Prix de l'Ingénierie du Futur 2023

Sujet : La préservation des ressources en eau

Condens'Air

Produire de l'eau avec rien ou presque… De l'air suffit !

Projet mené par : MONCUIT Olivier, PETILLON Elsa, PETIT Eloïse, SALBER Chloé

Etudiants de l'IPSA Toulouse

LA SECHERESSE EN FRANCE

Chaque année qui passe apporte avec elle de nouveaux **épisodes de sécheresse toujours plus longs et fréquents**, et ce en toute saison. La pluie devient rare, les cours d'eau s'assèchent et les réserves des nappes phréatiques s'amoindrissent, ce qui pose des questions sur la **disponibilité de l'eau potable dans les décennies à venir**. On distingue la sécheresse météorologique qui correspond à l'absence prolongée de précipitations de la sécheresse hydrologique qui traduit un niveau bas des cours d'eau et des nappes phréatiques.

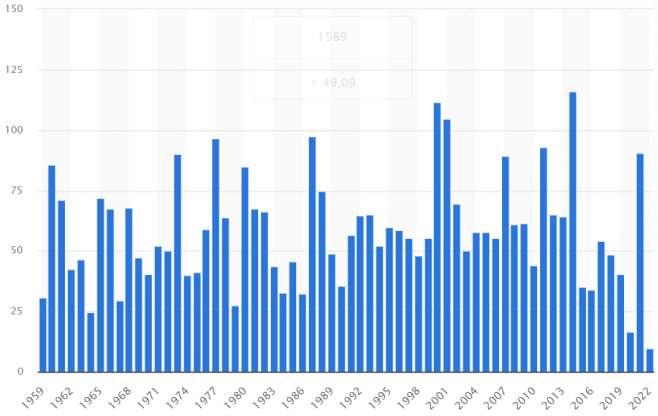

Figure 1 : Diagramme des précipitations au mois de juillet de 1959 à 2022 en mm en France

Un record a été enregistré en juillet 2022 avec seulement 9,7 mm de pluie (Fig. 1). A l'exception de l'année 2021, tous les relevés depuis 2015 sont inférieurs à la moyenne qui est de 59,1 mm [1]. De plus, environ 70 % des nappes ont été classées en niveau bas durant l'automne et l'hiver 2022 (Fig. 3) [2]. **Le sud n'est pas la seule région touchée par la sécheresse : tout le territoire est concerné.**

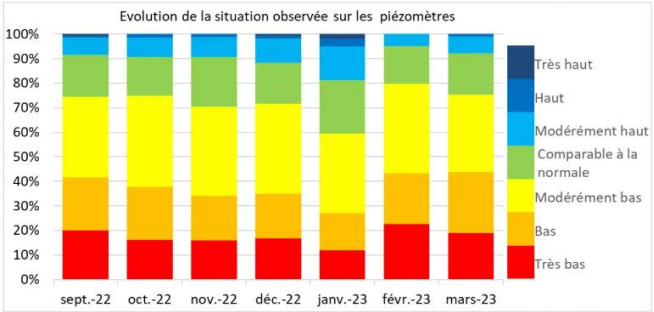

Figure 2 : Evolution du niveau des nappes phréatiques en France de septembre 2022 à mars 2023

PRODUIRE DE L'EAU AVEC DE L'AIR ?

Un système permettant de produire de l'eau potable à partir de rien… ou presque : de l'air suffit ! Inspiré des générateurs d'eau atmosphérique comme Osoley [3], notre système a pour but de condenser la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant. Le principe de base est simple puisqu'**il suffit d'abaisser la température de l'air jusqu'à la température du point de rosée**, température à laquelle la vapeur d'eau se transforme en eau liquide. Les générateurs utilisent un gaz frigorigène qui est comprimé puis détendu dans un échangeur de chaleur pour refroidir l'air ambiant et condenser la vapeur d'eau. **Cependant, une source d'alimentation électrique est nécessaire à leur utilisation.**

Figure 3 : Générateur d'eau Osoley

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés au **projet Eole Water lancé par Marc Parent en 2013 et qui propose d'intégrer le générateur d'eau à une éolienne pour l'alimenter en électricité grâce au vent** [4], [5], [6]. L'eau récupérée s'écoule dans un réservoir où elle est filtrée. L'air sec est ensuite aspiré par un ventilateur puis réchauffé avant d'être rejeté. Un prototype de 3,2 m de diamètre installé dans le jardin de M. Parent assure une production de 30 à 100 L d'eau par jour selon les conditions de température et d'humidité relative (HR). Un projet de plus grande envergure avec une éolienne de 13 m de diamètre, serait capable de produire 1000 L d'eau par jour et 30 kW d'électricité dans des conditions où la température serait de 25 °C et l'HR de 60 %. Cette production

Figure 4 : Eolienne génératrice d'eau Eole Water

grimpe à 1500 L pour 30 °C et 70 % de HR. **Par ailleurs, le surplus d'électricité produit pourrait être récupéré pour un autre usage.**

Malheureusement, la société Eole Water a fermé en 2021 par manque de financement. **Evaluée à 35 €/m^3** (contre 4,30 €/m^3 en moyenne pour l'eau de ville) à cause de la gourmandise en gaz frigorigène et en électricité, cette eau issue du vent était bien trop chère pour convaincre les investisseurs. Nous nous sommes alors demandé comment nous pourrions **améliorer le système Eole Water pour maximiser notre récupération d'eau et d'électricité** en nous passant du compresseur et du gaz. Pour cela, nous nous sommes tournés vers **une solution biomimétique inspirée du savoir-faire de la Nature.**

INSPIRATION BIOMIMETIQUE

Certaines espèces sont capables de récupérer de l'eau dans les milieux les plus arides où la moindre goutte est précieuse ! C'est le cas des cactus, de certaines herbes ou encore d'un scarabée du désert de Namibie. **Une étude expérimentale réalisée par des chercheurs de l'Ohio State University (OSU) et publiée en 2018** [7] nous a permis de comprendre comment cette prouesse de la Nature était possible. Pour cela, ils ont réalisé une expérience en comparant la quantité d'eau récupérée avec des impressions 3D reproduisant les caractéristiques de ces espèces.

Figure 5 : Zoom sur les pics d'un cactus parsemé de gouttelettes

Les pics des cactus ne servent pas uniquement à repousser les curieux… Leur **forme conique** et leur disposition en étoile avec une **inclinaison de 45 °** par rapport à la surface leur permettent de capter les flux d'air dans toutes les directions. **Des micro-dépressions se forment au niveau des pointes, faisant chuter localement la température de l'air.** Si celui-ci atteint sa température du point de rosée, l'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur devient liquide. Des gouttelettes se forment sur les pics puis s'écoulent le long du corps du cactus jusqu'aux racines. Ce principe est particulièrement efficace la nuit lorsque les températures sont fraiches et que l'air du désert devient brumeux. Certains cactus, tels que l'*Opuntia microdasys,* possèdent en plus des poils comme une barbe aux extrémités des pics, ainsi que des **rainures de seulement 2 µm d'épaisseur** sur la longueur qui renforcent l'attraction des molécules d'eau.

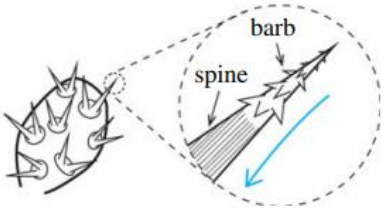

Figure 6 : Schéma des pics de cactus à barbe

Un processus similaire se produit avec l'herbe. Les brins sont **rainurés sur toute leur longueur**. L'espace entre les rainures repousse l'eau (**hydrophobe**) tandis que le sommet attire l'eau (**hydrophile**). Ces rainures favorisent aussi l'écoulement de l'eau vers les racines. La nuit, lorsque les températures sont fraiches, la vapeur d'eau se condense sur les brins, créant ainsi la rosée du matin.

Figure 7 : Zoom sur un brin d'herbe parsemé de gouttelettes

Enfin, **les scarabées du désert de Namibie,** dont le nom scientifique est *Stenocara gracilipes,* savent récupérer l'humidité du brouillard matinal grâce à une **paire d'ailes bosselées qu'ils inclinent à un angle de 45°** par rapport au flux d'air. Les bosses ont un diamètre de 0,5 mm et sont espacées d'environ 1 mm. **Des micro-dépressions se forment dans les creux hydrophobes, permettant la condensation de la vapeur d'eau au sommet des bosses hydrophiles.** Les gouttelettes d'eau s'écoulent sous leur poids jusqu'à la bouche du scarabée.

Figure 8 : Scarabée du désert en exercice de condensation

Cette étude a permis de démontrer **qu'une plaque avec plusieurs rangées de cônes rainurés offre le plus grand taux de récupération d'eau.**

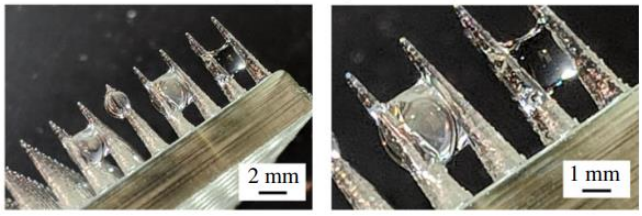

Figure 9 : Photo de l'expérience de condensation menée par l'OSU

Nous avons donc choisi cette configuration pour l'intégrer à notre système de récupération d'eau autonome. La première étape a été de **modéliser ces cônes à l'aide du logiciel CATIA**. Les dimensions utilisées respectent celles préconisées dans l'étude des chercheurs de l'OSU.

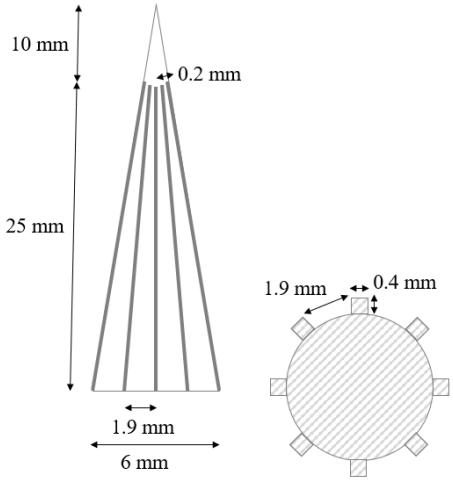

Figure 10 : Schéma des cônes modélisés sur CATIA

Notre objectif est de trouver la disposition la plus optimale pour les cônes afin de récupérer un maximum d'eau en gardant une modélisation techniquement et physiquement réalisable.

ANALYSE GRAPHIQUE

Nous avons commencé par effectuer une **analyse graphique sur Python pour comprendre notre problème** et visualiser l'évolution des grandeurs qui nous intéressent. **Nous travaillons sur un air humide, c'est-à-dire un air qui contient une certaine quantité de vapeur d'eau**. Cette quantité se mesure avec **l'humidité relative (HR)**. Elle représente le **pourcentage de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport au maximum que peut contenir cet air avant qu'il ne sature et que la vapeur ne se condense en eau liquide.** Par exemple, 90 % de HR ne signifie pas que l'air est composé à 90 % d'eau, mais que cet air est à 90 % de sa capacité à contenir de la vapeur d'eau avant saturation. Ainsi, pour HR fixée, nous avons tracé 3 graphiques :

1 **La température du point de rosée (Td) en fonction de la température d'entrée de l'air (Te) :** pour savoir de combien de degrés il faut abaisser la température pour que des gouttelettes d'eau liquide apparaissent. **Plus HR est faible, plus l'écart entre Td et Te est grand.**

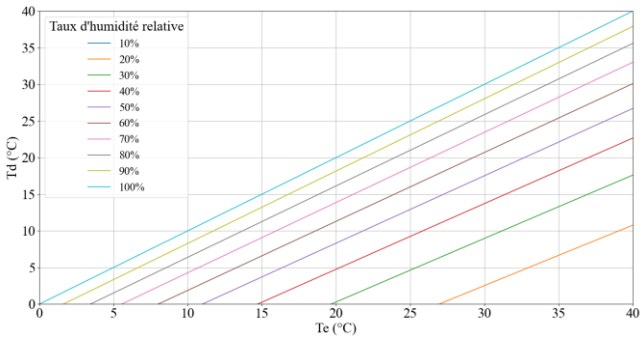

Figure 11 : Graphique de la température du point de rosée en fonction de la température d'entrée de l'air pour toute HR

2 **La pression de vapeur et l'humidité absolue (HA) en fonction de Te :** la pression de vapeur [8], [9] est une mesure de pression partielle du mélange air - vapeur. Elle correspond à la pression qu'aurait la vapeur si elle était seule à occuper tout l'espace à une température donnée. On appelle **pression de vapeur saturante** la pression partielle pour laquelle la vapeur se condense en eau liquide. **L'HA, donnée en g/m^3, correspond à la masse de molécules d'eau par unité de volume d'air. C'est cette grandeur qui nous indiquera la quantité d'eau que l'on peut espérer récupérer. Notons que plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'eau.** Toutefois, son point de rosée est plus difficile à atteindre car le différentiel de température entre celle de l'air et celle du point de rosée est plus grand.

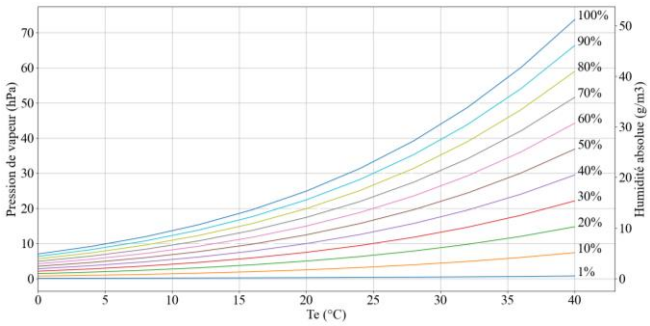

Figure 12 : Graphique de la pression de vapeur et de l'humidité absolue en fonction de la température d'entrée pour toute HR

3 La différence de pression (dP) entre entrée et saturation en fonction de Te à HR fixée : pour savoir de combien de Pa il faut abaisser la pression d'entrée pour atteindre celle de la saturation de l'air en eau. **Ce graphique va nous aider à déterminer les conditions limites de température et d'HR pour lesquelles nous pouvons espérer faire fonctionner notre système.**

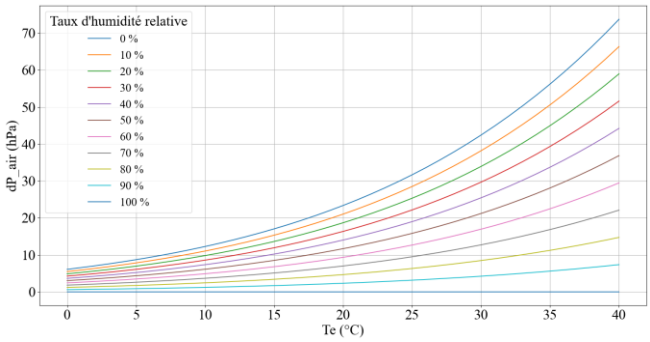

Figure 13 : Graphique de la différence de pression entre entrée et saturation en fonction de la température pour toute HR

Notons que ces variations sont valables en atmosphère standard avec une pression de référence de 1013,25 hPa. On observe que **plus Te augmente et plus HR diminue, plus dP augmente. Cela confirme qu'il devient difficile de condenser l'eau pour Te élevée et HR faible.**

SIMULATION DES ECOULEMENTS

Différentes dispositions de cônes ont été testées dans des simulations d'écoulement à l'aide du logiciel Star CCM+. **Nous nous intéressons à la chute de pression générée par les cônes. Plus elle est importante, plus nos conditions limites de fonctionnement sont repoussées.**

Nous avons **comparé les performances entre des rangées de cônes alignées ou décalées, droits ou inclinés à 45°, rainurés ou lisses sur des plaques :**

- Cônes droits alignés lisses 5 cm (CDAL5)
- Cônes droits décalés lisses 5 cm (CDDL5)
- Cônes inclinés décalés lisses 5 cm (CIDL5)
- Cônes inclinés décalés rainurés 5, 10, 20 cm (CIDR5, CIDR10, CIDR20)

Paramètres de simulation : Ecoulement d'un gaz idéal en régime turbulent et stationnaire avec une vitesse de 5 m/s (18 km/h).

Configuration	Chute de pression (Pa)
CDAL5	15,74
CDDL5	15,82
CIDL5	16,28
CIDR5	18,85
CIDR10	19,77
CIDR20	21,54
CIDR5 à 15 m/s	153,24

Figure 14 : Tableau des chutes de pression observées pour différentes dispositions de cônes sur une plaque

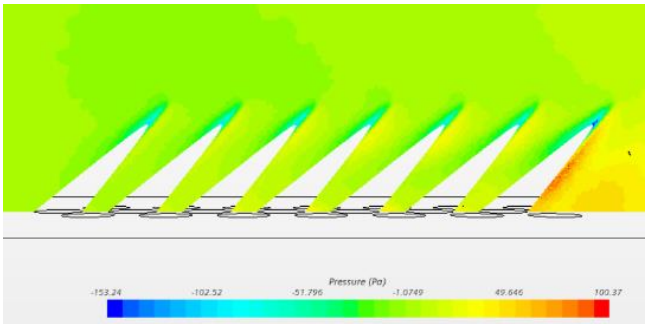

Figure 15 : Champ de pression de la simulation CIDR5 à 15 m/s

Nous remarquons que la pression chute d'autant plus que l'écoulement est rapide et que les rangées de cônes sont nombreuses. Nous avons donc tout intérêt à accélérer le flux d'air. Nous avons repris la configuration la plus performante (cônes inclinés décalés rainurés) pour la tester dans un **cylindre à effet Venturi, c'est-à-dire avec rétrécissement de section de passage** pour accélérer le flux.

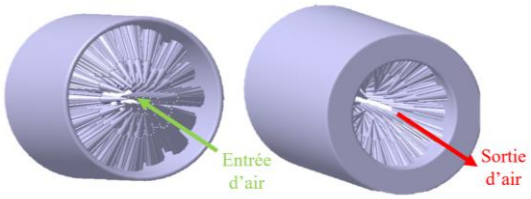

Figure 16 : Modélisation 3D du cylindre à effet Venturi avec les cônes inclinés décalés rainurés

Paramètres de simulation : Ecoulement d'un gaz idéal en régime turbulent et stationnaire avec une vitesse de 10 m/s (36 km/h). Lien Vidéo simulation

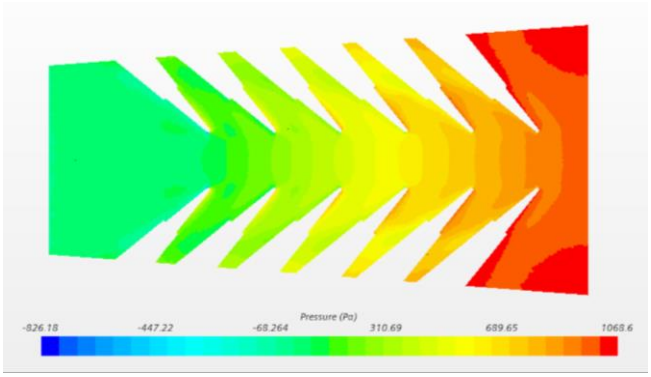

Figure 17 : Champ de pression dans le cylindre à effet Venturi

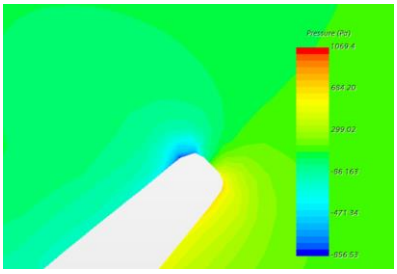

Figure 18 : Zoom sur le champ de pression au bout d'un cône

BILAN PERFORMANCES

Le cylindre à effet Venturi, donc avec accélération de l'écoulement, permet de faire **chuter la pression d'environ 8 hPa avec seulement 6 rangées de cônes** (6,5 cm). D'après les graphiques des figures 12 et 13, cela impose les **conditions limites de fonctionnement** suivantes :

Te (°C)	HR (%)	HA (g/m³)
0	> 0	0 à 5
10	> 35	3,5 à 10
20	> 65	11 à 17,5
30	> 80	24,5 à 31
40	> 90	46 à 51,5

Figure 19 : Tableau des conditions limites de fonctionnement

ET L'ELECTRICITE ALORS ?

Ajout d'un générateur pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie électrique pourra être récupérée pour un **usage domestique**. Une partie de cette énergie servira à **alimenter l'hélice d'aspiration** que nous proposons d'ajouter en queue du cylindre principal de l'éolienne pour accélérer le flux d'air.

POUR QUEL PUBLIC ?

Nous visons d'abord un **usage domestique**. Cette éolienne permet de **produire à la fois de l'eau et de l'électricité,** ce qui est avantageux pour un foyer. Donnons quelques chiffres pour comprendre son intérêt. Une éolienne de 3 m de diamètre installée dans une région où le vent souffle régulièrement à 50 km/h a une **puissance avec rendement de 18,5 kW soit une production de 18,5 MWh sur une durée de 1000 heures de fonctionnement (42 jours)** [10]. **En France, la consommation d'électricité d'une maison tout électrique de 100 m² habitée par 4 personnes est d'environ 17 MWh/an** [11]. **On ajoute à cela la production d'eau estimée entre 30 et 100 L par jour. En 2020, un Français consomme en moyenne 149 L d'eau potable par jour** [12].

Le coût de cette éolienne est estimé entre 10 000 et 50 000 €, d'après la comparaison avec le coût des éoliennes domestiques qui existent déjà sur le marché pour la production d'électricité [13]. Son installation représente un investissement conséquent mais qui devient rentable. En effet, **le prix moyen du m³ d'eau est d'environ 4,30 € et du kWh d'électricité de 0,2062 €** au 1er juillet 2023 en France [14], [15]. Reprenons notre exemple d'un foyer de 4 personnes pour calculer sa facture :

$$\text{Eau : } \frac{149\ L \times 4{,}30\ €}{1000\ L} \times 4\ pers \times 365\ j = 935{,}42\ €$$

$$\text{Electricité : } 17\ 000\ kWh \times 0{,}2062\ € = 4\ 454\ €$$

Total facture annuelle : 5389,42 €

L'éolienne devient donc rentable pour une durée d'utilisation comprise entre 2 et 10 ans.

LIMITES DU PROJET

La pression ne dépend pas uniquement de HR et de Te donc les conditions de fonctionnement établies restent théoriques et idéales.

Le fonctionnement des cônes de condensation repose sur une étude expérimentale réalisée par des chercheurs avec un air saturé en humidité.

Notre choix de disposition des cônes présente une très bonne efficacité théorique mais **peut être cher et difficile à fabriquer à grande échelle**.

Le coût et la durée de rentabilité ne prennent pas en compte les frais d'entretien ni d'agents de traitement de l'eau issue de l'éolienne.

POUR ALLER PLUS LOIN

Notre conception du cylindre peut être optimisée davantage pour augmenter la chute de pression et repousser les conditions limites d'utilisation.

Nous proposons de **multiplier le nombre de cylindres Venturi avec les cônes à l'intérieur de l'éolienne** pour augmenter le volume d'air humide rencontré et donc le volume d'eau récupéré.

Bibliographie

[1] DELESTRE Sheela, «Cumul de précipitations en juillet en France 1959-2022 », Août 2022, https://fr.statista.com/statistiques/1324100/pluie-volume-juillet-france/

[2] BRGM, « Nappes d'eau souterraine au 1er avril 2023 et risques de sécheresse estivale », Avril 2023, https://www.brgm.fr/fr/actualite/communique-presse/nappes-eau-souterraine-au-1er-avril-2023-risques-secheresse-estivale

[3] Osoley Water from Air, Juillet 2022, https://osoley.fr/fr/accueil/

[4] Science & Vie, « Eolienne : un nouveau type produit… de l'eau douce », Octobre 2018, https://www.science-et-vie.com/article-magazine/eolienne-un-nouveau-type-produit-de-leau-douce

[5] OMPI, « Faire de l'eau avec du vent - Une innovation qui changera des vies », Août 2010, https://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2010/04/article_0005.html

[6] Chaîne Youtube Eole Water, « The WMS1000, 5th generation Eole Water's Wind Turbine », Mai 2012, https://www.youtube.com/watch?v=zhe4jDWfFAY

[7] BHUSHAN Bharat & GUERERA Dev from the Ohio State University, « Designing bioinspired surfaces for water collection from fog », Octobre 2018, https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2018.0269

[8] Mayar, « A propos de pression de vapeur saturante... », Mars 2017, https://mayar.over-blog.com/2017/03/a-propos-de-pression-de-vapeur-saturante.html

[9] DELEZE Marcel, « Masse volumique de l'air, température virtuelle et humidité spécifique, en fonction de la pression, la température et l'humidité relative », https://www.deleze.name/marcel/physique/rosee/tex/masse-vol-air-humide.pdf

[10] Ooreka, « Puissance éolienne », 2022, https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/352953/puissance-eolienne

[11] Total Energies, « La consommation moyenne en électricité d'une maison en France », Juin 2021, https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/comprendre-le-marche-de-l-energie/la-consommation-moyenne-en-electricite-d-une-maison#:~:text=Un%20appartement%20de%2050%20m%C2%B2%20occup%C3%A9%20par%20deux%20personnes%20consomme,d'environ%2017%20100%20kWh.

[12] Commissariat général au développement durable, « Consommation domestique en eau potable », Janvier 2023, https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/societe/le-mode-de-vie-des-menages-ressources/article/consommation-domestique-en-eau-potable#:~:text=En%202020%2C%20un%20Fran%C3%A7ais%20consomme,m3%20par%20habitant%20par%20an.

[13] Total Energies, « Tout savoir sur l'éolienne domestique », Novembre 2018, https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-eolienne-domestique

[14] RAVALOSON Misitia, «Quel est le prix du m3 d'eau en France et dans ma commune ? », Mars 2023, https://selectra.info/energie/eau/prix

[15] SERVIGNE Chloé, « Prix du kWh : tarif du kWh d'électricité en France en 2023 », Juillet 2023, https://selectra.info/energie/electricite/prix

Sources images

Image page de garde : https://www.pinterest.fr/pin/907334656152623773/

Figure 1 - Diagramme des précipitations au mois de juillet de 1959 à 2022 en mm en France : https://fr.statista.com/statistiques/1324100/pluie-volume-juillet-france/

Figure 2 - Evolution du niveau des nappes phréatiques en France de septembre 2022 à mars 2023 : https://www.brgm.fr/fr/actualite/communique-presse/nappes-eau-souterraine-au-1er-avril-2023-risques-secheresse-estivale

Figure 3 - Générateur d'eau Osoley : https://osoley.fr/fr/accueil/

Figure 4- Eolienne génératrice d'eau Eole Water : https://www.lexpress.fr/economie/high-tech/eole-water-la-start-up-francaise-qui-fait-de-l-eau-avec-du-vent_1402314.html

Figure 5 - Zoom sur les pics d'un cactus parsemé de gouttelettes : www.123rf.com

Figure 6 - Schéma des pics de cactus à barbe : https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2018.0269

Figure 7 - Zoom sur un brin d'herbe parsemé de gouttelettes : www.123rf.com

Figure 8 - Scarabée du désert en exercice de condensation : https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-bouteille-qui-transforme-lair-en-eau-3461/

Figure 9 - Photo de l'expérience de condensation menée par l'OSU : https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2018.0269