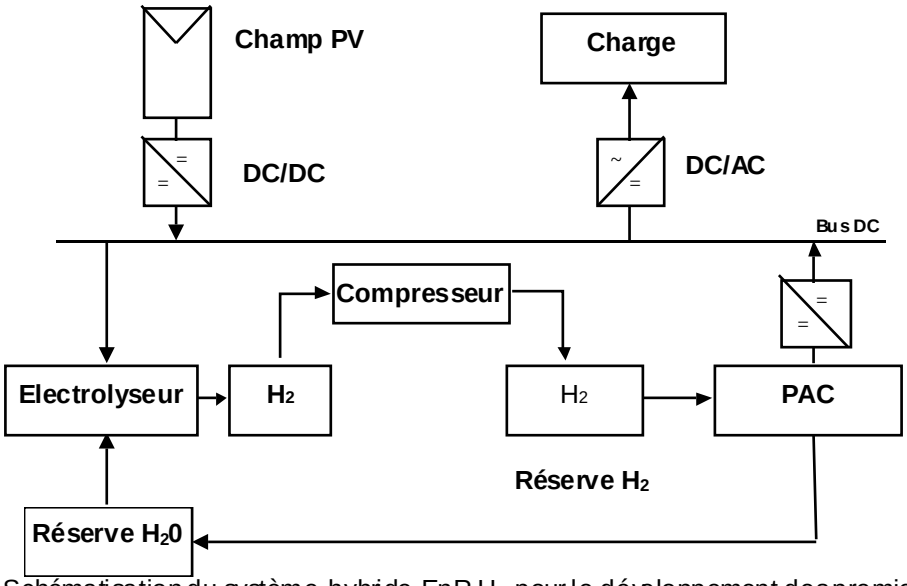


Figure II.26. Schématisation du système hybride EnR-H_2 pour le développement des premiers codes de dimensionnement

La modélisation des sous-systèmes a été construite sur les bases des travaux précédents pour les systèmes PV (voir sections II.3.1, 2 et 3). Les données météorologiques horaires de rayonnement (45°) proviennent de la station météorologique de Météo-France de l'aéroport de Campo del'Oro-Ajaccio (19 ans). Par la suite, nous décrirons la chaîne H_2 qui a été modélisée en décomposant ses constituants : électrolyseur, compresseur et PAC.

L'énergie produite par le système EnR et qui n'est pas consommée par la charge est utilisée en entrée d'un électrolyseur pour produire l'H_2. La décomposition de la molécule de H_2O nécessite de l'électricité dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de la réaction. Les systèmes EnR sont une alternative intéressante pour cette production électrique.

Le rendement de conversion électricité-H_2 est de l'ordre de 70 à 80% (Figure II.27) et répond à l'équation :

$$\rho_E(P) = \frac{2.U_{ref}}{b}\left[1+\left(1+4\frac{aP_E}{b^2}\right)^{0,5}\right]^{-1} \qquad \text{II.(31)}$$

où : U_{ref} = 1,482 V sachant que $U(I) = a\,I + b$ avec I_{max} = 0,35 A/cm²,

$P_E = U.I$: puissance de l'électrolyseur par unité de surface (W/cm²),

a, b : paramètres de modélisation propres à chaque machine (a = 1,1533 ; b = 1,7781). Ces valeurs sont données pour un électrolyseur « classique » fonctionnant à 20°C.

La puissance nominale de l'électrolyseur est préconisée comme représentant 50 à 65% de la puissance crête du champ PV (Bello, 2005). Durant le fonctionnement du système, nous considérons que le contrôleur de commande du système hybride actionne l'électrolyseur en fonction des conditions en intrant (rayonnement) et de la charge. L'électrolyseur est considéré comme un système fonctionnant entre 2 seuils haut et bas. Il a besoin d'un minimum d'énergie pour démarrer, calculé sur la base de 20% de sa puissance nominale (Santarelli et Macagno, 2004 ; Agboussou *et al.*, 2004 ; Meurer *et al.*, 1999). Son seuil « haut » est déterminé à partir de

sa puissance maximale et de la consommation énergétique du compresseur indispensable au stockage du H_2 (cette dernière dépend des pressions en sortie de l'électrolyseur et dans le réservoir de H_2).

Quand l'énergie disponible pour l'électrolyseur est faible mais proche du seuil bas, la PAC peut apporter une quantité d'énergie en consommant du H_2. Ainsi, consommer une faible quantité de H_2, permet de démarrer l'électrolyseur pour une production d'énergie qui aurait été perdue sans l'aide de la PAC.

La pile à combustible (PAC) aura pour obligation de pallier les défaillances du système EnR dans l'approvisionnement de la charge. Pour l'étude séquentielle horaire sur 19 ans, la PAC a été modélisée comme fonctionnant entre 2 seuils bas et haut sur le même principe que l'électrolyseur (Wang et Nehrir, 2001 ; Santarelli et Macagno, 2004 ; Agboussou *et al.*, 2004 ; Meurer *et al.*, 1999). Son seuil « bas » a été fixé à 10% de sa puissance nominale et le seuil « haut » est égal à sa puissance maximale calculée comme un pourcentage de la puissance crête de la charge (110%). Le rendement de la PAC, autour de 55%, est calculé à partir du modèle (Figure II.27) :

$$\rho_{PAC}(P) = \frac{U}{U_{ref}} = \frac{b'}{2U_{ref}}\left(1+\left(1+4\frac{a'P_{PAC}}{b'^2}\right)^{0,5}\right) \qquad \text{II.(32)}$$

où : $U(I) = a\,I + b$,

U_{ref} : tension de référence = 1,482 V.

a', b' : coefficients fournisseurs intrinsèques à la PAC (a' = -0,2025 ; b' = 0,9595 avec I_{max} = 0,35 A/cm²) et $I = P_{PAC} / U$. Le modèle utilisé approché ne tient pas compte de la température et de la pression. Les valeurs des paramètres a' et b' sont données pour une PAC « classique » type PEMFC à 60°C sous 2 bars.

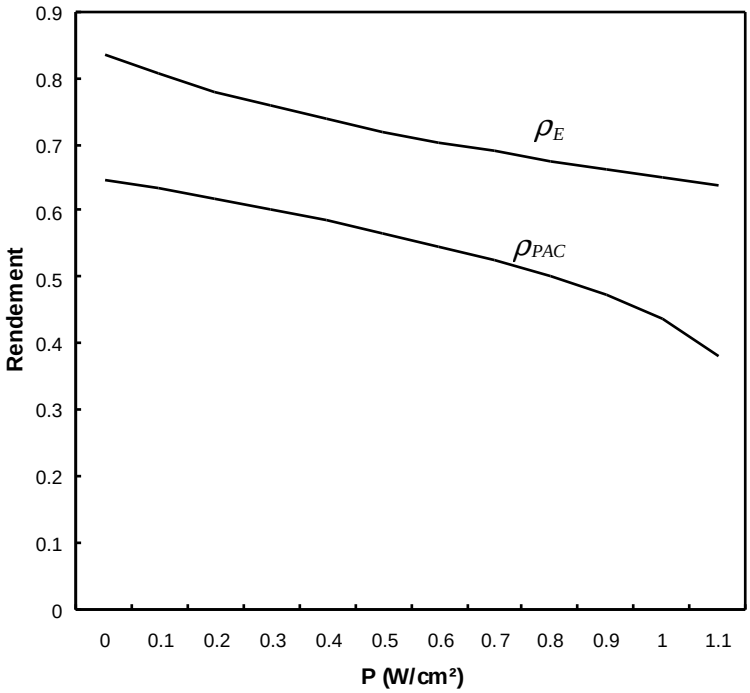


Figure II.27. Rendement de l'électrolyseur ρ_E et de la pile ρ_{PAC} en fonction de la puissance

Hormis l'électrolyseur, le compresseur et la PAC, le dernier organe de la chaîne est le réservoir de H_2. Son volume dépend à chaque itération du calcul de la différence entre sa production via l'électrolyseur et sa consommation par la PAC. En tenant compte des pertes de H_2 dans le circuit (typiquement 5%), le volume de gaz initial dans le réservoir est ajusté pour l'obtention de la contrainte LOLP = 0 et pour un nombre de jours minimal d'autonomie ajustable. Ce volume d'hydrogène est stocké en utilisant une compression adiabatique.

La simulation de ce système a été testée sur une configuration précise : P_{PV} = 1,5 kW ; nombre de jours d'autonomie : 5 ; puissance maximale de l'électrolyseur = 65% de la puissance maximale du champ PV ; pression en sortie d'électrolyseur : 1 bar ; pression haute de compression : 200 bars.

Ce qui conduit au dimensionnement suivant : puissance nominale de la PAC : 820 W et volume initial d'hydrogène : 370 L. Après une année de simulation, le volume final possède un bilan positif de + 20 L ; les volumes minimum et maximum d'H_2 pendant la simulation ont été de 76,9 L et 640 L pour un rendement global de 0,48.

Afin d'étudier les limites de fonctionnement du système sous contrainte d'autonomie, nous avons tracé l'équivalent d'une courbe de dimensionnement entre la puissance du champ PV et le volume stocké sous 200 bars (Figure II.28). Cette courbe délimite 3 zones distinctes de fonctionnement :

- Zone 1 : champ PV sous-dimensionné, les volumes d'hydrogène calculés ne sont pas envisageables techniquement dans le cas de notre application ;

- Zone 2 : système hybride sous-dimensionné ne répondant pas à LOLP = 0 et des défaillances du système dans l'approvisionnement de la charge sont observées ;

- Zone 3 : système hybride sur-dimensionné répondant à la contrainte d'autonomie. Ces configurations vont générer des quantités d'énergies perdues importantes et des coûts de production élevés.

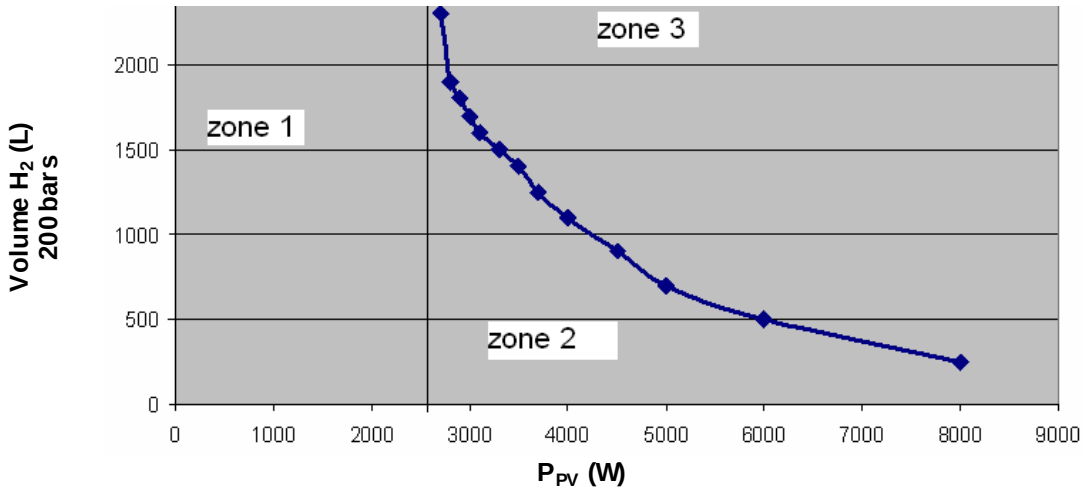


Figure II.28. Courbe de dimensionnement P_{PV}/V_{H2} – système hybride

Le bilan énergétique après la simulation sur les 19 ans (Figure II.29) permet de conclure que la configuration envisagée n'est pas viable actuellement compte tenu des performances de durée de vie des PAC. En effet, pour le système étudié, 87,6% de l'énergie produite par le système PV va à l'électrolyse ce qui génère des temps de fonctionnement du couple Electrolyseur/PAC très importants (≈ 5000 h/an) et non compatibles avec les durées de vie des technologies actuelles (quelques milliers d'heures). De plus, cette configuration génère 13,34% d'énergie perdue dissipée en chaleur. Le système est logiquement surdimensionné mais l'utilisation d'une batterie « tampon » au sein du système contribuerait à la diminution de la taille de plusieurs éléments le composant.

C'est l'objet de la prochaine étape, en particulier au sein du projet PEPITE où toutes les configurations de systèmes devront être testées et optimisées pour la production d'électricité décentralisée par l'utilisation du couplage EnR-H_2. En effet, la gamme logicielle actuelle offerte sur le marché pour le dimensionnement de systèmes hybrides EnR-H_2, est réduite et incomplète : quelques codes de calcul comme HYBRID2 ou HYDROGEMS permettent de simuler des systèmes mais non de les dimensionner. D'autres comme REDSCREEN ou HOMER permettent un dimensionnement mais uniquement pour la contrainte d'autonomie. PEPITE aura pour objectif de répondre à ce besoin et de déterminer des courbes de dimensionnement pour des contraintes de LOLP prédéfinies satisfaisantes pour la charge utilisée.

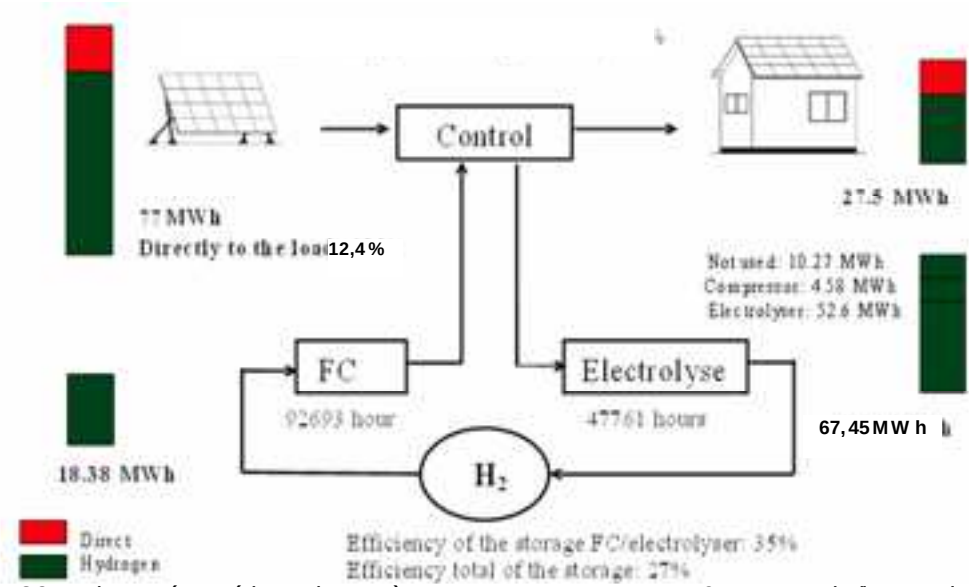


Figure II29. Balance énergétique du système « Test » EnR-H_2 sur 19 ans pour l'alimentation d'une charge en site isolé (1,5 kW PV ; 0,8 kW PAC).

II.4. Systèmes énergétiques à SRE en connexion au réseau électrique

II.4.1. Etude du couplage champ PV/Onduleur - Réseau de distribution

Les avantages du couplage d'un système PV/Onduleur au réseau de distribution électrique pour une habitation ne sont plus à démontrer : production décentralisée limitant les pertes énergétiques, énergies propres renouvelables, intégration au bâtiment, aucune pièce mécanique en mouvement et aucune maintenance pour des durées de vie de l'ordre de 25 ans.

Nous avons étudié ces systèmes connectés au réseau à la fois sur le plan théorique (Acquaviva *et al.*, 1998a ; Acquaviva *et al.*, 1998b) et sur le plan pratique par l'élaboration et l'exploitation d'une expérimentation sur le site du laboratoire d'Ajaccio (Poggi *et al.*, 2004 ; Poggi *et al.*, 2006b).

L'étude théorique a permis d'analyser les performances d'un système PV de puissance crête variable (surface de 5 à 25 m²) en connexion au réseau de distribution d'électricité de la Corse pour une habitation (Acquaviva *et al.*, 1998a ; Acquaviva *et al.*, 1998b). Le rapport de puissance crête entre le champ P_{pv} et l'onduleur $P_{nom\text{-}ond}$ est pris égal à 80% (optimisation physique) selon Peippo et Lund (1994). L'habitation utilise une part (voire la totalité) de l'énergie produite par le champ PV et le complément est transféré au réseau. A l'inverse, le réseau se

comporte comme un stockage d'énergie lorsque le champ PV n'est pas à même d'assurer la charge de l'habitation. Cette charge est obtenue par le système DIACE de l'ADEME qui fournit des profils journaliers de consommation pour chaque mois de l'habitation sous test. Les principaux résultats obtenus ont montré, dans un premier temps, que le système EnR est capable de réduire les pics de charge au cours de la journée. Il contribue à diminuer substantiellement l'énergie à fournir par le réseau pour assurer la charge à tout instant. La Figure II.30 illustre ce résultat à la fois sur 2 journées hivernales (a) et sur tous les mois de l'année (b) où le système PV se comporte comme un système complémentaire au réseau dans l'approvisionnement de la charge. On remarque que pour des puissances supérieures à 1,5 kW (S_{PV} > 15 m²), la contribution du réseau est beaucoup moins influencée par la taille du champ PV.

Pour cette puissance de 1,5 kW qui apparaît alors comme un optimum physique, le bilan énergétique mensuel de la charge (Figure II.30c) montre que celle-ci peut recevoir une part d'énergie du champ comprise entre 29% (Décembre) et 52% (Mai-Juin), ce qui confirme l'intérêt de la technologie sur le plan théorique. Sur la durée de vie du système (25 ans), une étude économique basée sur un calcul comparatif de l'énergie cédée sur le réseau (non utilisée par la charge) et de l'énergie consommée « économisée » par l'habitation a montré que le couple P_{pv} = 2,5 kW / $P_{nom\text{-}ond}$ = 2 kW correspondait à un optimum pour la charge considérée.

Cette étude théorique s'est poursuivie, à partir de Janvier 2001, par l'installation en Corse du premier système raccordé au réseau de distribution entièrement instrumenté. Connecté au laboratoire de l'Université de Corse à Ajaccio (Figure II.31), il représente une puissance P_{pv} = 850 Wc (S = 5,625 m²), composée de 10 modules en série BP Solar 585F, couplé à un onduleur SMA Sunny Boy 700 de puissance nominale $P_{nom\text{-}ond}$ = 700 W équipé d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker). Ce système est piloté et contrôlé par des stations d'acquisitions permettant d'enregistrer au pas de temps de la minute, les données météorologiques (irradiations J_β, températures ambiante et au dos des modules) ainsi que les paramètres propres au fonctionnement de l'onduleur (tension, courant, P_{AC}, fréquence, impédance, rendements, défauts etc.).

Un analyseur de courbes I-V de type PV-KLA 4.3 (marque Mencke & Tegtmeyer) a permis de valider les modèles de caractérisation en courant-tension d'un module et/ou du champ complet. Ainsi, le modèle simple-diode « classique », non décrit dans ce mémoire, a permis d'une part, de vérifier l'adéquation des caractéristiques I-V mesurées avec celles du constructeur et d'autre part, d'étudier les dépendances du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert vis à vis du flux incident (Poggi *et al.*, 2004).

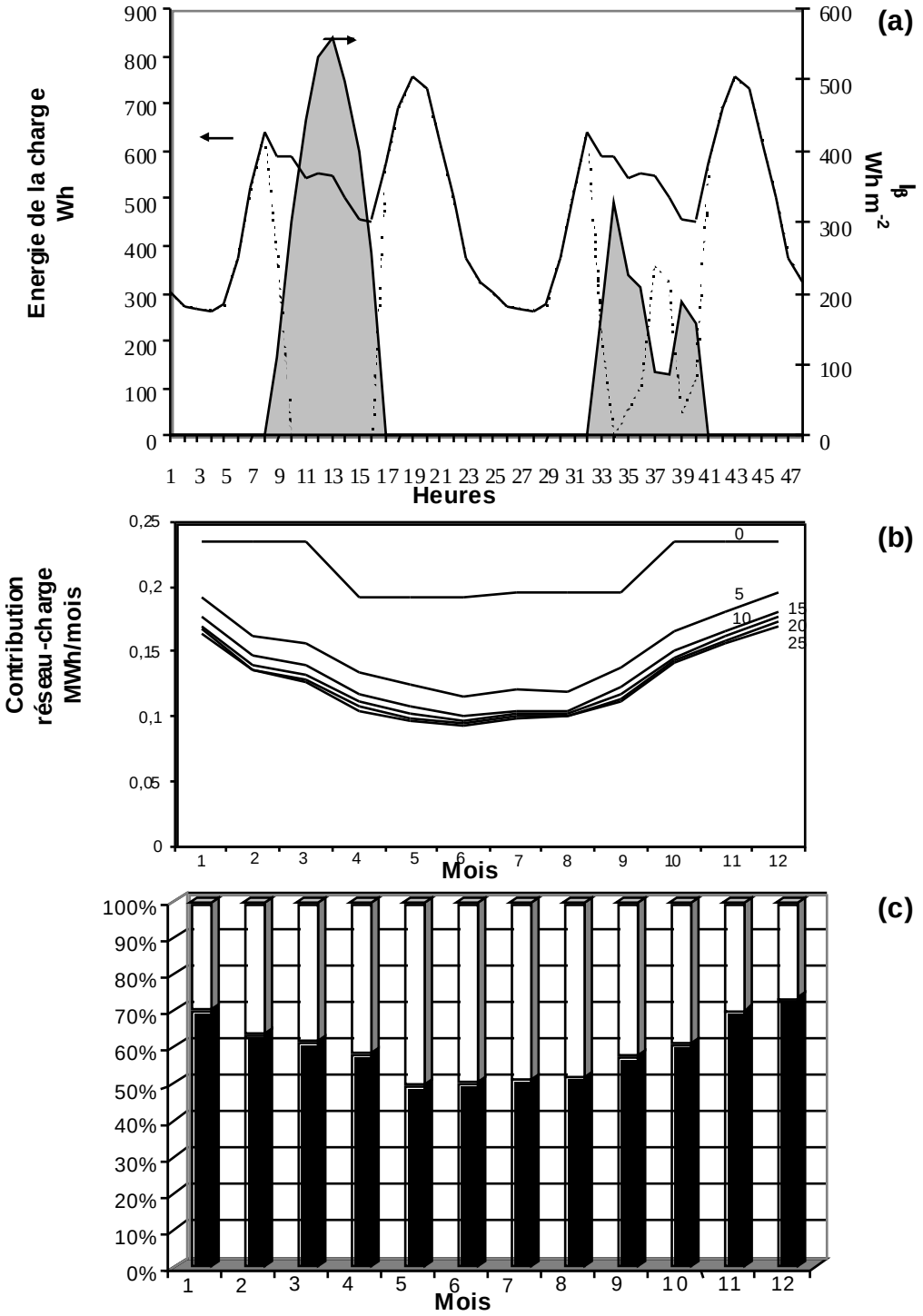


Figure II.30. (a) : Réduction de la charge par la connexion d'un champ PV de surface 15 m² sur un réseau pour 2 journées consécutives hivernales (surface grisée : I_β, ligne continue : charge sans PV, ligne pointillée : réduction de la charge par apport d'énergie renouvelable). (b) : Influence mensuelle de la puissance P_{pv} (proportionnelle à la surface du champ de 0 m² à 25 m²) sur la réduction de la charge à alimenter par le réseau. (c) : Contribution mensuelle dans l'alimentation en énergie de la charge : □ système EnR (champ PV de 15 m²) et ■ réseau de distribution électrique.

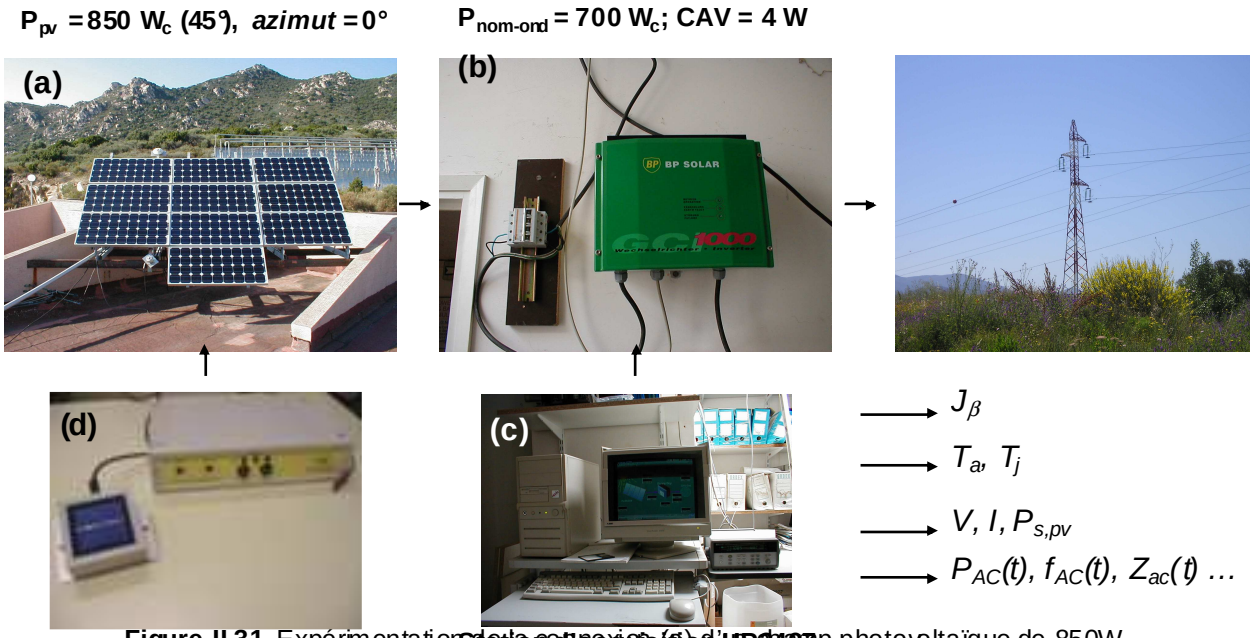


Figure II.31. Expérimentation de la connexion (a) d'un champ photovoltaïque de 850W (45°, azimut = 0) couplé à (b) un onduleur de 700 W (CAV = consommation à vide) sur le réseau de distribution insulaire. (c) : Système de contrôle – commande et d'acquisition au pas de temps de la minute, (d) : Analyseur de courbe (I,V), PV-KLA (Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer)
photos : M.MUSELLI

L'onduleur devient actif (fourniture au réseau) dès lors que $J_{45} > 70$ W m^{-2}. Le rendement de l'onduleur, défini par l'équation suivante, est compris entre 92 et 96% :

$$\eta_{ond} = \frac{\eta}{\eta + \eta_0 + k\,\eta^2} \qquad \text{II.(33)}$$

où : $\eta = P_{AC} / P_{nom\text{-}ond}$,

η_0 est un paramètre intrinsèque à l'onduleur caractérisant les pertes à vide,

k est une constante liée aux pertes résistives de l'onduleur.

Sa courbe de rendement a été modélisée de manière à connaître le rendement quelque soit le flux incident (Poggi *et al.*, 2004) et les valeurs de η_0 et k déterminées à partir de ce graphe.

Cette expérimentation, toujours en fonctionnement en 2007, avait 2 objectifs principaux :

- étudier le couplage en puissance entre le champ PV et l'onduleur pour déterminer une configuration énergétique optimale de fonctionnement (paramètre capital dans la conception de ces systèmes au même titre que le choix de la tension continue),
- étudier les performances de ce champ en connexion au réseau de distribution par la caractérisation des paramètres classiques d'efficacité de ces systèmes.

Pour l'étude du couplage, nous avons fait comme hypothèse qu'en mode opératoire, une partie des pertes dans l'onduleur est indépendante de la puissance de sortie. On définit la puissance limite comme ($\eta_0 .P_{nom\text{-}ond}$) et l'on considérera que l'onduleur étudié est un onduleur "limitant", c'est-à-dire que la puissance de sortie ne peut être supérieure à sa puissance nominale.
Sur l'ensemble des données disponibles en 2004 (soit environ 4 ans), nous avons calculé la production du champ photovoltaïque $P_{s,PV}$ ainsi que la puissance de sortie de l'onduleur $P_{AC} = \eta_{ond}.P_{nom\text{-}ond}$ en considérant :

$$\eta_{ond} = 0 \qquad \text{si } \frac{P_{s,PV}}{P_{nom\text{-}ond}} \leq \eta_0 \qquad \text{II.(34)}$$

$$k\eta_{ond}^2 + \eta_{ond} + \left(\eta_0 \ \frac{P_{s,PV}}{P_{nom\text{-}ond}}\right) = 0 \qquad \text{si } \eta_0 < \eta_{ond} < 1 \qquad \text{II.(35)}$$

La résolution de cette équation du second degré permet de déterminer à chaque instant la valeur de η_{ond}. A partir d'un onduleur de puissance nominale $P_{nom\text{-}ond}$ caractérisé par ses paramètres η_0 et k et d'un champ photovoltaïque de puissance installée P_{PV} variable, nous avons simulé le fonctionnement du système photovoltaïque raccordé au réseau sur une période de 4 ans.

Pour l'onduleur installé, nous avons déterminé (Figure II.32) un rendement énergétique R (Peippo et Lund ,1994), calculé pour chacun des couples (P_{PV} , $P_{nom\text{-}ond}$) sur la période d'étude par :

$$R = \frac{\int P_{nom\text{-}ond}dt}{\int P_{S,PV}\,dt} = \frac{E_{sortie}}{E_{sortie,PV}} \qquad \text{II.(36)}$$

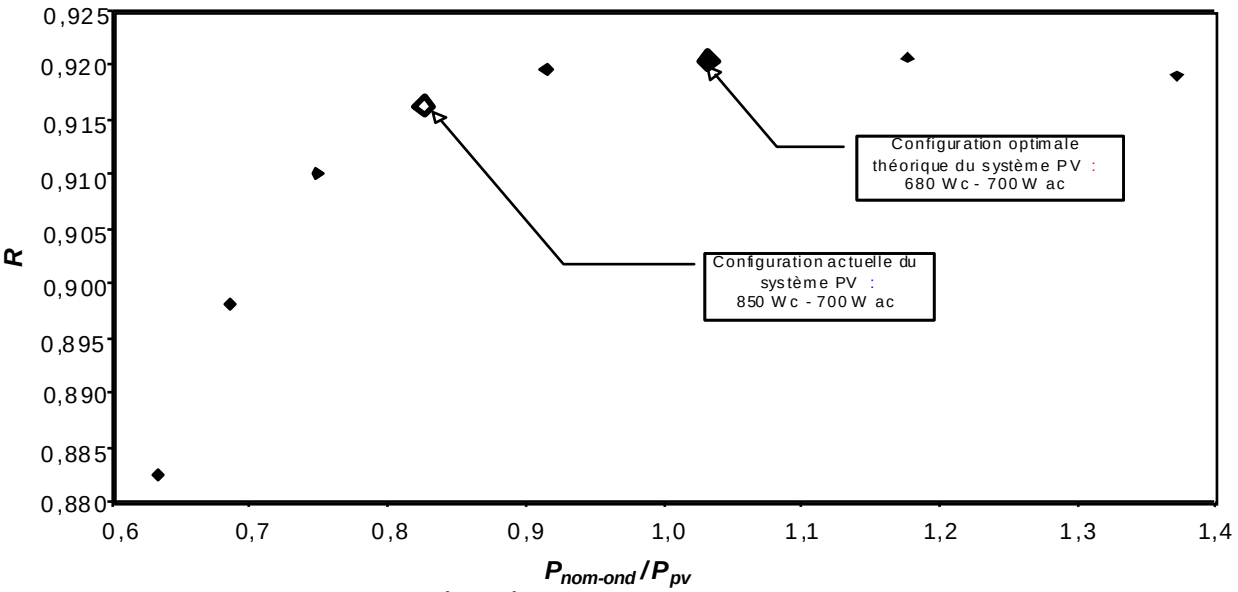


Figure II.32. Rendement énergétique *R* du couplage entre un champ PV et un onduleur

Pour la configuration optimale telle que obtenue à la Figure II.32, P_{nom_ond}/P_{PV} = 1,029 conduit à 0,0005% de pertes énergétiques calculées sur la base de l'énergie en sortie du champ PV non convertie par l'onduleur du fait que $P_{S,PV} > P_{nom\text{-}ond}$. La configuration actuellement installée, conduit à $P_{nom\text{-}ond}/P_{PV}$ = 0,823 et 0,18 % de pertes énergétiques ce qui reste faible par rapport à l'optimum.

On constate que la puissance nominale de l'onduleur est supérieure à la puissance du champ que l'on devrait installer, soit 8 modules (680 W_c). Cependant, il faut garder à l'esprit que la configuration champ-onduleur dépend également de la tension continue appliquée en entrée de l'onduleur.

Nous disposons ainsi d'une méthode fiable permettant d'étudier le couplage entre un champ PV et un onduleur en connexion à un réseau électrique. La littérature présente des systèmes connectés au réseau dont la plus grande majorité vérifie $P_{nom\text{-}ond} > P_{PV}$ (Peippo et Lund, 1994 ; Poissant *et al.*, 2004 ; Deb Mondol *et al.*, 2006), ce qui est en adéquation avec la configuration obtenue par la méthodologie.

Le second objectif de cette étude était l'estimation des performances de ce système après les 5 ans de fonctionnement (Janvier 2001 – Décembre 2005) mais également d'identifier d'éventuels facteurs limitant son efficacité. Plusieurs paramètres de performances ont été utilisés :

$$\eta_{PV} = \frac{E_p}{E_i . S} \qquad \text{II.(37)}$$

$$N_h = \frac{E_{pa}}{P_{PV}} \qquad \text{II.(38)}$$

$$K_p = \frac{\eta_{PV}}{\eta_{0,PV}} \qquad \text{II.(39)}$$

où : E_p : Energie produite par le champ PV (Wh),
E_i : Flux incident sous un angle de 45° (Wh m^{-2}),
S : Surface utile du champ PV (S = 5,625 m²),
E_{pa} : Energie produite par le champ sur une base annuelle (Wh an^{-1}),
P_{pv} : Puissance nominale du champ PV (W),
η_{PV} : Rendement du champ PV (%),
η_{0PV} : Rendement du module PV théorique fourni par le constructeur, η_{0PV} = 15,1%.

Le paramètre K_p peut être estimé facilement à partir des différentes pertes liées aux paramètres suivants :

- température réelle de la cellule différente des conditions standards : η_T (données du constructeur 0,5% °C^{-1} à 40°C soit η_T = 92,5%,
- pertes dans les connexions : câbles, diodes : η_c,
- rendement de l'onduleur : η_{ond} (93%, données constructeur),
- indisponibilité du système (défaillance, maintenance) : η_p .

Ainsi :

$$K_p = \eta_T \, \eta_c \, \eta_{ond} \, \eta_p \qquad \text{II.(40)}$$

L'analyseur de courbe I-V PV-KLA a montré un rendement de l'installation complète égal à 13% prenant en compte les pertes liées à la température (η_T) et les pertes de connexion (η_c). Soit $\eta_T \, \eta_c$ = 0,86 ce qui induit η_c = 0,93.

Considérant une disponibilité de 98%, le calcul conduit à K_p = 0,784 ce qui représente une valeur réaliste pour un tel system.

Lorsque l'on compare cette valeur théorique aux mesures expérimentales sur la période Janvier 2001 – Décembre 2003 (Tableau II.6), $K_p \approx$ 0,5.

	Flux incident kWh m^{-2}	Energie produite kWh	Rendement %	N_h h an^{-1}	K_p
Jan01-Dec01	1977,31	884,79	7,95	1040,93	0,53
Jan02-Dec02	1842,82	800,60	7,72	941,88	0,51

Jan03-Dec03	1942,55	809,60	7,41	952,47	0,49

Tableau II.6. Performances du système sur la période Janvier 2001 – Décembre 2003

Ces résultats ont permis de conclure que le système possédait des limites de fonctionnement qui diminuaient fortement ces performances : $K_p \approx 0{,}5$ au lieu de 0,78 ; des rendements globaux divisés par 2 par rapport aux rendements de référence ; des nombres d'heures de fonctionnement inférieurs aux attentes et une perte d'énergie globale par rapport à la théorie de l'ordre de 30%.

Les raisons de ces mauvais résultats reposent sur 2 observations :

- la première, de faible impact, est liée aux heures particulières de lever et de coucher de soleil, pour de faibles flux incidents, le champ PV ne produit pas assez de courant pour l'alimentation de l'onduleur. Cela représente 1 à 5% du temps dans la journée en fonction des périodes de l'année.
- la seconde est due, au cours d'une journée à une défaillance de l'onduleur, liée à des perturbations du réseau électrique (impédance *Zac* et variation d'impédance *dZac* en dehors des tolérances admises par l'onduleur). Ces erreurs dues à l'instabilité du réseau quasiment non-interconnecté de la Corse, se produisent lorsque le flux solaire est important avec des conséquences négatives sur la production et le rendement du système. La tolérance indiquée par le constructeur est comprise pour *dZac* entre 0 et 2000 mΩ ; pour *Zac* entre 0 et 200000 mΩ et enfin pour la variation de fréquence maximum *dfac* entre 0,005 et 4 Hz/s.

A titre indicatif, la Figure II.33 illustre l'apparition de ces défaillances de l'onduleur avec comme résultats des rendements journaliers du système quasi-nul.

(a) **(b)**

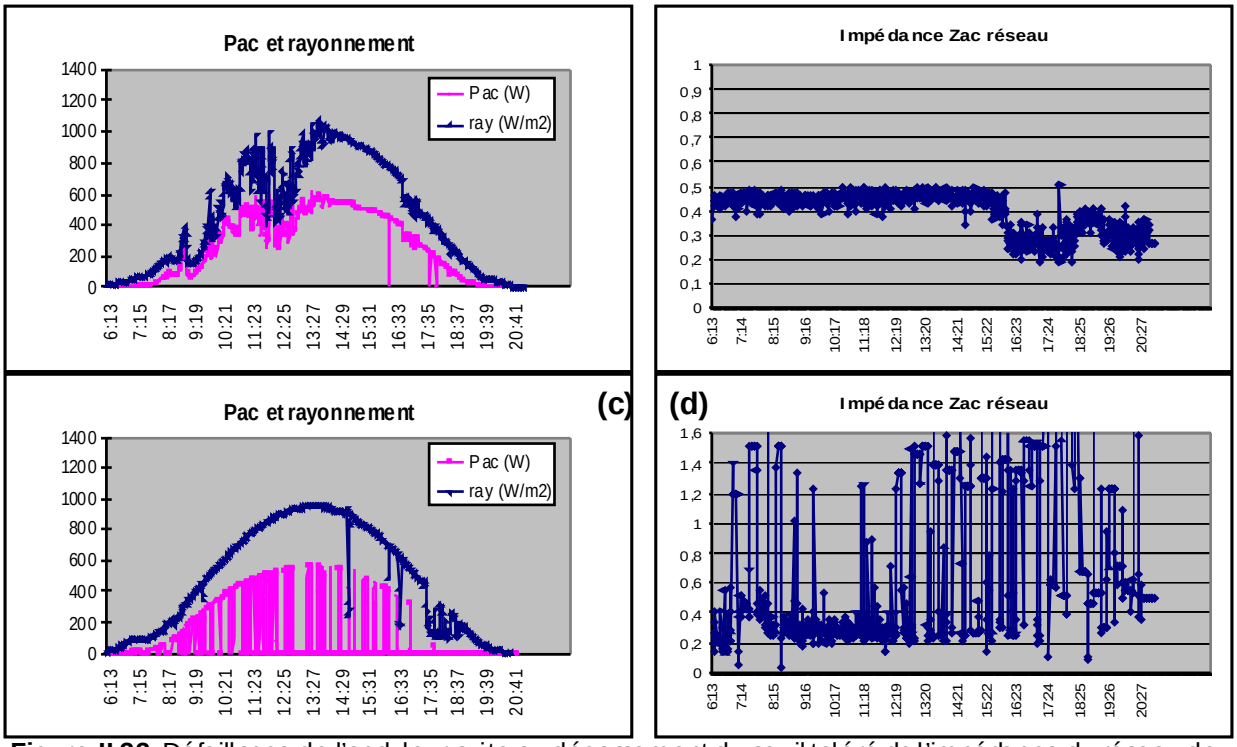


Figure II.33. Défaillance de l'onduleur suite au dépassement du seuil toléré de l'impédance du réseau de distribution. Puissance AC débitée sur le réseau en fonction du flux incident (a) 19/05/2001, rendement ≈ 13% pour une journée sans dépassement de tolérance *Zac* (b) ;
(c) : 26/05/2001, rendement ≈ 0% pour une journée présentant des dépassements de la tolérance (d).

Sur l'ensemble de la période (Janvier 2001 – Décembre 2003), ces défauts représentent pratiquement 33% du temps, ce qui baisse substantiellement les performances du système et génèrent une perte d'énergie estimée à environ 30%.

Pour pallier cette défaillance, sur la période Janvier 2004 – Décembre 2005, les seuils de tolérance pour les paramètres tension, fréquence et impédance ont été augmentés aux limites tolérables par l'onduleur (cf. document technique SMA Sunny Boy). Les résultats obtenus confirment l'intérêt d'un monitoring de ces systèmes connectés au réseau pendant au moins une année avec l'étude fine des défaillances observées sur le système :

+ 18%/an d'énergie produite par le système (E_{pa} = 1030 kWh/an en moyenne),
+ 20%/an du nombre d'heures de fonctionnement (N_h = 1200 h/an en moyenne).

La simulation d'un tel système sur le logiciel PV SYST4.0® (Université de Genève) permet d'estimer rapidement les performances et le coût du kWh produit. En intégrant les données précédentes, nous avons obtenu :

- K_p = 0,749 proche de la valeur proposée,
- E_{pa} = 1074 kWh/an à comparer au 1030 kWh/an (valeur expérimentale) après l'augmentation de tolérance sur l'impédance du réseau,

- coût du kWh produit égal à 0,47 € kWh^{-1}.

II.4.2. Champ photovoltaïque pour application au relevage de chute de tension

Comme nous venons de le voir, les systèmes en connexion au réseau de distribution électrique (petites et grandes puissances) sont des atouts majeurs pour le développement des technologies utilisant les EnR. Afin de diversifier leur palette d'utilisation, nous avons initié une étude sur l'utilisation de systèmes PV raccordés au réseau pour le relevage des chutes de tension en bout de ligne électrique. Il s'agit d'un problème récurrent sur un réseau insulaire comme celui de la Corse avec 120 bouts de ligne répertoriés présentant des chutes de tension observées.

L'objectif de l'étude est de définir, à partir d'un cas réel, une méthodologie de dimensionnement de systèmes décentralisés de production de l'électricité (de type PV/Onduleur) raccordés au réseau sur un voire plusieurs segments du bout de ligne afin de limiter ces chutes de tension. Les avantages à l'utilisation d'une telle technologie sont nombreux :

- aspect modulaire des systèmes EnR permettant une adaptation progressive à la demande en énergie ;

- l'électricité est produite à l'endroit même de son utilisation ;
- les pics de charge en journée peuvent être écrêtés par l'utilisation de systèmes photovoltaïques ;
- un plus grand respect de l'environnement par l'utilisation de sources renouvelables d'énergie propres en remplacement de groupes électrogènes de fortes puissances utilisant des combustibles fossiles.

Les travaux effectués (Acquaviva *et al.*, 2000a, 2000b) ont été basés sur un dimensionnement de système à partir de données horaires d'irradiations inclinées (45°) à Ajaccio (19 ans, Météo-France). Le cas réel d'un bout de ligne se situe proche de cette localité, nous avons obtenu de la part d'EDF les caractéristiques électriques de la ligne basse tension

(réactances, résistances, longueurs, nombre de segments, nombres d'habitations connectées). Ce système est résumé sur la Figure II.34.

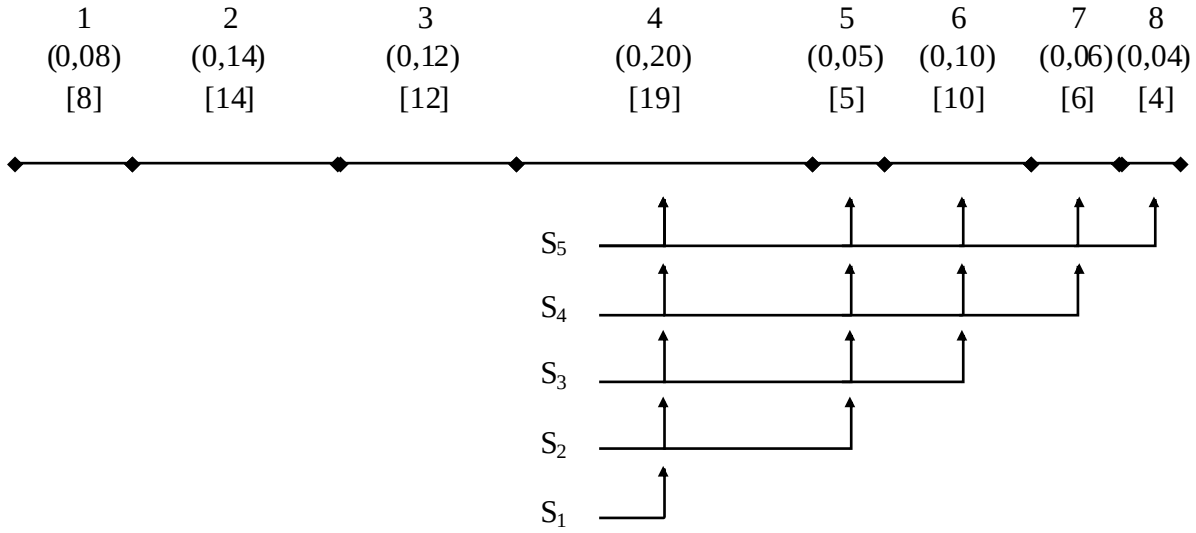


Figure II.34. Schématisation du bout de ligne sous test (Numéro de segment de 1 à 8 avec entre parenthèse leur longueur en km et entre crochet, leur nombre de logements connectés). S_1 à S_5 sont les stratégies de connexion des systèmes décentralisés de production d'électricité PV.

Les profils de consommation de chaque habitation n'ont pu être mesurés individuellement compte tenu du coût de l'opération. Ainsi, nous avons décidé d'uniformiser ces profils en considérant celui de la Figure II.18b.

Le processus de dimensionnement s'appuie sur 3 étapes : un dimensionnement physique issu de la simulation de la connexion d'un (voire plusieurs) système(s) PV/onduleur sur des segments du bout de ligne, une étape éliminant les systèmes ne correspondant pas aux contraintes techniques et enfin une optimisation économique.

Dans l'étape de simulation, les chutes de tension horaires cumulées pour le segment n (%) sont estimées en utilisant la formulation classique :

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_n = 10^5 . \left[\frac{R + X.tg\varphi}{U^2}\right] \sum_{i=1}^{n} P_i \ .L_i \qquad \text{II.(41)}$$

où : R résistance du segment (Ω/km),
X réactance du segment (Ω/km),
U tension du réseau (V),
L_i longueur du segment i (km),
P_i puissance de la charge appelée sur le segment i (kW).

Pour chaque segment et chaque heure il est possible d'estimer la chute de tension, celle-ci devenant problématique lorsque (ΔU/U) > 10%. Sur la Figure II.35, on observe pour le mois de Janvier que cette chute de tension apparaît au delà du segment N°3 en fin de journée.

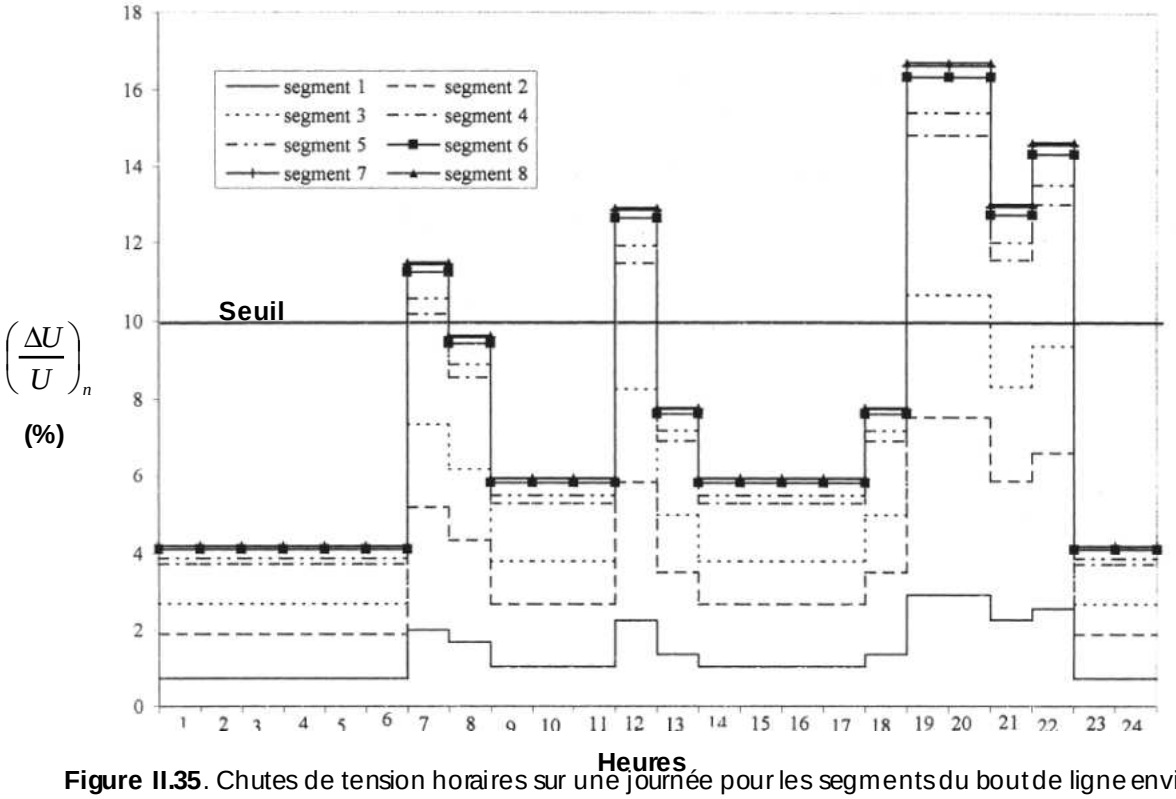


Figure II.35. Chutes de tension horaires sur une journée pour les segments du bout de ligne envisagé sans ajout de systèmes EnR de production décentralisée.

La connexion de systèmes PV/Onduleur modifie l'apport de puissance sur le bout de ligne si bien que la nouvelle chute de tension horaire s'écrira :

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_n = 10^5 . \left[\frac{R + X.tg\varphi}{U^é}\right] \sum_{i=1}^{n} P_i^{'} .L_i \qquad \text{II.(42)}$$

où : $P_i^{'} = (P_j - P_{inv,j})$ sachant que $P_{inv,j}$ est la puissance de sortie de l'onduleur (kW) calculée à partir de la puissance P_{pv} installée en fonction du modèle décrit précédemment (Eqs II.34-36).

A ce stade, nous avons envisagé plusieurs stratégies de connexion représentées sur la Figure II.34 et qui dépendent du nombre de segments connectés à des systèmes PV :

S_1 : seul le segment 4 est équipé en toiture de système PV ;

S_2 : segments 4 et 5 équipés ;

S_3 : segments 4 à 6 équipés ;

S_4 : segments 4 à 7 équipés ;

S_5 : segments 4 à 8 équipés.

Pour chaque stratégie de connexion, nous avons simulé l'impact de la connexion des systèmes PV sur le bout de ligne. A titre indicatif, nous avons tracé l'évolution des chutes de tension pour le mois de janvier et une utilisation de systèmes PV de relevage sur le segment 4 pour des puissances P_{PV} comprises entre 1 et 7 kW (Figure II.36). Les résultats montrent aux heures d'ensoleillement un impact direct de l'apport d'énergie par le PV, apport moins conséquent pour des surfaces supérieures à 50 m² (soit P_{PV} ~ 5 kW). L'objectif initial de l'étude est atteint, sur le plan physique, dans le sens où il existe un potentiel intéressant pour l'utilisation de systèmes PV dans ces applications de bout de ligne.

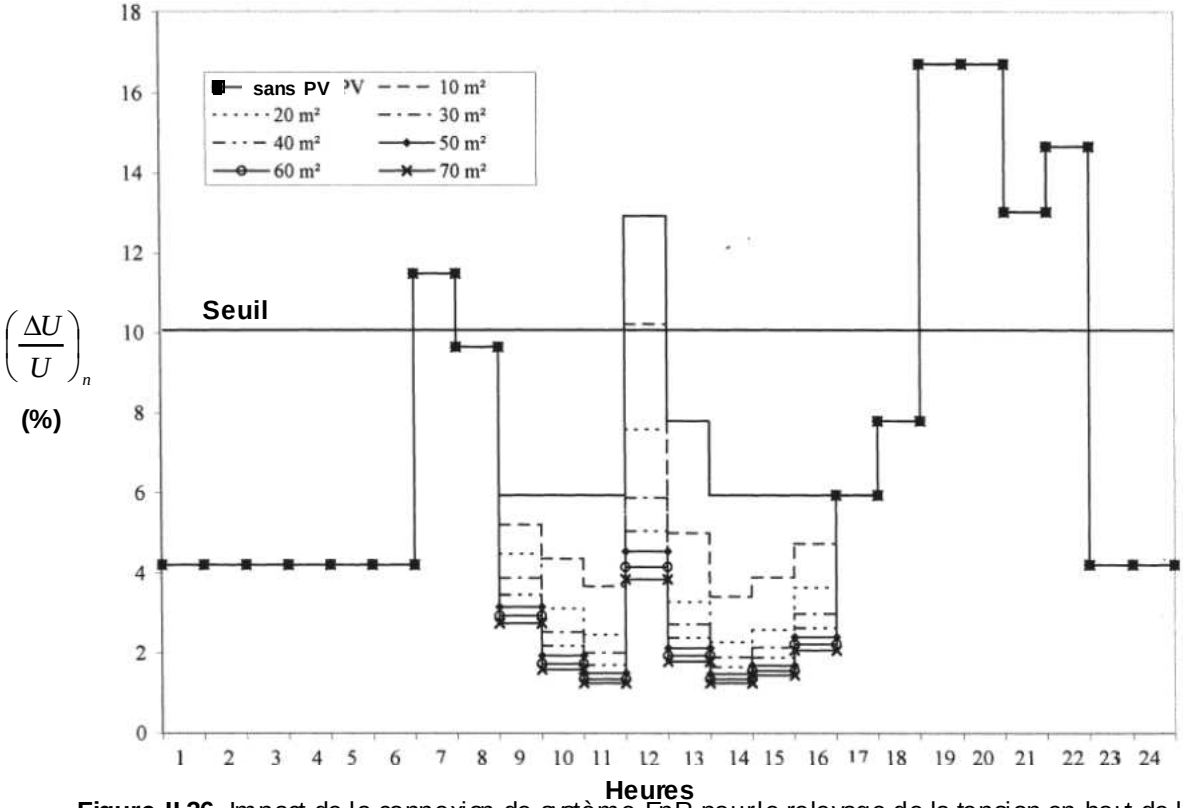


Figure II.36. Impact de la connexion de système EnR pour le relevage de la tension en bout de ligne (Stratégie S_1, segment 8, mois de Janvier)

En considérant l'ensemble des stratégies de connexion, il est possible par analogie aux systèmes PV hybrides précédemment décrits, d'utiliser la notion de probabilité de pertes de

charge (LOLP) pour des défaillances du système lorsqu'une chute de tension est observée égale à 10%. Ainsi, pour respecter la contrainte d'un nombre prédéterminé de chutes de tension horaires (LOLP = 0 pour l'autonomie ou LOLP > 0 pour la possibilité d'avoir un système défaillant), nous avons déterminé, selon la stratégie de connexion, la surface de champ PV nécessaire à installer sur chaque habitation (Figure II.37).

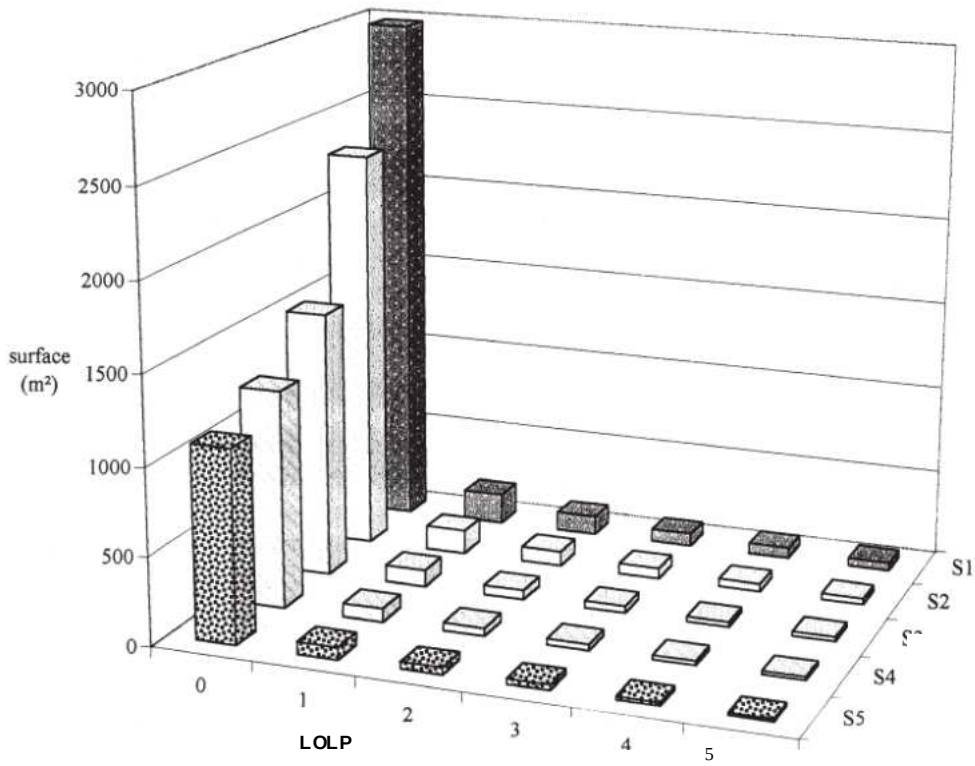


Figure II.37. Evaluation des surfaces de capteurs PV à installer pour limiter les chutes de tension en fonction des stratégies de connexion. LOLP correspond au nombre de chutes de tension horaire permises dans le mois.

La contrainte d'autonomie (LOLP = 0) correspondant à aucune chute de tension horaire dans le mois induit des surfaces de champ PV techniquement inenvisageable. Dès que la contrainte est levée (LOLP > 0), pour 1, 2 jusqu'à 5 chutes de tension horaires dans le mois, les surfaces de capteurs PV simulées sont techniquement acceptables (par exemple pour la stratégie S_5, et pour 3 à 4 chutes de tension mensuelles, la surface est comprise entre 40 et 70 m²). Le choix final du système pour une LOLP donnée sera défini par un critère économique qui prendra en compte à la fois, le coût du système sur sa durée de vie mais aussi les coûts d'achat de l'électricité fournie par le système sur le réseau lorsque ce dernier ne présente pas de défaillance de tension.

II.4.3. Système hybride EnR-H_2 pour la production d'électricité sur un réseau de distribution – Projet MYRTE

La Corse, pôle de Compétitivité sur les Energies Renouvelables au sein de CAP ENERGIE, est l'une des régions françaises ayant une part importante de systèmes EnR pour sa production d'électricité. En 2007, 29,9% de la puissance installée des systèmes de production d'électricité utilisent des sources Renouvelables d'Energie (hydroélectricité et éolienne). Plus de la moitié des 574 MW installés provient d'installations thermiques au fuel. La répartition des moyens de production se déclinent ainsi :

- Thermique : centrale Fuel	301 MW
- Hydraulique :	134 MW
- Micro-hydraulique :	20,7 MW
- SACOI : câble	50 MW
- SARCO : câble	50 MW
- Eoliennes :	18 MW

Les disfonctionnements dans l'approvisionnement en électricité au cours de l'hiver 2005, montrant les faiblesses d'un système global de production vétuste et insuffisant, ont permis d'élaborer un Plan Energétique de la Corse avec des échéances jusqu'à 2015. Ce plan préconise un mixe énergétique à cette échéance reposant sur un trépied qui a pour avantages une diversité, donc une certaine source de sécurité et un plus grand respect de l'environnement :

- *utilisation des Energies Renouvelables* : avec la construction d'un nouveau barrage pour une puissance totale de 20 MW et une production de 400 GWh ; l'utilisation de la micro-hydraulique (30 MW) et l'éolien (100 MW) qui pourraient apporter 270 GWh/an. L'ensemble des EnR pourrait alors représenter entre 700 et 900 GWh/an (photovoltaïque, éolien, hydraulique), soit entre 25 et 30% de la production d'électricité.
- *le Thermique* : indispensable à l'équilibre énergétique de la Corse, il s'agit de remplacer les anciennes centrales actuelles (Vazzio et Lucciana) sans en augmenter les puissances dans un but de préservation de l'environnement. Les turbines à combustion seront alors utilisées en pointe de charge. A terme (2015), la production d'énergie électrique représentera 30 à 40% de la production d'électricité sur l'île soit entre 850 et 1100 GWh/an.
- *l'interconnexion* : En 2015, le câble SARCO (SARdaigne-COrse) sera porté à 100 MW, permettant de réduire la part de thermique. SARCO délivrera entre 500 et 800 GWh/an.

Le câble SACOI (SArdinia-COrsica-Italia) demeurera en service avec 50 MW soit 350 à 400 GWh/an. Ainsi, l'interconnexion en 2015 représentera entre 30 et 40 % des besoins électriques de l'île.

En résumé, et pour répondre à une augmentation de la demande d'électricité en Corse estimée entre 3 et 4%/an (soit près de 30% en 2015), les systèmes EnR représenteront une part importante du trépied énergétique avec environ 30 % de la production. Les fermes éoliennes et/ou photovoltaïques auront nécessairement un rôle primordial dans ce pourcentage puisqu'elles représentent, pour une région comme la Corse, un moyen rentable de production de l'électricité compte tenu des potentiels éolien et solaire de certains sites.

Dans ce contexte très favorable pour une île comme la Corse, l'équipe Energies Renouvelables de l'Université de Corse s'est associée avec plusieurs partenaires pour le développement et la réalisation d'une plate-forme de Recherche et Développement dédiée aux Energies Renouvelables sur le site de Vignola à Ajaccio. L'objectif est la réalisation d'un pôle de transfert technologique intégrant une plate-forme R&D, adossée à une centrale PV raccordée au réseau EDF, visant à étudier et expérimenter l'intégration massive des Energies Renouvelables (en particulier le solaire) dans le bouquet énergétique de la Corse sur la base d'un couplage EnR-H_2.

Ce projet structurant de grande ampleur (nous le verrons plus loin), labellisé par le Pôle de Compétitivité CAP ENERGIE (PACA-Corse) en 2006, résulte du partenariat actif entre l'Université de Corse et le groupe industriel privé RAFFALLI implanté sur la région PACA-Corse. Ce projet de référence pour la région répond aux objectifs fixés par le Plan Energétique de la Corse dont nous avons parlé précédemment visant à satisfaire les besoins de l'île en mobilisant toutes les sources d'énergie, en particulier les EnR.

Cette expérimentation à grande échelle de la connexion massive de systèmes PV sur un réseau insulaire comprend :

- *le projet **MYRTE*** (**M**ission h**Y**drogène-**R**enouvelable pour l'in**T**égration au réseau **E**lectrique) : étude du couplage des EnR avec de l'H_2 et une pile à combustible (PAC) de grande puissance ;

- le développement de technologies de production et de stockage de l'H_2 avec des laboratoires et des entreprises européennes ;
- *une plate-forme technologique pour la R&D*, constituée de systèmes travaillant avec les EnR qui sera utilisée aussi bien pour le développement mais également pour la formation ;
- *une plate-forme professionnelle* dont l'objectif principal est la mise en oeuvre d'un outil intégré au projet de R&D permettant d'apporter aux professionnels (installateurs en thermique et sanitaire) les formations suivantes : installation d'un Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI), labels Qualisol et QualitE'nR.

La Figure II.38 présente une vue aérienne du plateau technologique à l'horizon 2015 avec la présentation des grands instruments mis à la disposition des chercheurs, des formateurs et des professionnels dans le domaine des EnR.

Comme nous l'avons dit préalablement, le réseau électrique actuel accepterait au maximum la connexion de 100 MW de systèmes de production décentralisée. Ces systèmes pourraient absorber la quasi-totalité des pointes de consommation constatées quotidiennement en assurant la stabilité du réseau sans augmenter la production de gaz à effet de serre. Le couplage EnR-H_2 permettrait de répondre à cette contrainte par la combinaison EnR pour la production d'H_2 et la restitution d'électricité par une PAC. C'est l'objectif principal du projet MYRTE : développer un système et une méthode visant à améliorer la gestion et la stabilisation du réseau électrique (régulation, stockage). Ceci nécessite la définition d'un outil qui permettra à terme de :

- dimensionner les différents sous-systèmes selon les applications visées ;
- optimiser techniquement et économiquement le système à installer ;
- dimensionner le système par la prévision d'une future modularité pour épouser l'évolution éventuelle des progrès technologiques dans le couplage EnR-H_2.

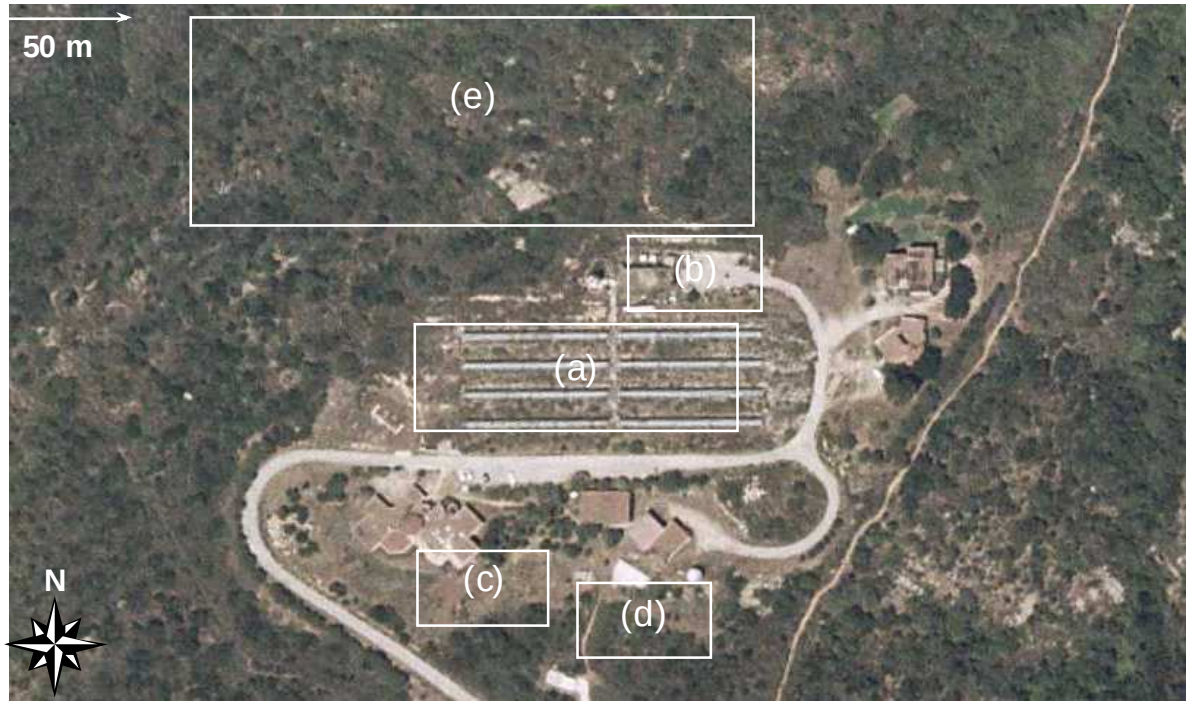


Figure II.38. Vue d'ensemble, à l'horizon 2015, du projet de développement d'une plate-forme technologique sur le site de l'Université de Corse (Vignola, Ajaccio)

(a) : 600 kW de modules PV en alimentation du grand instrument MYRTE

(b) : Dispositif expérimental MYRTE (électrolyseur + PAC)

(c) : Plate-forme technique solaire

(d) : Plate-forme technique professionnelle

(e) : Extension de la centrale photovoltaïque à 3,6 MW

Ainsi, le projet MYRTE prévoit la réalisation d'une centrale PV alimentant un électrolyseur pour la production d'H_2 nécessaire au fonctionnement d'une PAC de 100 à 200 kW (première mondiale, non développée à ce jour). 600 kW de modules PV sont nécessaires à l'alimentation électrique du « grand instrument » (MYRTE). Afin de répondre à l'objectif fixé par le Plan Energétique, la plate-forme de R&D a été dimensionnée pour 3,6 MW afin de produire massivement de l'électricité en connexion au réseau électrique.

Outre *le groupe RAFFALLI*, partenaire industriel privé du projet, plusieurs organismes se sont associés pour aboutir à la construction d'un tel instrument :

- *le groupe industriel HELION*, acteur de la filière hydrogène du groupe AREVA, spécialisé dans la conception, le développement et la fabrication de PAC et d'électrolyseur de type PEM (Proton Exchange Membrane) ;
- *le CEA*, par l'intermédiaire de ses laboratoires LITEN, LSS (Laboratoire des Systèmes Solaires) ou bien LPAC (Laboratoires système Piles A Combustible), s'est structuré, depuis plus de 20 ans, pour le développement de nouvelles technologies pour l'énergie. Ses compétences sont étendues sur la ressource solaire, le stockage de l'énergie, les PAC et la gestion des réseaux électriques ;
- *l'UDC Equipe Energies Renouvelables* qui depuis 25 ans, travaille sur la caractérisation statistique des ressources renouvelables (solaire, éolienne, vapeur d'eau) ainsi que sur l'optimisation globale de la gestion des systèmes EnR en connexion au réseau électrique ou à la production d'électricité décentralisée.

L'investissement d'un tel projet (centrale PV + MYRTE) inscrit depuis février 2007 au CPER est d'un peu plus de 29 210 k€. A ce coût vient s'ajouter ceux du plateau technique solaire pour la R&D (2520 k€), de la plate-forme solaire professionnelle (30 k€) et de la dépollution du site (340 k€) pour un budget global de 32 100 k€.

Le plateau technique solaire aura pour objectifs d' :

- optimiser des systèmes solaires existants ;
- conceptualiser de nouveaux systèmes innovants ;
- aider aux développements de composants solaires en partenariat avec des industriels ;
- être utilisé dans le cadre de la formation initiale ou continue de niveaux techniciens et ingénieurs.

Ce plateau technologique, dont certains systèmes sont déjà en place en 2007, présentera à terme une configuration complète d'étude sur les systèmes à EnR : système PV connecté au réseau électrique 850 Wc ; système chauffe-air intégré bâti (VOLET'AIR®) ; système

thermique à haute intégration (H2OSS®) ; condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau et climatisation passive dans une démarche HQE (40 m²) ; station météorologique ; bancs d'essais d'onduleurs ; façade PV (3 pans) instrumentée ; froid solaire (climatisation et rafraîchissement) ; stockage de l'énergie (batteries, H_2, volant d'inertie, PAC) ; banc de test pour modules PV mono et polycristallin.

La plate-forme professionnelle devra simuler les conditions réelles d'installation et d'utilisation de capteurs solaires pour des kits CESI soit en terrasse, paroi verticale ou toiture et constitués en thermosiphon, vidange automatique ou kit sous pression.

A terme, la plate-forme technologique (MYRTE/plateau technique et professionnel) deviendra une référence pour les chercheurs, développeurs et professionnels travaillant sur les Energies Renouvelables et donnera à la Corse, une spécificité et une reconnaissance internationale dans ce domaine.

Conclusion

Le modèle de développement économique du 21ème siècle se différenciera du modèle actuel par la nécessité urgente de recourir à des solutions permettant de faire face simultanément aux enjeux économiques, sociaux et environnementaux dans le cadre d'une politique basée sur un « développement durable ».

Dans le domaine énergétique, la raréfaction de la ressource en énergie fossile et la nécessaire maîtrise de la production de gaz à effet de serre font que les Energies Renouvelables s'imposent dès aujourd'hui et depuis fort longtemps dans certains pays comme une des solutions au problème global de l'accès à l'électricité pour des populations isolées ou pour la production massive de ce vecteur énergétique en connexion au réseau de distribution.

Dans ce contexte, une région comme la Corse, nouvellement labellisée, Pôle de Compétitivité sur les Energies Renouvelables, se doit de figurer au premier plan pour la valorisation de ces énergies propres. Ainsi, mes travaux de recherches ont concernés aussi bien

l'utilisation de la ressource solaire et/ou éolienne pour l'électrification de sites isolés par la définition de codes numériques de dimensionnement de systèmes hybrides (source auxiliaire fossile ou H_2) mais également la connexion de ces systèmes EnR sur des réseaux électriques soit pour la réduction des chutes de tension en bout de lignes ou pour la production à grande échelle d'électricité.

CONCLUSION

CONCLUSION

Ces travaux de recherches s'inscrivent dans le cadre du projet structurant « Energies Renouvelables » de l'UMR CNRS 6134 de l'Université de Corse. Ils concernent plus particulièrement la définition de systèmes innovants permettant l'utilisation des sources renouvelables en vapeur eau ou en énergie pour la production d'eau douce potable et d'électricité pour des populations isolées.

Pour ce qui concerne la thématique de l'utilisation de la vapeur d'eau atmosphérique, tous les bilans sur l'accès à la ressource en eau potable à l'échelle mondiale sont alarmistes, qu'ils soient dressés par des Organisations Internationales (ONU, OMS, UNESCO…), des Organisations Non Gouvernementales ou bien des Institutions d'Etat. Plus de 1,1 milliard de personnes souffrent d'un manque d'accès à l'eau potable alors même que l'accélération du réchauffement climatique se mesure scientifiquement laissant présager des besoins croissants. 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. Notre travail, débuté en 1998, a permis de définir des systèmes passifs robustes, fiables, peu chers, utilisant un phénomène naturel (le refroidissement radiatif), nécessitant un minimum de formations afin que les populations puissent rapidement s'approprier la technologie pour un usage au quotidien.

Les premiers travaux ont concerné la mise en place de protocoles expérimentaux nouveaux pour l'estimation quantitative de cette ressource vapeur d'eau dans l'air (1998-2001). Testé sur plusieurs sites en France, en Polynésie Française, le protocole de mesure N°1 utilise une balance électronique pour mesurer en continu la masse d'eau condensée en fonction de plusieurs paramètres météorologiques.

Les études se sont poursuivies par la construction d'une maquette à l'échelle 1/10ème simulant un condenseur plan de 30 m² ; elle a permis d'estimer l'influence de l'angle

d'inclinaison de la structure vis à vis de la force et la direction du vent, mais également l'intérêt d'une isolation sous le matériau de condensation (2001-2002).

Les premiers grands prototypes (30 m²) représentant des premières mondiales (2000-2003) sur l'utilisation du refroidissement radiatif nocturne ont montré à Ajaccio, que la technologie était très efficace pour récupérer sans apport d'énergie de l'eau chaque jour.

A partir de 2004, un co-encadrement de thèse (UDC/CEA) financé par la CTC a été élaboré sur cette thématique afin de définir de nouveaux matériaux (peintures et films radiatifs). 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 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. Ainsi, les matériaux auront une double fonctionnalité : une climatisation passive des bâtiments en cycle diurne et une production d'eau potable en cycle nocturne toutes les deux compatibles avec plusieurs « cibles » de la démarche HQE. Une toiture expérimentale de 40 m² vient d'être construite en mai 2007. Elle propose 5 surfaces de couverture parmi les plus répandues (tuiles de terre cuite, fibrociment, tôle ondulée et tôle « bac acier », panneaux photovoltaïques) 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 a été déposée en Juin 2007.

En 2005, un code 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 7,32 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).

Enfin, entre 2005 et 2007, ces compétences acquises au cours de ces années ont été mises à profit 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 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 m^3 d'eau embouteillée pure par nuit. Les 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 différents travaux menés au cours de ces années m'ont amené à co-encadrer une thèse de Doctorat dont la soutenance s'est tenue le 10 avril 2007 à l'Université de Corse (Doctorant : Owen CLUS), mais également à démarrer, début 2007, un autre co-encadrement en partenariat étroit avec le CEA, l'UDC, le CNRS et l'Université d'Agadir au Maroc pour le développement de nouveaux systèmes à condensation spécifiques à cette région du Sud-Marocain. Mes recherches au sein de l'équipe « Energies Renouvelables » de l'UMR CNRS, ont conduit à l'écriture de 12 publications, 25 communications orales et écrites, 2 rapports de contrats, 3 conférences invitées ainsi qu'au dépôt d'un brevet sur les nouveaux matériaux développés. Ces travaux ont nécessité la mise en place de collaborations nationales et internationales sous forme de convention avec le CEA-ESPCI depuis 2000, avec VEOLIA Environnement en 2002-2003, l'Université de Polynésie Française en 2005, ou sous forme de partenariat avec l'Arid Eco System Center à Jérusalem (Israël), l'Institut Météorologique et Hydrologique de Zagreb (Croatie), l'Indian Institute of Management Ahmedabad (Inde).

L'autre thématique de recherches développée au cours de ces années concerne l'utilisation de sources renouvelables d'énergie pour la production d'électricité soit en sites isolés, soit en connexion au réseau de distribution. A nouveau, le manque d'électrification de certaines régions du Globe est la cause d'une mortalité importante du fait par exemple, que ces populations ne peuvent conserver des médicaments sous forme de vaccins pour enrayer les pandémies.

Dans mes travaux de recherches, le développement de méthodes de dimensionnement de systèmes EnR pour des applications de production d'électricité décentralisée a été étudié. Le but est d'optimiser la taille de chaque sous-système afin de produire un kWh le plus faible possible tout en assurant une disponibilité totale ou partielle du système pour une charge à alimenter.

Ainsi, les travaux suivant ma thèse de doctorat se sont focalisés sur l'adaptation de nos codes numériques de dimensionnement pour de petits systèmes éoliens simples ou hybrides (source auxiliaire type groupe électrogène) pour la fourniture d'électricité sur des sites isolés. Un taux de défaillance, caractérisé par une probabilité de pertes de charge du système montre rapidement l'intérêt de ces systèmes lorsque les besoins en électricité sont situés loin d'un réseau de distribution classique dont le coût de raccordement serait plus important que l'installation des systèmes EnR.

En Mars 2007, nous avons déposé, en partenariat avec plusieurs laboratoires et industriels privés, un projet ANR PAN-H afin de développer des systèmes hybrides de production d'électricité utilisant une chaîne hydrogène. Dans un objectif de raréfaction de la ressource fossile, l'hydrogène va rapidement devenir le vecteur énergétique de l'avenir et les premiers résultats de dimensionnement montrent qu'un système EnR couplé à un électrolyseur et une pile à combustible nécessite une batterie « tampon » afin de limiter le temps de fonctionnement de la PAC dont les performances techniques sont encore limitées (durée de vie de moins de 5000 heures).

La connexion des systèmes EnR sur un réseau de distribution a été envisagée par l'intégration de systèmes photovoltaïques pour limitation des chutes de tension en bout de ligne électrique, et par la mise en place d'une expérimentation au laboratoire d'un champ PV de 850W couplé à un onduleur de 700 W. Le suivi des performances de ce système sur 5 années a mis en évidence l'intérêt d'un monitoring de l'onduleur qui présentait des défaillances dues à l'instabilité du réseau (variation impédance). Enfin, un projet, labellisé par le Pôle de Compétitivité CAPENERGIE, dénommé MYRTE, élaboré en partenariat avec des laboratoires de recherches et

des industriels, va permettre à l'horizon 2015, d'étudier l'intégration massive d'énergies renouvelables sur le réseau insulaire avec la connexion d'une centrale PV de 3,6 MW couplée à un électrolyseur et une PAC de puissance comprise entre 100 et 200 kW. Cette première mondiale répondra en partie, à la demande énergétique de la Corse en accord avec le Plan Energétique élaboré par la Collectivité Territoriale de Corse.

A nouveau, ces travaux ont donné lieu à de nombreuses publications (12), communications et conférences (23), rapports de contrats (3) et fera l'objet à partir de septembre 2007, d'un co-encadrement de thèse d'un étudiant formé à l'Université de Corse dont la bourse de Doctorat (contrat CIFRE) sera financée par l'industriel privé.

La maîtrise pratique de l'installation de projets à grande échelle est un atout indéniable pour le positionnement à venir de l'équipe de l'Université de Corse dans les secteurs de la condensation passive de la vapeur d'eau atmosphérique et de la production d'énergie par les EnR. 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 compétences acquises durant ces travaux de recherches seront essentiels pour initier et accompagner ces développements à venir.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Acquaviva V., Muselli M., Poggi P., Louche A., (1998a). Rooftop Photovoltaic Installation Performances. *2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion*, Vienne, 2652-2654

Acquaviva V., Muselli M., Poggi P., Louche A., (1998b). Simulation of Small Grid-Connected PV Systems for Residential Applications. *World Renewable Energy Congress V, Renewable Energy* , Part III, Florence, 1709-1712

Acquaviva V., Poggi P., Muselli M., Louche A., (2000a). Grid-Connected Rooftop PV systems for Reducing Voltage Drops at the End of the Feeder – A Case Study in Corsica Island. *Energy*, 25, 741-756

Acquaviva V., Poggi P., Muselli M., Louche A., (2000b). Analysis of Relationships between Photovoltaic Power and Battery Storage for supplying the Enf of the Feeder - A Case Study on Corsica Island. *16TH European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, 1-5/5/2000, Glasgow, 2626-2628

Agbossou K. , Lal Kolhe M., Hamelin J., Bernier E., Bose T.K., (2004). Electrolytic hydrogen based renewable energy system with oxygen recovery and re-utilisation. *Renewable Energy, 29*, 1305-1318

Aguiar R., Collares-Pereira M., (1992). Statistical properties of hourly global radiation. *Solar Energy*, 48, 157-167

Alekseev V. V., Berezkin M., (1998). I. Presnaïa voda iz atmosphernogo vozduha (De l'eau douce à partir de l'air atmosphérique). *Priroda*, 6, 90-96

Bello B., (2005). Production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables. *Séminaire Alphea Hydrogène.*

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

Aranovitch E., Gandino C., Gillaert D., (1984). *Colloque Météorologie et Energies Renouvelables*, Valbonne, 315-338

Balouktsis A., Tsanakas D., Vachtsevanos G., (1986). Stochastic simulation of hourly and daily average wind speed sequences. *Wind Engeneering*, 10,1, 1-11

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

Berkowicz S., Beysens D., Milimouk I., Heusinkveld B.J., Muselli M., Wakshal E., Jacobs A.F.G., (2004). Urban dew collection under semi-arid conditions: Jerusalem. *Third International Conference on Fog and Fog Collection*, Cape Town, South Africa, October, 11-15, H10

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

Beysens D., Milimouk I., (2000). Pour des ressoures alternatives en eau, *Sécheresse*, 11-4

Beysens, D., Nikolayev V.N., Milimouk I., Muselli M., (2001). A Study of Dew and Frost Precipitation at Grenoble, France. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St John's, Newfoundland, Canada, 15-20/7/2001, 329-331

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

Beysens D., Muselli M., Milimouk I., Ohayon C., Berkowicz S., Soyeux E., Mileta M., Ortega P., (2003b). Passive Radiative Condensers to Extract Water from Air. *2nd Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Croatie, 15-20/6

Beysens D., Muselli M., Mileta M., Milimouk I., Ohayon C., Soveux E., Clus O., (2004a). Is Dew Water Potable? Physical, Chemical and Biological Characteristics of Dew on Atlantic Coast (Bordeaux, France), Mediterranean Coast (Zadar, Croatia) and Mediterranean Island (Ajaccio, Corsica Island, France). *Third International Conference on Fog and Fog Collection*, Cape Town, South Africa, October, 11-15, E3

Beysens D., Muselli M., Kaplan A., Berkowicz S., (2004b). Dew and Fog Water Collection in Water-Limited Regions. *Rapport de contrat Arc-en-Ciel/Keshet pour 2003* - Projet 58, 25 p.

Beysens D., Mylymuk I., (2005a). À la poursuite des fontaines aériennes. Les incroyables aventures de Français en Ukraine. Editeur : book-e-book/Collection : Zététique.

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

Beysens D., Muselli M., Milimouk I., Ohayon C., Berkowicz S., Soyeux E., Mileta M., Ortega P., (2005c). Passive Radiative Condensers To Extract Water From Air. *Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, II, 471-480

Beysens D., Mileta M., Milimouk I., Muselli M., Clus O., Nikolayev N., (2005d), Collecting dew to improve water resources: the D.E.W. project in Biševo (Croatia). *The 3rd Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 162-166.

Beysens D., (2006a). Dew nucleation and growth. *C. R. Physique*, 7, 1082–1100

Beysens D., Ohayon C., Muselli M., Clus O., (2006b). Chemical and bacterial characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bordeaux, France). *Atmospheric Environment*, 40, 3710–3723

Beysens D., Muselli M., Milimouk I., Ohayon C., Berkowicz S., Soyeux E., Mileta M., Ortega P., (2006c). Application of Passive Radiative Cooling for Dew Condensation. *Energy*, 31-13, 2303-2315

Beysens D., Mileta M., Milimouk I., Muselli M., Clus O., (2007a). Collecting dew to improve water resources: the D.E.W. project in Biševo (Croatia).*Energy*, 32-6, 1032-1037

Beysens D., Clus O., Mileta M., Milimouk I., Muselli M., (2007b). Dew Water Resources In Dalmatia (Croatia) : Estimation, Quality, Operation. *4th Croatian Conference on Water*, Opatija, 16 – 19/5

Boullier P. et Le Chapellier M., (1984). *Colloque Météorologie et Energies Renouvelables*, Valbonne, 632-653

Box G.E.P, Jenkins G.M., (1976). Time series analysis, forecasting and control. San Francisco: Holden-day.

Chang, T.Y., G.Kuntasal, Pierson W.R., (1987). Night-time N_2O_5/NO_3 chemistry and Nitrate in dew water. *Atmospheric Environment*, 21, 1345-1351

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

Chou K.C., Cortis R.B., (1981). Simulation of hourly wind speed and array wind power. *Solar Energy*, 26, 199-212

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) 11-13/7

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), 30/11-1/12

Clus O., (2007a). Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source d'eau douce. Thèse de doctorat, Université de Corse, codirecteurs : D.BEYSENS, M.MUSELLI, 10/4/2007, 223 p.

Clus O., Ortega P., Muselli M., Milimouk I., Beysens D., (2007b). Dew Water Physical and Chemical Characteristics in Tropical Climate (French Polynesia). *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Clus O., Mileta M., Milimouk-Melnytchouk I., Muselli M., Nikolayev V.S., Beysens D., (2007c). Roofs as Dew Collectors: II. Polycarbonate in Biševo Island (Croatia). *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Clus O., Muselli M., Beysens D., (2007d). Cfd Numerical And Experimental Study of Dew Collectors Architecture: The Cone Compared to The Plane. *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Clus O., SharanG., Singh S., Muselli M., Beysens D., (2007e). Simulating and Testing a Very Large Dew and Rain Harvester in Panandhro (NW India). *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Collares Pereira M., Rabl A., (1979). The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolations values. *Solar Energy*, 22, 2, 155-164

Conradsen K., Nielsen L.B., Prahm L.P., (1984). Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. *Journal of Climatology and Applied Meteorology*, 23, 1173-1183

Daniel A.R., Chen A.A., (1991). Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequences in Jamaïca. *Solar Energy*, 46, 1, 1-11

Deb Mondol J., Yohanis Y.G., Norton B., (2006). Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. *Solar Energy*, 80, 12, 1517-1539

De Miguel A., Bilbao J., Aguiar R., Kambezidis H. et Negro E., (2001). Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean belt area. *Solar Energy*; 70, 2, 143-153

Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A., (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy*, 28, 4, 293-302

Fabero F., Alonso-Abella M. et Chenlo F., (1997). Influence of irradiation variations on PV systems at différents time scales. *Proc. of the 14th European PV Solar Energy Conference*, Barcelone, 2299-2302

FAO, (2007). *Organisation des Nations Unis pour l'Agriculture et le Développement*, www.fao.org

Foster, J.R., R.A. Pribush, R.A., CarterB.H., (1990). The Chemistry of Dews and Frosts in Indiapolis, Indiana. *Atmospheric Environment*, Part A. General Topics, 24, 2229-2236

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

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

Gleason M.L., Taylor S.E., Loughin T.M., Koehler K.J., (1994), Development and Validation of an Empirical Model to Estimate the Duration of Dew Periods, *Plant Discussion*, 78, 1011-1016

Goudriaan J., (1977). Crop Micrometeorology : a Simulation Study. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen

Graham V.A., Hollands K.T.G., et Unny T.E., (1987). Stochastic variation of hourly solar radiation over the day. *ISES Solar World Congress*, 3796-3800

Guyot G., (1999). Climatologie de l'environnement, *2d edition, Dunod France*, book, 507p

Hay L.E. et Davies J.A., (1980). Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, **59**, 59-72

Henschel J., Siteleta V., Berkowicz S.M., Beysens D., Milimouk M., Muselli M., Heusinkveld B.G., Jacobs A.F.G., (2007). Dew Occurrence and Collection in Gobabeb, Central Namib Desert. *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Hollands K.G.T., (1985). A derivation of the diffuse fraction's dependence on the cleamess index. *Solar Energy*, 35, 2, 131-136

Hollands K.T.G. et Crha S.J., (1987). An improved model for diffuse radiation: correction for atmospheric back-scattering. *Solar Energy*, 38, 4, 233-236

Iqbal M., (1983). An introduction to solar radiation. *Academic Press*.

Jacobs A.F., Heusinkveld B.G., Berkowicz S.M., (2000). Dew Measurements along a Longitudinal Sand Dune Transect, Negev Desert, Israël, *International Journal of Biometeorology*, 43-4, 184-190

Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Berkowicz S., (2004). Dew and Fog Collection in a Grassland Area, The Netherlands. *Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, Cape Town, South Africa

Janssen L.H.J.M., Römer F.G., (1991). The Frequency and Duration of Dew Occurrence over a Year, *Tellus*, 43B, 408-419

Jiries A., (2001). Chemical composition of dew in Amman. *Atmospheric Research*, 37, 261-268

Joukov N.N., (1931). Sur les constructions hydro-techniques anciennes dans les environs de Theodosia. T*raduction: Report CEA-SACLAY 1995*, DIST Ref. 95002495

Justus C.G., (1978). Wind energy statistics fir large array of wind turbines. *Solar Energy*, 20, 379-386

Klein S.A., (1977). Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23, 2, 526-541

Kamal L., Jafri Y.Z., (1997). Time series model to simulate and forecast hourly averaged wind speed in Quetta, Pakistan. *Solar Energy*, 61, 1, 23-32

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., Awanou C., (1999). Evaluation of the Amount of the Atmospheric Humidity Condensed Naturally, *Renewable Energy*, 18, 223-247

Krhis S., (1997). Contribution de modèles de turbulence du premier ordre à la simulation numérique d'écoulements aérodynamiques en situation hors équilibre, *Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, Marseille*, 08/10/1997, (to-day: OPTIFLOW Company).

Laurent V., Maamaatuaiahutapu K., Maiau J., Varney P., (2004). Atlas climatologique de la Polynésie Française. *Météo France*, book, 201p

Le Roy M., (1751). Mémoire l'élévation et la suspension de l'eau dans l'air, et sur la rosée. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 481-518

Liu B.Y.H., Jordan R.C., (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar insolation. *Solar Energy*, 4, 3, 1-19

Liu B.Y.H., Jordan R.C., (1963). A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat plate solar energy collector. *Solar Energy*, 7, 1, 53

Louche A., Notton G., Poggi P., Simmonot G., (1991). Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy*, 46, 4, 255-259

Luna R.E., Church A.W., (1974). Estimation of long-term concentration using an « universal » wind speed distribution. *Journal of Applied Meteorology*, 13, 910-916

Luo W., Goudriaan J., (2000). Dew Formation on Rice under Varying Durations of Nocturnal Radiative Loss, *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 303-313

Lushiku E.M., Kivaisi R.T., (1989). Optical properties of obliquely evaporated aluminium films. *Proceedings SPIE*, 1149, 111-114

Madeira A.C., Kim K.S., Taylor S.E., Gleason M.L., (2002). A simple Cloud-Based Energy Balance Model to Estimate Dew. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 55-63

Maxwell E.L., (1987). A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation", Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy Research Institute, Golden, CO

Ménard G., (1990). Méthodes de prévision à court terme. Statistiques en mathématiques appliquées. Editions de l'Université de Bruxelles

Meurer C., Bartels H., Brocke W.A., Emonts B., Groehn H.G., (1999). PHOEBUS – An Autonomous Supply System with renewable Energy: six years of operation experience and advanced concepts. *Solar Energy,* 67, 1-3, 131-1348

Mileta M., Muselli M., Beysens D., Berkowitz S., Milimouk I., Clus O., Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.J., (2004). Comparison of dew yields in 4 Mediterranean sites: similarities and differences. *Third International Conference on Fog and Fog Collection*, Cape Town, South Africa, October, 11-15, E4

Mileta M., Beysens D., Nikolayev V.N., Milimouk I., Clus O., Muselli M., (2006). Fog and dew collection projects. *Water Observation and Information System for Decision Support*, Balwois

Milimouk I., Beysens D., Muselli M., Nikolayev V.N., Narhe R., (2004). Dew in island, coastal and alpine areas. *Third International Conference on Fog and Fog Collection*, Cape Town, South Africa, October, 11-15, H11

Monteith J.L., Unsworth M.H., (1990). Principles of Environmental Physics, *Second Ed, Chapman & Hall*, New York, book, 291p

Morgan V.T., (1995). Statistical distributions of wind parameters at Sydney, Australia. Renewable Energy, 6, 1, 39-47

Muselli M., (1997). Electrification de sites isolés. Dimensionnement de systèmes hybrides à sources renouvelables d'énergie. Thèse de Doctorat, Université de Corse.

Muselli M., Notton G., Canaletti J.L., Louche A., (1998a).Utilization of METEOSAT satellite-derived radiation data for integration of autonomous photovoltaic solar energy systems in remote areas. *Energy Conversion and Management*, 39, 1/2, 1-19

Muselli M., Poggi P., Notton G., Louche A., (1998b). Improved procedure for stand-alone photovoltaic systems sizing using METEOSAT satellite images. *Solar Energy*, 62, 6, 429-444

Muselli M., Notton G., Louche A., (1998c). Design and operation of PV-hybrid systems to supply small rural load power. *2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion*, Vienne, 2958-2961

Muselli M., Notton G., Louche A., (1999). Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. *Solar Energy,* 65, 3, 143-157

Muselli M., Poggi P, Notton G., Louche A., (2000a). Classification of typical meteorological days from global irradiation records and comparison between two Mediterranean coastal sites in Corsica island. *Energy Conversion and Management,* 41, 10, 1043-1063

Muselli M., Notton G., Poggi P., Louche A., (2000b). PV-Hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations. *Renewable Energy*, 20, 1, 1-7

Muselli M., Beysens D., (2001). Physical and chemical characteristics of dew at Ajaccio (Corsica island, France). *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St John's, Newfoundland, Canada, 15-20/7/2001, 313-316

Muselli M., Beysens D., Marcillat J., Milimouk I., Nilsson T., Louche A., (2002a). Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France), *Atmospheric Research*, 64, 297–312

Muselli M., Beysens D., Nikolayev V.N., Louche A. (2002b). Etude d'un Condenseur Radiatif de l'Humidité Atmosphérique utilisé comme Source Alternative en Eau. Partie I : Potentiel de Rosée (Ajaccio, France). *Colloque Environnement et Identité en Méditerranée*, Corté, 3-5/7/2002, France, 281-283

Muselli M., Beysens D., Marcillat J., Nilsson T., Nikolayev V., Louche A., (2002c). Etude d'un condenseur radiatif de l'humidité atmosphérique utilisé comme source alternative en eau. Partie II : conception et performances du prototype 1. *Colloque Environnement et Identité en Méditerranée*, Corté, 3-5/7, France, 284-286

Muselli M., Beysens D., Milimouk I., (2004a). Comparative dew yields from two large planar dew condensers. *Third International Conference on Fog and Fog Collection*, Cape Town, South Africa, October, 11-15, H12

Muselli M., Clus O., Beysens D., (2004b). 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., Soyeux E., Beysens D., Clus O., (2006a). Is dew potable? Study of the physical, chemical and biological dew characteristics in Ajaccio (France). *J. of Environmental Quality*, 35, 1812-1817

Muselli M., Beysens D., Milimouk I., (2006b). A comparative study of two large radiative dew water condensers. *Journal of Arid Environments*, 64, 54–76

Nfaoui H., Buret J., Sayigh A.A.M., (1997). Stochastic simulation of hourly average wind speed sequences in Tangiers, Morocco. *Solar Energy*, 56, 3, 301-314.

Nikolayev V.N., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J. P., (1996). Water recovery from dew. *Journal of Hydrology*, 182, 19-35

Nikolayev V.N., Beysens D., Muselli M., (2001). A Computer model for assessing dew/frost surface deposition. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St John's, Newfoundland, Canada, 15-20/7, 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

Notton G., Muselli M., Louche A., (1996a). Two estimation methods for monthly mean hourly total irradiation on tilted surfaces from monthly mean daily horizontal irradiation solar radiation data of Ajaccio, Corsica. *Solar Energy*, 57, 2, 141-153

Notton G., Muselli M., Poggi P., Louche A., (1996b). Autonomous photovoltaic systems: influencies of some parameters on the sizing, simulation time-step, input and output power profiles. *Renewable Energy*, 7,4, 353-369

Notton G., Muselli M., (1998a). Utilisation rationnelle de l'énergie et énergies renouvelables, des alliés incontestables : application à une production décentralisée d'électricité photovoltaïque. *Revue de l'Énergie*, 498, 300-310

Notton G., Muselli M., Poggi P., (1998b). Costing of a stand-alone photovoltaic system. *Energy*, 23, 4, 289-308

Notton G., Muselli M., Poggi P., Louche A., (2000). Etude d'un Système de Production d'Electricité Multisource Photovoltaïque-Batteries-Groupe Electrogène. Application à une Région de Méditerranée. *Colloque sur l'Héliothermie, l'Environnement, et la Maîtrise des Systèmes Solaires*, 13-16/5/2000, Blida, 305-310

Notton G., Muselli M., Poggi P., Louche A., (2001a). Decentralized wind energy systems providing small electrical loads in remote areas. *International Journal of Energy Research*, 25, 141-164

Notton G., Cristofari C., Poggi P., Muselli M., (2001b). Wind hybrid electrical supply system : behaviour simulation and sizing optimization. *Wind Energy*, 4, 43-59

Notton G., Cristofari C., Poggi P., Muselli M., (2002). Calculation of solar irradiances profiles for hourly data in view of energy systems behavior simulation. *Renewable Energy*, 27, 1, 123-142

Notton G., Muselli M., Cristofari C., Poggi P., Louche A., (2003). Validation de modèles pour la détermination de la composante diffuse du rayonnement solaire sur une surface horizontale à partir de l'irradiation globale. *Congrès International « Pour une Méditerranée Durable »*, Hammamet, 10-13/12/2003, 4 p.

Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., (2004). Calculation on an hourly basis of solar diffuse irradiations from global data for horizontal surfaces in Ajaccio. *Energy Conversion and Management*, 45, 18-19, 2849-2866

Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., Heraud N., (2006). Hourly solar irradiation estimations : from horizontal measurements to inclined data. *IEEE First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area (ISEIM 2006)*, Corté, 10-13/7/2006

Oberti P., Muselli M., Poggi P., Notton G., (2005). Parcs Eoliens, Approche Territorial et localisation multicritère participative : Etat d'Avancement d'une Etude Pilote sur la Commune de Bonifacio. *Université Citoyenne d'Eté, Développement économique, Environnement, Espace D3E*, Corté, 4-10/07/2005, http://d3e.c3ed.uvsq.fr

Oberti P., Muselli M., Poggi P., (2006a). Wind farms territorial integration in Corsica : Methodology and case study in Bonifacio. *IEEE First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area (ISEIM 2006)*, Corté, 10-13/7/2006

Oberti P., Muselli M., Poggi P., (2006b). Étude pilote sur la localisation participative de parcs éoliens en région Corse (2004-2006)., *Agence de Développement Economique de la Corse*, 70p.

Ohishi M., Shimono K., Adachi M., (2007). Optical properties and radiative cooling power of white paint. Meisei Industrial Co., Ltd., Hosoe-cho, Inasa-gun, Shizuoka, Japan ; (web) *note technique*

Olsen T.L., McKenna E., (1996). Hybrid energy system cost analysis : San Nicolas Island, California, *National Renewable Energy Laboratory*, Report NREL/TP-440-21120

OPUR (2005). Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée. www.opur.u-bordeaux.fr, bulletins techniques.

Orgill J.E. et Hollands K.G.T., (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19, 4, 357-359

Ortiz V., Rubio M.A., Lissi E.A., (2000). Hydrogen peroxide deposition and decomposition in rain and dew waters. *Atmospheric Environment*, 34, 1139-1146

Pagès J.,Chaboud C., Laloé F., Sagna P., Sow I., (1998). Un appoint d'eau douce dans les îles du Saloum ? Etude expérimentale des possibilités de production locale d'eau douce. *Doc. sci. Centre Rech. Oceanoge. Dakar-Thiaroye*, 112, 31 p.

Pallabazzer R., (1995). Evaluation of wind-generator potentiality. *Solar Energy*, 55, 49-59

Pedro M.J., Gillepsie T.J., (1982)a. Estimating Dew Duration. I. Utilising Micrometeorological Data. *Agricultural Meteorology*, 25, 283-296

Pedro M.J., Gillepsie T.J., (1982)b. Estimating Dew Duration. II. Utilising Standard Weather Station Data. *Agricultural Meteorology*, 25, 297-310

Peippo K., Lund P.D., (1994). Optimal sizing of grid-connected PV-systems for different climates and array orientations : a simulation study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 35, 445-451

Poggi P., Muselli M., Notton G., Cristofari C., Louche A., (2003). Forecasting And Simulating Wind Speed In Corsica By Using An Autoregressive Model. *Energy Conversion and Management*, 44, 20, 3177-3196

Poggi P., Muselli M., Notton G., Cristofari C., Nedeltcheva S., (2004). First Experimental PV Grid-Connected System Studied in Corsica (France) : Modelization and 3 Years of Performances. *19TH European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, 07-11/6/2004, Paris, 2920-2923

Poggi P., Muselli M., Cristofari C., Darras C., Serre-Combe P., Le Naour F., (2006a). Hybrid system photovoltaic array – wind turbine – electrolyzer – fuel cells modelling and simulating'

Fuel Cells Seminar, Honolulu, 13-18/11 Hawai

Poggi P., Muselli M., Cristofari C., Notton G., Heraud N., (2006b). Lessons learned of five years of performance of a photovoltaic system connected to an islander electrical grid. *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresde

Poggi P., Muselli M., Cristofari C., Darras C., Serre-Combe P. Le Naour F., (2007). Modeling and simulating of an energetic complex system constituted by a photovoltaic array, a wind turbine, an electrolyzer and fuel cells. *ECS Transaction*, In press

Poissant Y., Thevenard D, Turcotte D., (2004). Performance monitoring of the Nunavut arctic college 3.2 kW grid–connected PV system. *SESCI Conference*, University of Waterloo, PV-38

Powell W.R., (1981). An Analytical expression for the average output power of a wind machine. *Solar Energy*, 26, 77-80

Rajvanshi A.K., (1981). Large scale dew colllection as asource of fresh water supply. *Desalinisation*, 36, 299-306

Reddy M.S., Navin Chandra D. J., Sehgal H. K., (1983). Dabberwal S.P. Performance of a Multiple – wick Solar Still with Condenser. *Applied Energy*, 13, 15-21

Rubio M.A., Alverado L., Villena G., Pizarro J., Lissi E., (2003). Deposition, decomposition and stabilization of peroxides in Santiago City dew waters. *The Science of the Environment*, 313, 115-125

Sacré C., (1984). *Colloque Météorologie et Energies Renouvelables*, Valbonne, 615-630.

Santarelli M., Macagno S., (2004). A thermoeconomic analysis of a PV-Hydrogen system feeding the energy requests of a residential building in an isolated valley of the Alps. *Energy Conversion and Management, 45,* 427-451

Scharwartz M.N., Eliott D.L., (1997). Mexico wind resource assessment project. *CEPEL*, Rie de Janeiro

Schemenauer R., Cereceda P., Suit M., (1992). An alternative water supply for Chilean coastal desert villages. *Water resources Development,* 8, 53-59

Sharan G., (2006). Dew Harvest To Supplement Drinking Water Sources in Arid Coastal Belt of Kutch. *Centre for Environmental Education*, India. Book

Sharan G., Clus O., Milimouk-Melnitchouk I., Beysens D., Muselli M., (2007a).Roofs as dew collectors: III. Special Polyethylene foil on a school in Sayara (NW India). *Fourth International Conference on Fog and Fog Collection*, City of la Serena, Chile, 22-27/7

Sharan G., Beysens D., Milimouk I., (2007b). A Study of dew Water Yields on Galvanized Iron roof in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environment*, 69, 259–269

Skartveit A. et Olseth J.A., (1987). A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, 38, 4, 271-274

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

Soller A., (1992). Dependence on solar elevation and the daily sunshine fraction of the correlation between monthly-average-hourly diffuse and global radiation. *Solar Energy*, 48, 4, 221-225

Spencer J.W., (1971). Fourier series representation of the position of the Sun. *Search*, 2, 5, 172

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

Wahlren R.V., (2001). Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review. *Water Research*, 35 (1), 1-22

Wang M., Nehrir M.H., (2001). Fuel Cell modelling and Fuzzy Logic-Based Voltage Control. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, 3, 2, 320-323

Weiss A., (1990). Leaf Wetness : Measurements and Models. *Rem. Sens. Revues*, 5, 215-224

ANNEXE I

ANNEXE I

COEFFICIENTS STATISTIQUES DE VALIDATION DES MODELES

Dans ce mémoire, la validation des modèles mathématiques développés pour la caractérisation du rayonnement solaire s'appuie sur plusieurs coefficients statistiques « classiques » définis par :

MBE (Mean Bias Error) :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - x_i)}{N}$$

RMBE (Relative Mean Bias Error) :

$$RMBE = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{(y_i - x_i)}{x_i}}{N}$$

RMSE (Roor Mean Square Error) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(y_i - x_i\right)^2}{N}}$$

RRMSE (Relative Root Mean Square Error) :

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{y_i - x_i}{x_i}\right)^2}{N}}$$

où y_i est la i^{ème} valeur estimée, x_i est la i^{ème} valeur mesurée et N le nombre d'observations.

« SYSTEMES ENERGETIQUES POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE ET D'EAU DOUCE POTABLE »

Résumé :

Les sources renouvelables (solaire, éolien, vapeur d'eau atmosphérique) représentent des solutions alternatives intéressantes pour répondre aux besoins de certaines populations isolées sans électricité et en stress hydrique (moins de 15 L d'eau par jour). Des condenseurs radiatifs de production d'eau douce potable ont été élaborés par l'utilisation d'un phénomène naturel (refroidissement radiatif) ne nécessitant pas d'apport d'énergie. Depuis 2000, l'Université de Corse, le CEA et le CNRS se sont conventionnés pour développer des outils et des technologies performantes pour effectuer la transition entre des prototypes de laboratoire et des systèmes réels. Afin de s'approcher du rendement théorique maximum (0,8 L m^{-2}), des protocoles de mesure, puis des prototypes « plan » de 30 m² ont été construits. Un code numérique (CFD) a été développé pour estimer les performances de systèmes complexes à grande échelle (plusieurs centaines de m²) avant leur installation. De nouveaux matériaux de condensation faisant l'objet d'un brevet déposé, sélectifs en longueur d'onde, ont été formulés pour répondre à la fois à des contraintes de climatisation passive des bâtiments en cycle diurne et de production d'eau en cycle nocturne. En partenariat avec l'association OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr), une toiture de démonstration de 15,1 m² à Biševo en Croatie (0,181 mm en moyenne), ainsi qu'une usine de production de 850 m² (15000 m² à terme) confirment le potentiel de la technologie puisque les rendements attendus pourront atteindre 5 m^3 d'eau par jour. Parallèlement, le solaire et l'éolien, dans un système hybride de production d'énergie décentralisée (couplés avec une source auxiliaire type fossile ou hydrogène) peuvent pallier l'absence d'électrification de certaines régions du Globe. Dans ce mémoire, des codes de calcul de dimensionnement de ces systèmes ont été élaborés pour une optimisation physique et économique de ces techniques répondant soit à l'électrification de sites isolés soit à la production massive d'électricité par connexion à un réseau de distribution pour différentes applications (relevage de chutes de tension ou production en continu). Les résultats obtenus permettent d'envisager l'utilisation du couplage EnR-H_2. A ce titre, notre équipe de recherches a obtenu le financement d'une centrale PV-H_2 sur le site du laboratoire : 3,6 MW couplé à un électrolyseur et une pile à combustible de puissance de plus de 100 kW.

Abstract :

Renewable sources (solar, wind, atmospheric vapour) represent interesting alternative solutions to meet the needs of isolated populations in water stress (less than 15 L per day) and without electricity . Radiative condensers of atmospheric humidity can produce potable fresh water thanks to a passive natural phenomenon (radiative cooling) that does not require conventional energy. Since year 2000, the University of Corsica, CEA and CNRS have officially agreed to develop the tools to carry out the transition between laboratory prototypes and real systems. In order to approach the maximum theoretical yield (0.8 L m^{-2}), large planar prototypes of 30 m² were built and several protocols of measurement have been elaborated. A numeric digital code (CFD) was developed to determine the performances of complex systems on a large scale (several hundreds of m²) before their installation. New radiative materials for condensation being the subject of a patent deposited, selective in wavelength, were formulated to answer both the constraints of passive air-conditioning of constructions in diurnal cycle and water production in the night cycle. With the help of the OPUR association (www.opur.u-bordeaux.fr), a demonstration roof of 15.1 m² in Biševo-Croatia (annual average yield: 0.18 mm) and a dew production plant of 850 m² (15000 m² planned) was set up. They confirm the potential of technology since the expected plant production will be able to reach 5 m^3 of water per day. In similar terms, the solar and wind resources, in a hybrid system of decentralized energy production (coupled with a fossil or hydrogen standard auxiliary source) can mitigate the absence of electrification in certain areas. In this manuscript, computer codes were worked out for physical and economic optimization, concerning either the electrification of isolated sites or the massive production of electricity by connection to a distribution network, for various applications (continue production or voltage drops limitation). The obtained results make it possible to

consider the use of a coupling EnR-H_2. For this reason, our research team obtained the financing of a PV-H_2 power plant on the site of the laboratory: 3.6 MW coupled to an electrolyser and a fuel cell of power of more than 100 kW.

Mots clefs / Keywords : Refroidissement radiatif ; film thermoplastique ; peinture ; condenseur de rosée ; eau douce ; systèmes photovoltaïques ; dimensionnement ; énergies renouvelables ; irradiation globale ; pile à combustible/ radiative cooling ; CFD numerical simulations ; thermoplastic film ; paint ; dew condenser ; fresh water, PV Systems ; sizing ; renewable energies ; global irradiation ; fuel cell