

## PRODUIRE DE L'EAU EN MILIEU ARIDE : SOLUTIONS ALTERNATIVES ISSUES DE L'ETUDE DES ECOSYSTEMES.

### WATER PRODUCTION IN ARID SURROUNDINGS: ALTERNATIVE SOLUTIONS COMING FROM ECOSYSTEMS STUDY.

Par Gilles BORNERT<sup>1</sup>, Lahcen BOUKBIR<sup>2</sup>, Florence CALVET<sup>3</sup>, Olivier KOEHLE<sup>4</sup>, Makram JAAFAR<sup>5</sup> et Pauline BORNERT<sup>6</sup>

#### RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel de raréfaction des ressources naturelles en eaux douces exploitables pour la consommation humaine, de réchauffement climatique et de croissance de la population mondiale, des approches alternatives sont développées en vue de capter l'eau présente dans l'atmosphère. L'observation des écosystèmes des milieux arides permet de proposer différentes stratégies d'exploitation des brouillards et rosées. Les filets à brouillard et condenseurs passifs de rosée se caractérisent par de faibles coûts de production, mais leurs rendements restent limités et très dépendants des conditions météorologiques. Ils représentent des solutions d'appoint pour l'approvisionnement en eau de populations économiquement défavorisées. Les condenseurs actifs de vapeur d'eau atmosphérique permettent une production d'eau en quantités importantes, de manière totalement autonome, sous réserve d'une hygrométrie suffisante. Ils constituent une perspective majeure pour l'avenir de la production d'eau.

**Mots-clés :** eau, atmosphère, condensation, rosée, brouillard.

#### SUMMARY

*The scarcity of raw water natural resources for human consumption, global warming and the increasing human population lead to developing alternative solutions to exploit atmospheric water. The observing of ecosystems in arid environments makes it possible to submit various strategies for fog and dew use. Water nets and passive dew collectors are characterized by low production costs, but their productivity remains limited and depends on meteorological conditions. They must be regarded as helper solutions for the most vulnerable populations. Active atmospheric water condensing devices make great autonomous water production possible, if air hygrometry is sufficient. They are to be considered as a major perspective for water production in the future.*

**Key words:** water, atmosphere, condensation, dew, fog.

(1) DMV, Professeur agrégé du Service de santé des armées. Direction régionale du service de santé des armées de Brest, BCRM Brest - DRSSA - CC5 - 29240 Brest Cedex 9.

(2) DMV, Laboratoire de contrôle et de sécurité alimentaire, 1er chenil des forces armées royales, Benslimane (Maroc).

(3) DMV, Direction régionale du service de santé des armées de Saint-Germain-en-Laye.

(4) DMV, Direction régionale du service de santé des armées de Metz.

(5) DMV, Laboratoire militaire d'analyses alimentaires Ras Tabia, Tunis.

(6) Étudiante vétérinaire.

## INTRODUCTION

L'eau est indispensable à la vie et sa présence conditionne l'organisation de tous les types d'écosystèmes. Il s'agit d'une ressource très abondante, en apparence, sur notre « planète bleue », de l'ordre de 1400 millions de km<sup>3</sup> (Muselli, 2007), mais 97 % de ce volume sont en pratique constitués par de l'eau salée et 2 % par de la glace (Clus, 2007). L'eau réellement disponible pour les êtres vivants, douce et à l'état liquide, ne représente donc que 1% de la ressource totale. Les réserves en eau douce sont réparties de manière très inégale entre les régions du monde et leur disponibilité peut être variable selon les périodes de l'année. Un cinquième de la population mondiale vit dans des zones géographiques où l'eau est rare. Le réchauffement climatique est à l'origine d'une accélération de la désertification (Pachauri et Reisinger, 2007), qui contribue à aggraver une pénurie de plus en plus ancrée dans le quotidien de l'humanité.

Les eaux destinées à la consommation humaine proviennent habituellement de l'exploitation de la masse d'eau douce présente dans le milieu naturel. Il s'agit essentiellement de ressources superficielles, lacs ou rivières, ou profondes, accessibles par un puits ou un forage. L'utilisation de l'eau de mer, ressource inépuisable, demeure une solution coûteuse, impliquant une technologie lourde pour en assurer le dessalement. Elle ne constitue donc une option acceptable que pour les pays riches, en zone littorale (Ihrig *et al.* 2008).

Pour faire face à l'insuffisance de ces ressources traditionnelles, la recherche de solutions alternatives pour produire de l'eau est devenue une réelle priorité pour les pouvoirs publics. Les principales approches de remplacement consistent à capter l'eau présente dans l'atmosphère, en reproduisant des phénomènes observés chez certains animaux et végétaux des milieux arides. Des solutions technologiques fondées sur ce principe ont vu le jour, dont l'intérêt pratique est réel. Les plus anciennes assurent un recueil passif des brouillards et rosées. Les procédés les plus récents permettent de capter le vapeur d'eau atmosphérique de manière active.

## L'EAU DANS L'ATMOSPHÈRE

L'eau est présente dans l'atmosphère sous différents états, de sorte que sa collecte peut être réalisée selon divers mécanismes.

### États de l'eau dans l'atmosphère

Le cycle de l'eau dans l'environnement consiste en une succession de changements d'état conduisant à des échanges entre différents compartiments : les océans, l'atmosphère, les cours d'eau et étangs et les nappes souterraines. L'essentiel de l'alimentation de ce cycle est obtenu par vaporisation des eaux depuis le milieu marin, permettant la formation de nuages. La redistribution s'effectue ensuite lors du déversement de l'eau contenue dans les nuages, sous forme de pluie qui alimente les cours d'eau. Si la pluie est le phénomène naturel le plus évident qui témoigne de la présence d'eau dans l'atmo-

sphère, d'autres types de circonstances permettent la condensation de l'eau vaporisée dans l'air et la formation de microgouttelettes à partir de la vapeur atmosphérique. Il en résulte la formation des brouillards, lorsque les gouttelettes d'eau demeurent en suspension dans l'air, ou de rosée lorsque l'eau se dépose sur un support. D'un point de vue physique, la formation de gouttelettes à partir de la vapeur d'eau atmosphérique résulte du changement de phase caractérisé par des conditions de température et de pression. Des microgouttelettes se forment au contact d'un support. Ce phénomène initial, qualifié de nucléation, implique que la température du support soit inférieure à une valeur seuil qualifiée de température de rosée, fonction de l'hygrométrie. Dans ces conditions, la vapeur d'eau au voisinage du support est thermodynamiquement instable et le passage à la phase liquide est indispensable pour atteindre l'état d'équilibre. Le changement de phase est limité par les forces de tension superficielle à l'interface liquide-vapeur, qui constituent une barrière énergétique. L'efficacité de la nucléation dépend aussi des propriétés de surface du support. Dès lors que la nucléation s'est produite, la microgouttelette d'eau constitue un noyau de condensation sur lequel peuvent venir se fixer d'autres molécules d'eau, permettant la croissance de la goutte, qui peut ensuite fusionner avec des gouttes voisines. La condensation de buée sur une surface froide peut donc se caractériser comme une perte de chaleur, au sens thermodynamique, dans un changement de phase gaz-liquide, de sorte que la diminution de l'agitation moléculaire se traduit par une transition de phase vers de l'eau condensée (Monteith & Unsworth 1990).

Le brouillard (Jacobs *et al.* 2002) est un amas de fines gouttelettes d'eau ou de fins cristaux de glace. Sa composition et le processus de sa formation sont identiques à ceux d'un nuage, dont la base toucherait le sol. Il résulte essentiellement du refroidissement d'un volume d'air jusqu'à la condensation d'une partie de la vapeur d'eau qu'il contient (Agama & Berlinera, 2006). La condensation de la vapeur d'eau se produit initialement autour de certains types de microparticules de matière solide en suspension dans l'air. Ce phénomène n'étant pas d'une intensité suffisante, il n'aboutit pas à des précipitations. Le refroidissement qui mène à la condensation résulte le plus souvent de la chute de la température la nuit, mais peut aussi être observé lors du passage d'une masse d'air au-dessus d'une surface froide. Le premier cas de figure correspond à ce qu'il est convenu d'appeler un brouillard radiatif, formé la nuit lorsque le ciel est dégagé et les vents faibles. La température près du sol diminue, du fait de la capacité du sol à diffuser, sous forme de rayonnement infrarouge, la chaleur qu'il a emmagasinée durant la période d'ensoleillement diurne. Cette baisse de température ne se transmet pas aux couches supérieures de l'atmosphère par manque de turbulences et, dans les conditions naturelles, n'excède pas dix degrés (Beysens *et al.* 2006). Au niveau de la couche d'air qui se refroidit, la vapeur d'eau se condense et les microgouttelettes d'eau en suspension constituent la couche de brouillard. Dans le cas des brouillards d'advection, la masse d'air humide circule au contact d'une surface froide, ce qui entraîne la condensation d'une partie de la vapeur d'eau.

La présence de microgouttelettes d'eau en suspension dans l'air aboutit aussi généralement à la formation de la rosée, dès lors que ces gouttelettes rencontrent un support permettant leur coalescence (Jacobs *et al.* 2002). Il peut s'agir de plantes, dans le cas le plus général, ou d'objets divers. La rosée résulte donc d'un même phénomène physique que le brouillard. Elle apparaît essentiellement lorsque la nuit est claire et calme, sans vent, de sorte que le refroidissement radiatif est maximal. Cependant, les volumes d'eau déposés ne dépendent pas uniquement de facteurs climatiques et sont très largement influencés par la nature du support sur lequel l'eau atmosphérique est susceptible de se déposer (Beysens *et al.* 2005).

### Approche quantitative

Les eaux souterraines constituent la réserve d'eau douce la plus abondante, de l'ordre de 10,5 millions de km<sup>3</sup> (Muselli, 2007), tandis que les rivières et lacs ne représentent que 0,1 million de km<sup>3</sup>. Les précipitations atmosphériques, qui alimentent les réserves d'eaux douces superficielles et profondes, sont estimées à 13.000 km<sup>3</sup> par an (Muselli, 2007). L'eau atmosphérique ne représente que 0,4 % des réserves totales en eaux douces (Muselli, 2007), soit tout de même 12900 km<sup>3</sup> d'eau inexploitées. Ce volume équivaut au total des précipitations annuelles, de sorte qu'il existe là un potentiel majeur de production d'eau pour la consommation humaine.

## UTILISATION DE L'EAU ATMOSPHÉRIQUE PAR LES ÉCOSYSTÈMES

De nombreux êtres vivants du milieu désertique ont démontré une capacité à exploiter l'eau atmosphérique pour répondre à leurs besoins physiologiques. La rosée est connue comme constituant une source d'eau très utile à la survie des lichens et des mousses (Lange *et al.* 1992 ; Kidron *et al.* 2002), mais aussi de divers invertébrés (Agama & Berlinera 2006 ; Moffett 1985 ; Degen *et al.* 1992 ; Shachak *et al.* 2002). Elle participe, en se déposant à la surface du sol, à apporter de l'eau aux écosystèmes et peut constituer, en milieu aride, la seule source d'eau pour les êtres vivants.

Plus spectaculaire est le développement par certains animaux d'une véritable stratégie leur permettant de recueillir les gouttelettes d'eau des brouillards. Cette observation a été effectuée notamment chez des coléoptères du désert, en Namibie (Parker & Lawrence, 2001 ; Naidu 2001). Ce désert est caractérisé par une absence quasi-totale de précipitations, tout au long de l'année. Il possède cependant une faune très riche et très spécifique au niveau de la dune côtière, balayée par de puissants vents marins qui transportent des brumes de mer en direction de la terre. L'étude réalisée chez les coléoptères du genre *Stenocara* (Figure 1), qui colonisent la dune littorale, démontre une adaptation comportementale de ces insectes aux conditions spécifiques de leur milieu de vie. Chaque matin, ces animaux se disposent au sommet de la dune, face au vent, élytres déployées. L'eau ruisselle sur la surface cirée des élytres et est absorbée par

l'insecte. L'adaptation de la structure des élytres des *Stenocara* a retenu l'attention des scientifiques dans la mesure où le défi que pose à l'insecte la collecte de l'eau de brouillard est particulièrement complexe. Les microparticules d'eau ne mesurent qu'un à 40 µm de diamètre (Parker & Lawrence, 2001), de sorte qu'elles se déplacent horizontalement dans un flux d'air et, en cas de dépôt sur un support, s'évaporent très rapidement. Le système dont disposent les *Stenocara* consiste en un ensemble de reliefs microscopiques hydrophiles sur lesquels se fixent et croissent rapidement les gouttelettes, puis un dispositif de recueil au niveau d'une trame hydrophobe qui conduit l'eau vers la cavité buccale de l'insecte.

Cette approche de la production d'eau de boisson à partir des brouillards n'est pas spécifique des animaux du désert. Certains végétaux trouvent dans l'interception des brouillards une source d'eau majeure. Ce phénomène est connu sous l'appellation d'arbres à eau en Amérique du Sud, sur le littoral Pacifique. Il est exploité de très longue date par certaines populations humaines. À partir des exemples issus de l'observation de ces différents phénomènes naturels, de nombreux industriels s'efforcent aujourd'hui de proposer des approches à grande échelle d'une exploitation de la présence d'eau dans l'atmosphère, pour répondre aux besoins des populations. Ces dispositifs, dont certains demeurent à l'état de prototypes, retiennent de plus en plus l'attention des acteurs politiques.

## APPLICATION À LA PRODUCTION D'EAU POUR LES BESOINS DE L'HOMME

L'approche technologique visant à exploiter l'eau présente dans l'atmosphère peut revêtir deux aspects essentiels. Dans le premier cas, il s'agit de reproduire le processus naturel de collecte des gouttelettes d'eau formant les brouillards, à l'image de la stratégie développée par les *Stenocara*. On utilise alors essentiellement des filets à brouillard. La seconde approche vise à



**Figure 1** : coléoptère de l'espèce *Stenocara gracilipes* (Parker & Lawrence, 2001). Les élytres de cet insecte présentent une surface d'aspect ciré, constituée d'une succession de reliefs hydrophiles microscopiques au sein d'un maillage hydrophobe. Les gouttelettes de brouillard sont fixées sur les surfaces hydrophiles et entraînées vers la cavité buccale de l'insecte via le réseau hydrophobe.

accélérer le changement de phase de la vapeur d'eau atmosphérique au contact de surfaces froides, recréant et amplifiant le phénomène de rosée. Les surfaces froides peuvent être créées par un mécanisme passif de refroidissement radiatif naturel ou par des dispositifs nécessitant un apport d'énergie.

### Les dispositifs passifs

Les dispositifs de production d'eau à partir de l'atmosphère sont de deux types. Il s'agit, d'une part, des filets à brouillard, et, d'autre part, des collecteurs de rosée. Les filets à brouillard ont l'intérêt de ne nécessiter aucune énergie et font, pour cette raison, l'objet de développements dans le cadre de projets humanitaires.

Ils sont largement utilisés sur la façade littorale de la Cordillère des Andes, où la brume marine est abondante et presque constamment présente (**Figure 2**). Bien que l'air soit chargé en eau, ces régions sont essentiellement arides car les gouttelettes de brouillard, de trop petite taille, sont emportées par les vents. Des filets en polyéthylène sont interposés sur le parcours du brouillard, les mailles servant de surfaces froides pour l'accrochage des gouttelettes. L'eau ruisselle ensuite le long des mailles et peut être recueillie (Jacobs *et al.* 2008). Les principaux projets dans ce domaine sont menés sous l'égide des associations *Fog Quest* ([www.fogquest.org](http://www.fogquest.org)) et *Global Nature* ([www.fundacionglobalnature.org](http://www.fundacionglobalnature.org)). Les résultats obtenus au Chili (Schemenauer *et al.* 1992) témoignent de la possibilité de produire de l'eau à faible coût. Le rendement observé est spectaculaire : en moyenne de l'ordre de trois à cinq litres par mètre-carré de filet et par jour, il peut atteindre 20 litres et il suffit de 10 m<sup>2</sup> de filet pour répondre aux besoins de base d'une personne. Actuellement, de nombreux sites sont équipés de tels disposi-



**Figure 2** : Filet à brouillard (crédits photographiques : Fog Quest®). Le filet est tendu sur le trajet de la brume marine, chargée en microgouttelettes d'eau et permet l'interception de cette eau qui ruisselle le long des mailles.

tifs pour exploiter les conditions climatiques locales. Selon *Fog Quest*, les filets pourraient aussi être positionnés dans les panaches de brouillard créés par des installations humaines comme les tours aéro-réfrigérantes.

Les dispositifs passifs de collecte de rosée ont fait l'objet de nombreuses études, dans diverses régions du monde. Le recours aux films en polyéthylène a permis les avancées les plus significatives dès 1965, avec les travaux de Gindel en Israël (Gindel, 1965), puis, à partir de 1994, grâce à de nombreuses équipes fédérées au sein de l'Organisation pour l'utilisation de la rosée (OPUR : [www.opur.u-bordeaux.fr](http://www.opur.u-bordeaux.fr)). Si, d'une manière générale, la formation de buée (ou de rosée) est observée couramment dès qu'une surface froide est en contact avec de l'air chargé en vapeur d'eau, la préoccupation des concepteurs de ces dispositifs est d'en optimiser le rendement. Les condenseurs de rosée doivent être conçus avec deux objectifs principaux : garantir une nucléation optimale par une diminution des forces de tension superficielle et assurer un refroidissement rapide en période nocturne. La conductivité thermique des matériaux et leur épaisseur sont alors des paramètres déterminants (Muselli, 2007 ; Ihrig *et al.* 2008 ; Kidron, 2010). Les chercheurs utilisent actuellement des microsphères d'oxyde de titane et de sulfate de baryum solidaires d'un réseau de polyéthylène (Nikolayev *et al.* 1996 ; Vargas *et al.* 1998). Ces matériaux polymères garantissent un fort pouvoir émissif, un accrochage efficace des microgouttelettes d'eau, puis leur coalescence, et une récupération quasi-totale de l'eau condensée. La géométrie du dispositif a une influence. Il importe de limiter le réchauffement de sa surface par l'air ambiant, notamment en cas de vent nocturne (Beysens *et al.* 2003). La surface du condenseur doit former un angle de trente degrés avec l'horizontale afin d'optimiser le rendement en eau (Muselli *et al.* 2002). Il s'agit d'un compromis entre une surface de condensation horizontale, qui permet un refroidissement radiatif maximum, et un arrangement vertical qui augmente la collection d'eau par gravité. Les meilleurs résultats ont été décrits avec un dispositif en forme de pyramide inversée (Jacobs *et al.* 2008). Le coût des équipements est faible, soit de l'ordre de quatre centimes d'Euro par litre d'eau produit (Muselli *et al.* 2002). L'exploitation implique cependant de la main d'œuvre. Par ailleurs, la production n'est pas continue tout au long de l'année et demeure très limitée en termes de volume. Le rendement maximal théorique d'une installation de recueil de rosée est de 0,8 L.m<sup>-2</sup> par jour (Monteith, 1957), mais en conditions réelles les valeurs maximales observées sont plutôt de l'ordre de 0,5 à 0,6 L.j<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> (Berkowicz *et al.* 2004 ; Muselli *et al.* 2009 ; Sharan *et al.* 2011 ; Clus, 2007), voire sensiblement moins en zone urbaine (Ye *et al.* 2007). Les rendements sont très inconstants d'un jour à l'autre. D'une manière générale, la collecte de rosée ne peut pas être considérée comme une option suffisante en tant que telle, mais elle doit être considérée comme une méthode d'appoint ou de survie. Elle est particulièrement destinée à assurer des apports en eau dans des régions totalement dépourvues de ressources en eau douce exploitables ou à limiter les conséquences de l'absence de précipitations en saison sèche.

### Dispositifs nécessitant de l'énergie

La recherche d'une meilleure productivité a conduit à développer des approches qualifiées d'actives. Il s'agit de provoquer la condensation de la vapeur d'eau en créant une circulation forcée de l'air au contact de surfaces froides (Clus, 2007). Ces surfaces sont le plus souvent obtenues en ayant recours à un compresseur permettant une succession de changements de phase ou cycles de Carnot : un gaz est comprimé, puis le fluide formé est dirigé vers un évaporateur où il retrouve l'état gazeux. Le passage de l'état liquide à l'état gazeux nécessite un apport de chaleur, de sorte que le fluide en se vaporisant refroidit les surfaces au contact desquelles il se trouve. Le refroidissement des surfaces est aussi obtenu par l'effet Peltier en soumettant, à un courant électrique, un dispositif composé de deux matériaux conducteurs de nature différente, reliés entre eux par des jonctions conductrices. Le « module Peltier » ainsi constitué présente deux faces dont l'une se refroidit, tandis que l'autre s'échauffe. Il est alors possible d'exploiter la surface froide pour accélérer le phénomène de condensation de l'eau atmosphérique, tandis que la face chaude est refroidie par un ventilateur. Par rapport à un système de refroidissement par compresseur, le module Peltier a pour avantages sa simplicité, et donc son faible coût de fabrication, et l'absence de gaz. Il nécessite cependant plus d'énergie. Cette approche technologique de la production d'eau n'est pas réellement récente, mais les premières tentatives ont montré une très faible productivité car l'essentiel des échanges thermiques assurait la production d'air froid sans atteindre le point de rosée (Ihrig *et al.* 2008). Une meilleure compréhension des principes physiques sur lesquels se fonde la production d'eau atmosphérique permet désormais de proposer des équipements (figure 3) dont le débit est sans



**Figure 3 :** Système de production d'eau par condensation active de la vapeur d'eau atmosphérique (crédits photographiques : WaterGen®). Le modèle présenté ici a une capacité de production pouvant aller jusqu'à 500 litres par jour, en conditions optimisées, pour un encombrement de l'ordre de 2 m<sup>3</sup>.

commune mesure avec ceux observés avec les dispositifs passifs. La productivité dépend du débit d'air et de la surface des plaques de condensation, deux éléments clés à prendre en compte dans la réalisation de ces appareils, qui déterminent leurs dimensions. Elle est aussi fonction de l'hygrométrie, qui conditionne la quantité d'eau disponible dans un volume d'air, et de la température ambiante. Plus la température d'air est élevée et plus la production d'eau est abondante (tableau 1). En ce qui concerne l'hygrométrie, les rendements sont fortement réduits dès que les valeurs observées sont inférieures à 50%. On comprend que les principaux débouchés commerciaux actuels de cette technologie soient localisés en région tropicale.

Une variante de ce type de système consiste à récupérer l'eau obtenue par les dispositifs assurant la climatisation d'air. Ces systèmes fonctionnent selon un principe très comparable à celui des condenseurs à eau évoqués plus haut. Mais la condensation de l'eau atmosphérique au cours de la phase de production d'air froid constitue un inconvénient. Les climatiseurs actuels ne sont pas conçus pour produire de l'eau de bonne qualité sanitaire et il faut traiter cette eau pour la rendre consommable.

### QUALITÉ DE L'EAU PRODUITE À PARTIR DE L'ATMOSPHÈRE

L'eau produite à partir de l'atmosphère peut être destinée à divers usages, notamment agricoles, mais la priorité est généralement donnée à l'alimentation humaine. Dans cette optique, de nombreux auteurs se sont préoccupés de la qualité de cette eau au regard des exigences de santé publique.

L'eau de rosée peut présenter des caractéristiques très différentes en fonction des conditions locales. Généralement, son pH est

Température	Hygrométrie				
	50%	60%	70%	80%	90%
+15°C	343,2	535,2	703,2	916,8	1082,4
+20°C	458,4	703,2	964,8	1207,2	1447,2
+25°C	669,6	972	1250,4	1456,8	1612,8
+30°C	871,2	1034	1281,6	1483,2	1682,4

**Tableau 1 :** Productivité théorique (litres par jour) d'un système de condensation de vapeur, en fonction de l'hygrométrie et de la température (données commerciales EZ-Water® pour le système AD 1500®). D'une manière générale, le rendement des dispositifs de condensation active de la vapeur d'eau atmosphérique est maximal lorsque l'hygrométrie et la température sont élevées.

proche de la neutralité ou acide, mais des pH à tendance alcaline sont parfois observés (Rubio *et al.* 2008, Lekouch *et al.* 2011). Une relation directe entre le pH de la rosée et les rejets atmosphériques de polluants tels que les fumées riches en acide nitrique ou sulfurique a été évoquée par certains auteurs, de sorte qu'une alcalinisation de la rosée serait le signe d'une amélioration de la qualité de l'air (Rubio *et al.* 2008). La rosée est généralement plus minéralisée que l'eau de pluie, ce qui peut s'expliquer par le mode de collecte qui favorise le dépôt de poussières sur les surfaces du condenseur. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les zones où les sols sont secs et poussiéreux (Jiries, 2001). La présence d'ions chlorure et sodium est décrite, particulièrement en zone côtière (Muselli *et al.* 2002 ; Lekouch *et al.* 2011 ; Beysens *et al.* 2006), ce qui peut être expliqué par la proximité de la mer et l'exposition aux embruns, tandis que le calcium est probablement apporté par les poussières terrestres. La rosée est généralement plus riche en nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) que l'eau de pluie, ce qui s'explique par une plus grande richesse de l'atmosphère en oxydes d'azote en phase nocturne, du fait de leur photo-dissociation par la lumière du jour (Beysens *et al.* 2006). La présence de sulfates est vraisemblablement à relier aux rejets atmosphériques de gaz de combustion à proximité de la zone de collecte de la rosée (Muselli *et al.* 2002), de même que la présence de métaux lourds, plomb, cobalt et cadmium (Jiries 2001) en quantités toujours très faibles. En ce qui concerne les agents biologiques, les conditions de recueil entraînent la présence dans l'eau de rosée de micromycètes et de bactéries véhiculées par l'air ou par les animaux. Les niveaux de contamination sont généralement importants. Ce constat est à relier à la présence d'insectes sur les installations, qui s'abreuvent avec l'eau de rosée collectée. L'eau de rosée n'est propre à la consommation humaine qu'après une désinfection.

Même si les données sur ce sujet sont rares, l'eau obtenue par condensation active de la vapeur d'eau ne diffère pas fondamentalement de la rosée. Son caractère généralement acide et peu minéralisé permet cependant de redouter des interactions majeures entre l'eau condensée et les matériaux du dispositif de condensation. Ce sont donc essentiellement des phénomènes de corrosion des éléments métalliques au contact de l'eau qui sont à redouter, avec migration dans l'eau de composés indésirables (fer) ou toxiques (zinc, nickel, etc.). Pour limiter ces phénomènes, la réglementation impose que tous les matériaux constitutifs de tels équipements soient autorisés, l'attestation de conformité sanitaire spécifique constituant une garantie d'innocuité pour le consommateur.

## CONCLUSION

Dans de nombreuses situations, la production d'eau à partir de l'atmosphère peut constituer l'unique réponse envisageable pour alimenter les populations. Elle peut aussi contribuer à une moindre sollicitation des ressources traditionnelles en eau douce. On comprend l'intérêt actuel pour toutes les approches développées dans ce domaine. Les dispositifs passifs de recueil de l'eau à partir des brouillards et rosées apportent une réponse limitée mais économiquement adaptée aux populations les plus démunies. Avec les dispositifs de condensation active de l'eau atmosphérique, il est possible de garantir un approvisionnement en eau abondant et relativement constant, sous réserve d'une hygrométrie suffisante.

Ces approches technologiques constituent une évolution majeure dans le domaine de la production d'eau, qui répond aux attentes écologiques et économiques de notre époque.

## BIBLIOGRAPHIE

- Agama, N. & Berlinera, P. 2006. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments - A review. *J Arid Environments* 65: 572-590.
- Berkowicz, S., Beysens, D., Milimouk, I., Heusinkveld, B., Muselli, M., Wakshal, E., Jacobs, A. 2004. Urban dew collection under semi-arid conditions: Jerusalem. In: *Proc. Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, pp. 36-45. University of Pretoria, Cape Town, 2004.
- Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Muselli, M., Marcillat, J. 2003. Using radiative cooling to condense atmospheric vapour: a study to improve water yield. *J Hydrology* 276: 1-11.
- Beysens, D., Muselli, M., Nikolayev, V., Narhe, R., Milimouk, I. 2005. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. *Atmospheric Research* 73: 1-22.
- Beysens, D., Ohayon, C., Muselli, M., Clus, O. 2006. Chemical and biological characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bordeaux, France). *Atmospheric Environment* 40: 3710-3723.
- Clus, O. 2007. *Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce*. Thèse de doctorat, Université de Corse, 235 p.
- Degen, A., Leeper, A., Shachak, M. 1992. The effect of slope direction and population-density on water influx in a desert snail, *Trochoidea seetzenii*. *Functional Ecology* 6: 160-166.
- Gindel, I. 1965. Irrigation of plants with atmospheric water within the desert. *Nature* 5002:1173-1175.
- Ihrig, D., Licht, M., Brunert, U., Eggemann, J. 2008. Winning drinking water using radiation exchange. *Physics and Chemistry of the Earth* 33: 86-91.
- Jacobs, A., Heusinkveld, B., Berkowicz, S. 2002. A simple model for potential dewfall in an arid region. *Atmospheric Research* 64: 285-295.
- Jacobs, A., Heusinkveld, B., Berkowicz, S. 2008. Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. *Atmospheric Research* 87: 377-385.
- Jiries, A. 2001. Chemical composition of dew in Amman, Jordan. *Atmospheric Research* 57: 261-268.
- Kidron, G., Hernstadt, I., Barzilay, E. 2002. The role of dew as a moisture source for sand microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel. *J Arid Environ.* 52: 517-533.
- Kidron, G. 2010. The effect of substrate properties, size, position, sheltering and shading on dew: an experimental approach in the Negev Desert. *Atmospheric Research* 98: 378-386.
- Lange, O., Schulze, E., Koch, W. 1992. Ecophysiological investigations on lichens of the Negev Desert : CO<sub>2</sub> gas exchange and water conservation of *Ramalina maciformis* in its natural habitat during the summer dry period. *Flora* 159: 38-62.
- Lekouch, I., Muselli, M., Kabbachi, B., Ouazzani, J., Melnytchouk-Milimouk, I., Beysens, D. 2011. Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western Morocco. *Energy* 36: 2257-2265.
- Moffett, M. 1985. An Indian ant's novel method for obtaining water. *National Geographic Research* 1: 146-149.
- Monteith, J. 1957. Dew. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 83: 322-341.
- Monteith, J. & Unsworth, M. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Chapman and Hall Londres.
- Muselli, M., Beysens, D., Marcillat, J., Milimouk, I., Nilsson, T., Louche, A. 2002. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). *Atmospheric Research* 64: 297-312.
- Muselli, M. 2007. *Systèmes énergétiques pour la production d'électricité et d'eau douce potable*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Corse, 209 p.
- Muselli, M., Beysens, D., Mileta, D., Milimouk, I. 2009. Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. *Atmospheric Research* 92: 455-463.
- Naidu, S. 2001. Water balance and osmoregulation in *Stenocara gracilipes*, a waxblossoming tenebrionid beetle from the Namib Desert. *J Insect Physiol.* 47: 1429-1440.
- Nikolayev, V., Beysens, D., Gioda, A., Milimouk, I., Katiushin, E., Morel, J. 1996. Water recovery from dew. *J Hydrology* 182: 19-35.
- Pachauri, R. & Reisinger, A. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Genève.
- Parker, A. & Lawrence, C. Water capture by a desert beetle. 2001. *Nature* 414: 33 - 34.
- Rubio, M., Lissi, E., Villena, G. 2008. Factors determining the concentration of nitrite in dew from Santiago, Chile. *Atmospheric Environment* 42: 7651-7656.
- Schemenauer, R., Cereceda, P., Suit, M. 1992. An alternative water supply for Chilean coastal desert villages. *Water Resources Development* 8: 53-59.
- Shachak, M., Leeper, A., Degen, 2002. A. Effect of population density on water influx and distribution in the desert snail *Trochoidea seetzenii*. *Ecoscience* 9: 287-292.
- Sharan, G., Clus, O., Singh, S., Muselli, M., Beysens, D. 2011. A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). *J Hydrology* 405: 171-181.
- Vargas, W., Lushiku, E., Niklasson, G., Nilsson, T. 1998. Light scattering coatings : theory and solar applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 54: 343-350.
- Ye, Y., Zhou, K., Song, L., Jin, J., Peng, S. 2007. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China. *Atmospheric Research* 86: 21-29.

