

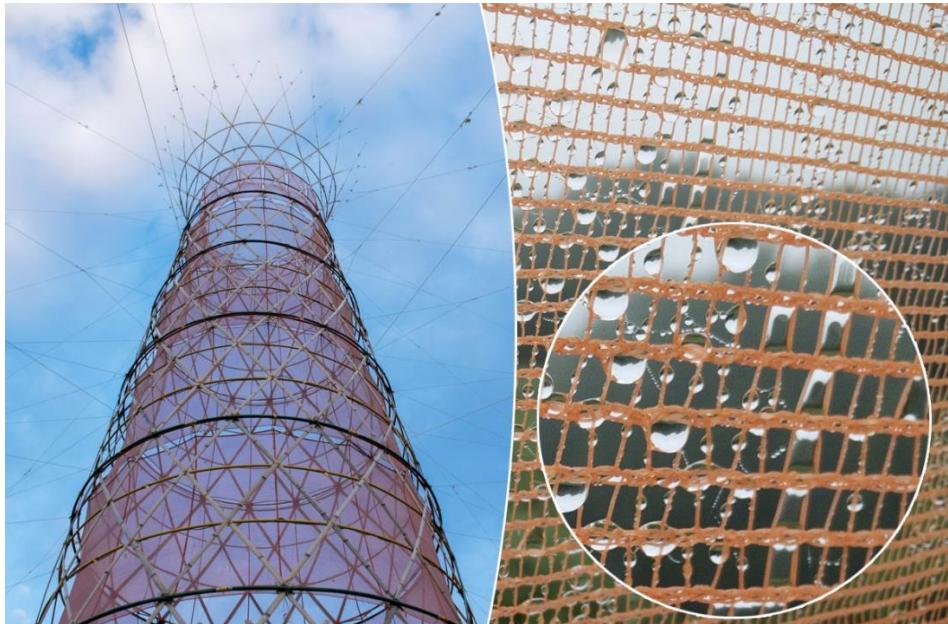


OLYMPIADES  
DE PHYSIQUE

FRANCE

2025

Une source qui ne manque pas d'air



(Crédit photo : Warka Water / Photographe : Arturo Vittori)

LYCÉE JEAN BART  
DUNKERQUE



Wendie DEPRET      Océane FRISCOURT  
Valentin LUSSET      Chloé QUESNOIT      Nina VARVENNE

**ensait**  
ROUBAIX  
ECOLE D'INGENIEURS TEXTILE

**AP**  
École Nationale  
Supérieure  
d'Architecture et de  
Paysage de Lille

**LL**  
Université  
de Lille

# Une source qui ne manque pas d'air

## Résumé

---

Il existe différents moyens de récupérer l'eau contenue dans l'air humide pour en faire une source d'eau potable accessible aux populations, même dans les régions les plus sèches. Notre étude cherche tout d'abord à comprendre et à caractériser l'humidité relative dans l'air, puis à déterminer la quantité d'eau dans l'air d'une pièce en mesurant la température de rosée. Parmi les systèmes de récupération de l'eau dans l'air, les Warka Towers, inventées par l'architecte italien Arturo Vittori, utilisent un filet placé à l'intérieur d'une structure en bambou. Nous avons construit notre prototype de tour et nous avons étudié sa résistance face au vent. Enfin, nous nous sommes intéressés à la capture des gouttelettes contenues dans le brouillard en étudiant le comportement de différents matériaux textiles. En associant des matériaux avec des propriétés différentes vis-à-vis de l'eau, nous avons tenté de reproduire des structures existant dans la nature par biomimétisme.

---

# Introduction

---

L'accès à l'eau est un enjeu majeur, notamment dans les régions sèches et isolées qui doivent s'adapter au changement climatique. Une solution, proposée par l'architecte italien Arturo Vittori, est la construction d'édifices en bambou qui permettraient de récupérer l'eau contenue dans l'air humide ou dans le brouillard. Il s'agit d'un projet peu coûteux qui vise à installer des tours, appelées *Warka Towers* (ou *tours Warka*), dans les endroits les plus pauvres du monde et ainsi d'apporter de l'eau potable aux personnes qui ne peuvent pas y avoir accès, afin d'améliorer les conditions de vie du village qui pourra désormais avoir une clinique, des sanitaires, un potager...

Le nom « Warka » provient d'un arbre d'Éthiopie (le figuier *Warka* ou *ficus vasta*) qui forme à sa base une large surface ombragée sous laquelle les populations se rassemblent traditionnellement. La forme des tours mime celle de l'arbre et permet de remplir les mêmes fonctions, tout en servant de source d'eau potable. La *Warka Tower* est une tour de 8 à 10 mètres de haut construite avec des matériaux locaux (en bambou en Éthiopie ou en bois au Cameroun). Au centre de la structure se trouve un filet qui capte l'humidité de l'air, la rosée du matin et les gouttes de pluie. L'eau ruisselle ainsi le long du cordage et se dépose dans un récipient à la base de la tour. Ce système peut ainsi recueillir jusqu'à 100 litres d'eau par jour.

Notre projet *Une source qui ne manque pas d'air* se propose de comprendre les conditions physiques qui permettent la récupération de l'eau contenue dans l'air humide, de caractériser la structure de la tour et de mettre en évidence certaines propriétés physiques des matériaux qui permettraient la récupération de l'eau.



(Source : Warka Water Project)

## Sommaire

---

### Première partie : comprendre l'humidité dans l'air

Mesure de la pression de vapeur saturante de l'eau

Comment liquéfier la vapeur d'eau ?

Principe de l'hygromètre à point de rosée

### Deuxième partie : une tour pour récupérer de l'eau

Réalisation d'un prototype de tour

Action du vent sur la tour

Dimensionnement du socle

### Troisième partie : attraper des gouttelettes de brouillard

Du brouillard fait maison

Des matériaux textiles aux propriétés étonnantes

Vers du biomimétisme

## Première partie

### Comprendre l'humidité dans l'air

Lorsque l'on sort une bouteille du réfrigérateur ou que l'on sert une boisson fraîche dans un verre, il apparaît rapidement de la buée à la surface, sous la forme d'un ensemble de petites gouttelettes d'eau. De manière analogue, le miroir de la salle de bains se couvre de buée quand on prend sa douche. Ces observations simples montrent bien la présence d'eau dans l'air, à l'origine de l'existence des nuages et de la plupart des phénomènes météorologiques, mais aussi des problèmes d'humidité dans la maison...

Pour mesurer l'humidité de l'air, on utilise un hygromètre. Notre hygromètre placé dans la salle de classe indique par exemple 51 % d'humidité pour une température de 22 °C... qu'est-ce que cela signifie ? Quelle quantité d'eau se trouve dans l'air de la pièce ? ça veut dire quoi 100 % d'humidité ?

L'air sec est un mélange de gaz : principalement du diazote N<sub>2</sub> (78 %), du dioxygène O<sub>2</sub> (21 %) et un peu d'autres gaz comme de l'Argon Ar ou du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>... L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub>.

En supposant que l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme des gaz parfaits, on peut écrire l'équation d'état des gaz parfaits pour l'air contenu dans la classe de volume  $V = 150 \text{ m}^3$  (10 m x 5 m x 3 m) où règne la pression atmosphérique  $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,0 \text{ bar}$  et la température  $T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} = 295 \text{ K}$  :

$$p_0 V = n_{tot} RT$$

avec  $R = 8,31 \text{ J/K/mol}$  la constante des gaz parfaits.

Ainsi, il y a dans la classe :  $n_{tot} = \frac{p_0 V}{RT} = 6,1 \cdot 10^3 \text{ mol}$  de gaz (air sec + vapeur d'eau)

On peut de même évaluer la quantité d'eau (sous forme vapeur) contenue dans la classe :  $n_{eau} = \frac{p_{eau} V}{RT}$  où  $p_{eau}$

est la *pression partielle* en eau, c'est-à-dire la pression qu'il y aurait dans la pièce s'il n'y avait que de la vapeur d'eau.

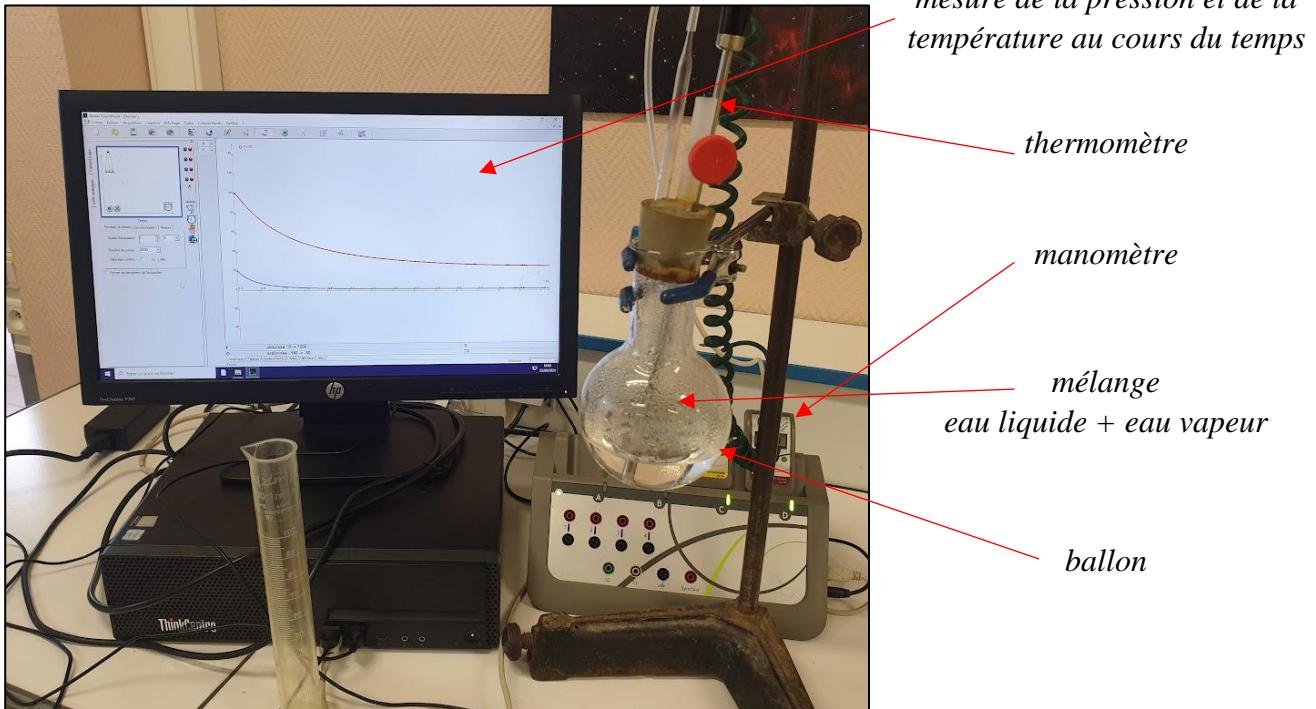
Lorsque la pression partielle atteint la *pression de vapeur saturante*, on dit que l'air humide est à saturation, la vapeur d'eau dans l'air se liquéfie (ou se condense) et il apparaît des gouttelettes d'eau liquide. La quantité maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air vaut donc :  $n_{eau \max} = \frac{p_{sat}(T)V}{RT}$ .

Par définition, l'*humidité relative* est le rapport de la pression partielle en eau sur la pression de vapeur saturante à la température  $T$  :  $\varphi = \frac{p_{eau}}{p_{sat}(T)}$ .

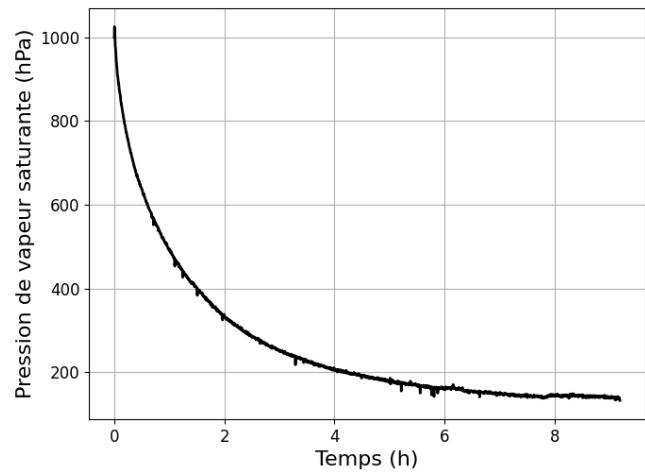
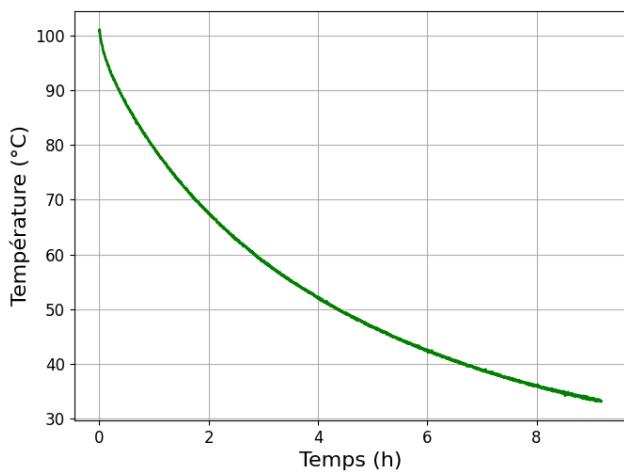
La pression de vapeur saturante de l'eau est aussi la pression de la vapeur d'eau lorsqu'il y a équilibre entre la vapeur d'eau et l'eau liquide, par exemple à la surface de l'eau. On peut ainsi mesurer sa valeur en fonction de la température en considérant un système contenant uniquement de l'eau liquide en équilibre avec de l'eau vapeur.

#### Mesure de la pression de vapeur saturante de l'eau

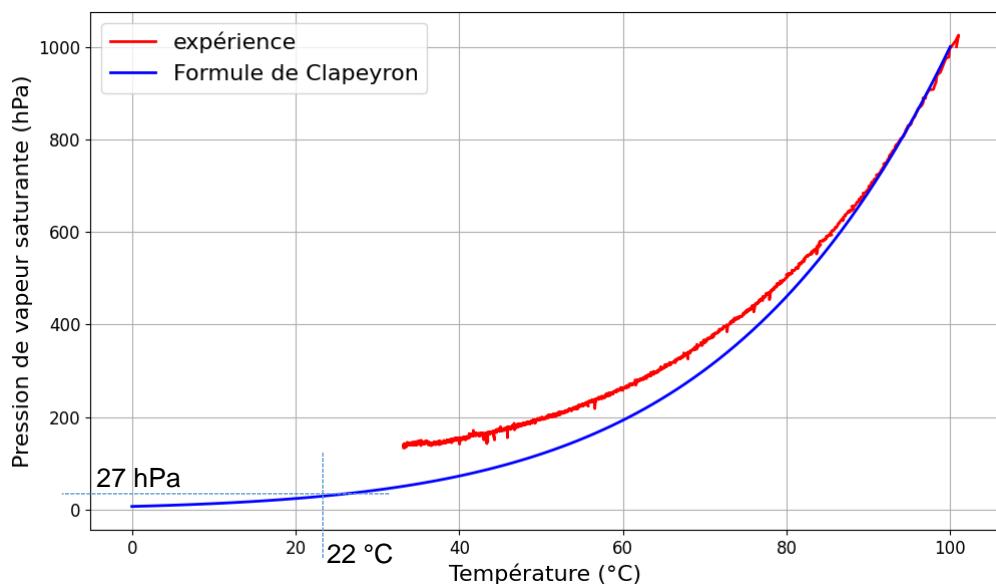
On verse de l'eau distillée dans un ballon, que l'on chauffe jusqu'à ébullition à l'aide d'un chauffe-ballon. Il est important de laisser l'eau bouillir plusieurs minutes pour que la vapeur d'eau qui apparaît puisse chasser l'air du ballon. On retire ensuite le chauffe-ballon, on ferme hermétiquement le ballon avec un bouchon et on enregistre avec un ordinateur à la fois la température et la pression lors du refroidissement lent du système. La pression mesurée correspond alors à la pression de vapeur saturante de l'eau. En entourant le ballon avec de la laine de verre, on a pu ainsi observer le refroidissement du système de 100 °C à 33°C pendant presque 9 heures. Les détails de cette expérience sont proposés en **ANNEXE 1**.



On obtient les courbes suivantes :



puis on trace la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température (courbe rouge) :



On constate que la pression de vapeur saturante diminue lorsque la température diminue. On a superposé à titre de comparaison la courbe basée sur la formule de Clapeyron (courbe bleue) :  $p_{sat}(T) = p_0 e^{-\frac{M_{eau}l_{vap}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$  (où  $T_0 = 100^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $R$  est la constante des gaz parfaits,  $l_{vap} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$  est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau et  $M_{eau} = 18 \text{ g/mol}$ ). Les résultats sont très proches, notamment entre  $90^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$ . Nous avons remarqué que les différences observées sont probablement dues à des fuites d'air au niveau du bouchon (voir **ANNEXE 1**). On utilise dans la suite la courbe bleue qui donne la pression de vapeur saturante à des températures plus basses.

### Comment liquéfier la vapeur d'eau ?

On peut maintenant connaître la pression de vapeur saturante de l'eau dans la salle de classe, pour une température de  $22^\circ\text{C}$  :  $p_{sat}(22^\circ\text{C}) = 27 \text{ hPa}$  (voir graphe), puis la pression partielle de vapeur d'eau pour une humidité relative de 51 % :  $p_{eau} = \varphi p_{sat} = 0,51 \times 27 \text{ hPa} = 14 \text{ hPa}$ .

La masse totale d'eau sous forme de vapeur dans la classe vaut donc :  $m_{eau} = n_{eau} M_{eau} = \frac{p_{eau} V M_{eau}}{R T} = 1,5 \text{ kg}$ .

Si on pouvait récupérer cette eau sous forme liquide, on pourrait remplir complètement une bouteille de 1,5 L !

Mais comment peut-on forcer la vapeur d'eau à se liquéfier pour pouvoir la récupérer ?

Pour le comprendre nous avons réalisé l'expérience qualitative suivante. Nous avons placé une coupelle au-dessus d'un récipient dans trois situations différentes : une coupelle à température ambiante, une coupelle chaude (chauffée au sèche-cheveux) et une coupelle froide (sortie du congélateur).



On verse alors de l'eau bouillante (chauffée à la bouilloire électrique) dans chaque récipient et on observe la surface inférieure de chaque coupelle. Les résultats sont dans le tableau suivant :

Coupelle	Température ambiante	Chaud	Froide
Observations	Il apparaît quelques gouttes d'eau liquide	La surface reste parfaitement sèche	La surface se couvre complètement d'eau liquide

Ainsi, lorsque la surface est suffisamment froide, la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se liquéfier.

Calculons l'humidité relative de l'air lorsque la température diminue :

On prend par exemple la salle de classe à  $22^\circ\text{C}$  et 51 % d'humidité.

Quelle serait l'humidité relative pour une température de la pièce à 15 °C ?

D'après le graphe précédent, la pression de vapeur saturante à 15 °C vaut :  $p_{sat}(15 °C) = 17,5 \text{ hPa}$

La masse d'eau dans l'air humide n'a pas changé (en supposant que la saturation ne soit pas atteinte), on a toujours :  $m_{eau} = \frac{p_{eau} V M_{eau}}{RT} = 1,5 \text{ kg}$ , donc la pression partielle vaut maintenant :  $p_{eau} = \frac{m_{eau} R T}{M_{eau} V} = 13,3 \text{ hPa}$ .

Elle a à peine diminué car la température est seulement passée de 22 °C (295 K) à 15 °C (288 K).

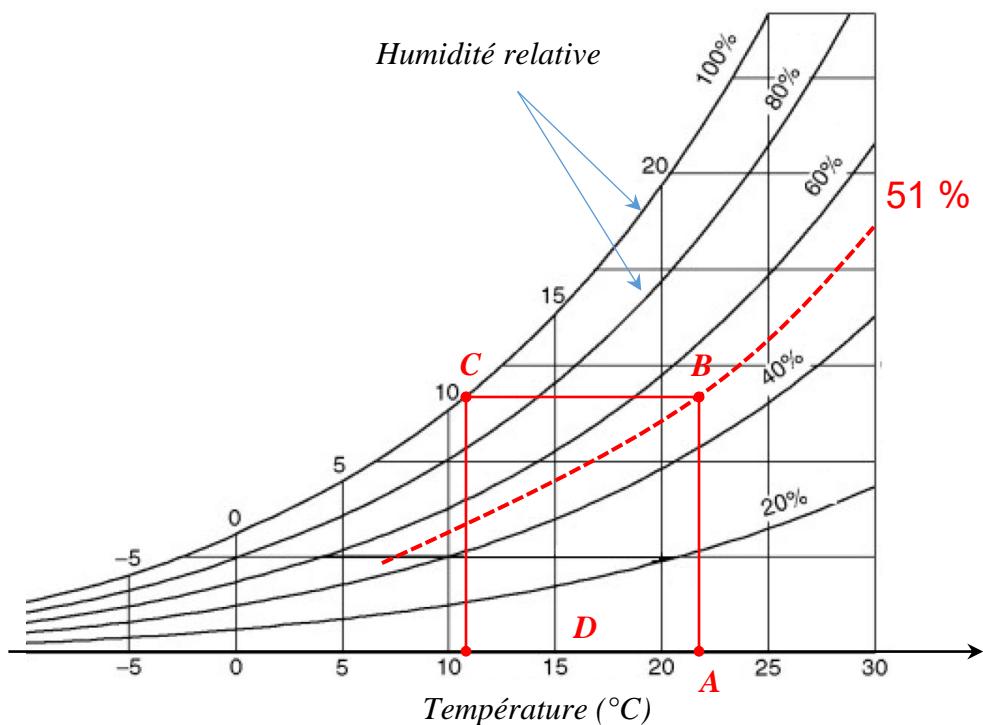
La nouvelle humidité relative vaut ainsi :  $\varphi = \frac{p_{eau}}{p_{sat}(15 °C)} = 0,76$ .

L'humidité relative a augmenté, passant de 51 % à 76 % d'humidité lorsque la température diminue.

Pour liquéfier l'eau contenue dans l'air humide, il suffit donc de baisser suffisamment la température pour arriver à la saturation, correspondant à une humidité relative de 100 %.

La température pour laquelle l'air humide est à saturation s'appelle la *température de rosée* (en référence à la rosée que l'on peut observer le matin sur les feuilles ou les toiles d'araignées).

Pour déterminer la température de rosée, les professionnels de la climatisation utilisent le *diagramme psychrométrique* de l'eau (ou diagramme de l'air humide) qui ressemble au graphe suivant :



Pour déterminer la température de rosée de la salle de classe on procède comme suit : on repère la température de la pièce (ici 22 °C, point A), on trace une ligne verticale jusqu'à atteindre l'humidité relative de la pièce (ici 51 %, point B), puis une ligne horizontale jusqu'à la courbe de saturation (humidité relative de 100 %, point C) et enfin on reporte sur l'axe des abscisses pour obtenir la température de rosée (point D). On mesure ici une température de rosée de 11 °C.

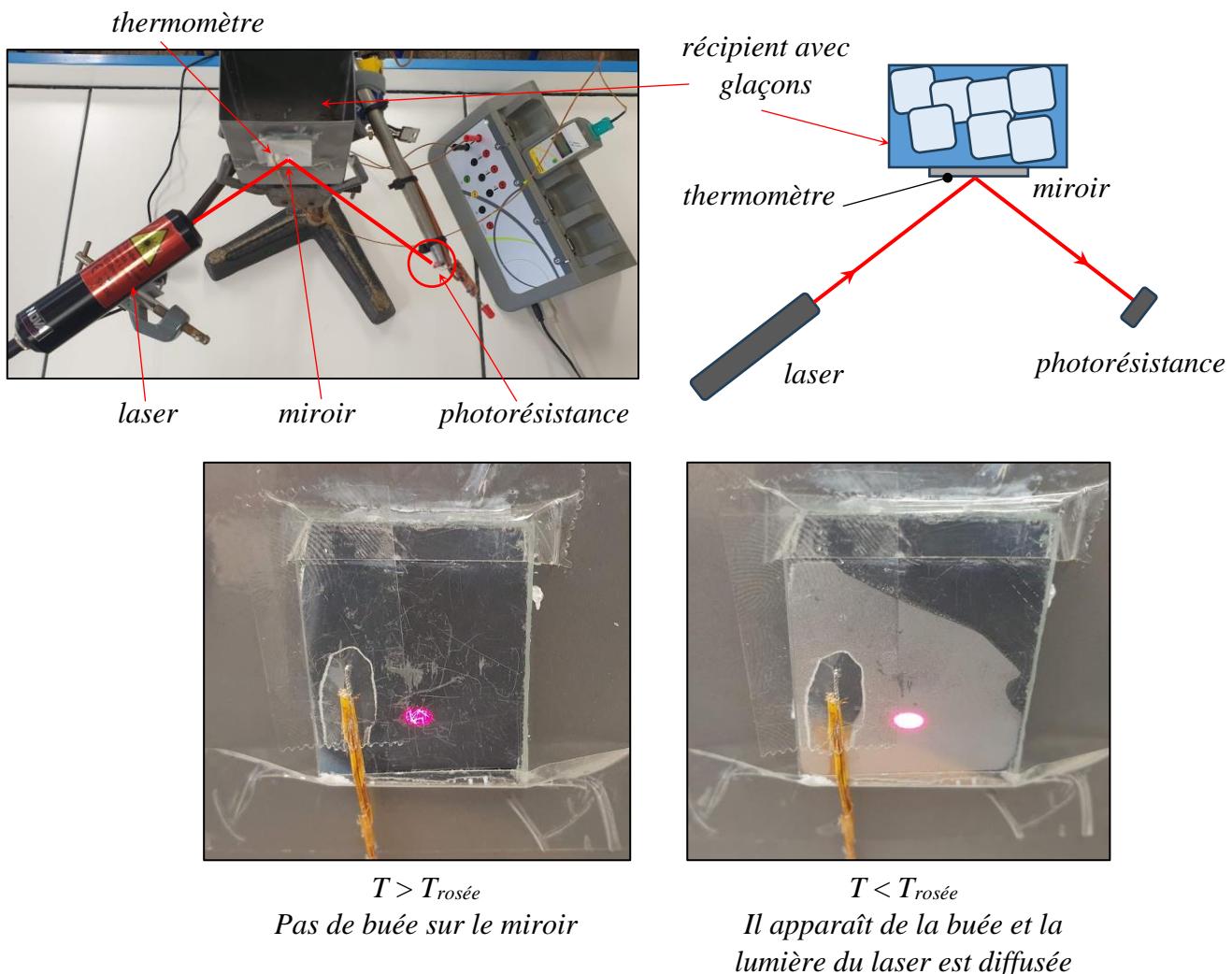
### Principe de l'hygromètre à point de rosée

La mesure de la température de rosée permet à l'inverse de déterminer l'humidité relative de l'air humide.

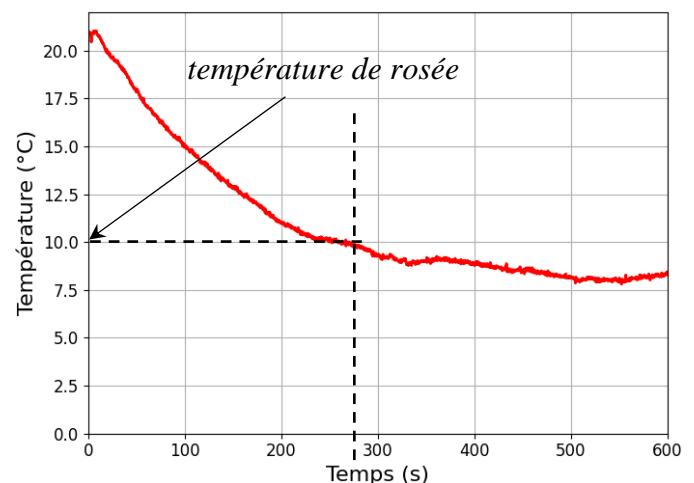
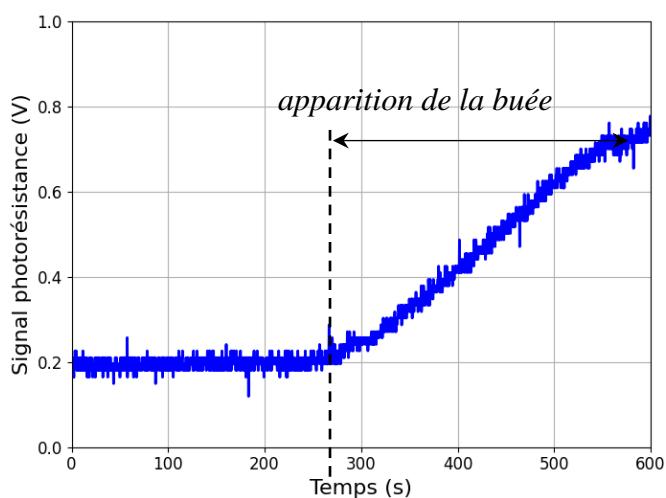
Nous avons ainsi réalisé notre propre prototype d'hygromètre à point de rosée.

Le principe est simple : il suffit de refroidir une surface jusqu'à observer l'apparition de gouttelettes sous forme de buée. L'air au voisinage de la surface est alors à saturation à la température de rosée.

Notre hygromètre utilise un miroir plan placé sur un récipient métallique. On refroidit le miroir avec quelques glaçons placés dans le récipient. On mesure la température à la surface du miroir à l'air d'un thermomètre relié à un ordinateur. L'observation de la buée peut se faire directement à l'œil, mais il est plus précis d'utiliser un détecteur de buée. On utilise ainsi un faisceau laser qui se réfléchit sur le miroir avant d'arriver sur une photorésistance. Lorsque la buée apparaît à la surface, l'intensité du faisceau réfléchi diminue car la lumière est envoyée dans toutes les directions à cause des gouttelettes. On mesure alors la tension aux bornes d'une photorésistance parcourue par un courant constant : puisque la résistance du composant augmente quand l'intensité lumineuse diminue, la tension mesurée augmente lors de l'apparition de la buée.



On enregistre les courbes suivantes :



Dans cette expérience, à partir de 280 s le signal délivré par la photorésistance augmente à cause de l'apparition de la buée. En reportant sur la courbe de la température, on peut lire directement la température de rosée, soit ici environ 10 °C. On utilise enfin le diagramme psychrométrique de l'eau et la température de la pièce pour déterminer l'humidité relative. Pour une température de 22 °C, on obtient ainsi 50 % d'humidité relative le jour de l'expérience, ce qui correspond assez bien à la valeur de 51 % donnée par l'hygromètre. Ce montage a l'avantage d'être simple, mais la mesure reste approximative car la température de la surface évolue au cours du temps, ce qui rend peu précis le moment d'apparition de la buée. La température minimale atteinte est également limitée par le système de refroidissement utilisant des glaçons. Une autre solution consisterait à contrôler la température du miroir en utilisant par exemple un module à effet Peltier.

**Finalement, pour liquéfier la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, il suffit de baisser la température en dessous du point de rosée.**

Ce principe est utilisé dans les déshumidificateurs d'air. Certaines sociétés proposent ainsi des systèmes électriques capables de récupérer l'eau potable pour la consommer.



Exemples de systèmes de production d'eau potable (Société *Water from air*)

Ces solutions nécessitent cependant de l'énergie électrique (pour pouvoir refroidir la surface notamment) et les systèmes utilisant des panneaux solaires reviendraient très chers à l'achat.

On souhaite dans notre projet pouvoir récupérer l'eau contenue dans l'air humide par un processus passif, c'est-à-dire qui ne consomme pas d'énergie, afin d'être utilisable dans des régions isolées avec peu de moyens. Dans la partie suivante on propose une étude d'un prototype de Warka Tower.

## Deuxième partie

### Une tour pour récupérer de l'eau

#### Réalisation d'un prototype de tour

Afin de nous rendre compte des contraintes imposées pour construire une tour avec des matériaux locaux, nous avons voulu fabriquer notre propre modèle réduit d'une *Warka Tower*. Nous avons utilisé du bambou et du fil de fer pour réaliser un modèle simple de tour d'une hauteur de 1,50 m. Nous avons ainsi fabriqué deux prototypes de tour avec des structures différentes (voir ANNEXE 2).



Pour mieux comprendre le rôle de la forme de la structure en bambou, nous avons contacté l'École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille (ENSAPL). Au cours de notre visite, nous avons compris qu'un projet d'architecture doit tout d'abord répondre aux besoins des habitants et s'insérer au mieux dans le paysage. Le bambou est par ailleurs un matériau local facile à travailler, qui permet notamment de réaliser une structure à la fois légère et résistante à base de réseaux de barres, que l'on appelle *grid shell* en architecture. Dans ce type de structure, il faut favoriser les formes triangulaires qui réalisent un *contreventement* permettant de consolider l'édifice tout en gardant un rendu aéré. Pour maintenir la tour en place et éviter qu'elle ne bascule, on peut utiliser des cordages pour la fixer au sol ou utiliser un socle (avec du sable par exemple) si la structure est assez rigide.

### Action du vent sur la tour

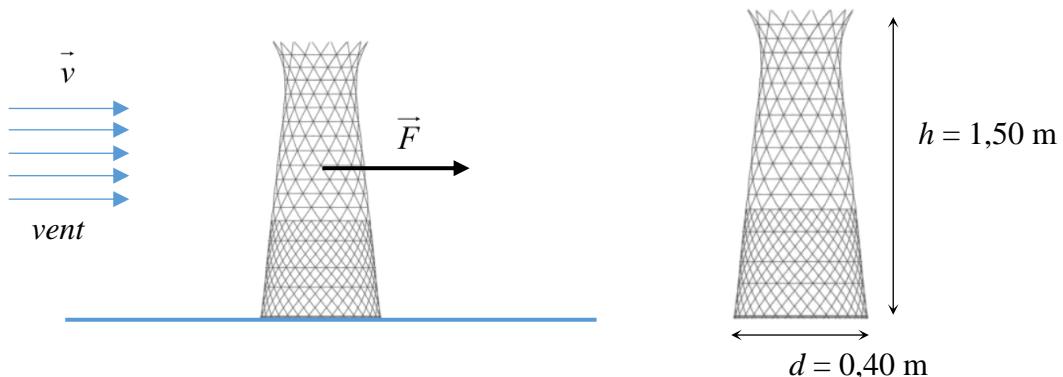
Nous avons décidé de nous intéresser à l'action du vent sur notre prototype de tour. Si la tour était simplement posée sur le sol, la moindre rafale de vent pourrait la faire basculer, c'est pourquoi il est nécessaire de la lester avec du sable réparti au niveau de sa base.

La vitesse du vent dépend de la localisation du lieu choisi. A Dunkerque, la vitesse moyenne du vent est d'environ 20 km/h, avec des rafales de l'ordre de 50 km/h, voire plus de 100 km/h en cas de tempête.

La force exercée par l'air sur un obstacle est appelée la *force de traînée*. Elle est dirigée dans le sens du vent et s'exprime par :

$$F = \frac{1}{2} \rho_{air} C S v^2$$

où  $v$  est la vitesse du vent (en m/s),  $\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$  est la masse volumique de l'air,  $S$  est la surface frontale de l'obstacle (c'est-à-dire la surface « vue » par le vent) et  $C$  est le coefficient de traînée qui caractérise la forme de l'obstacle.



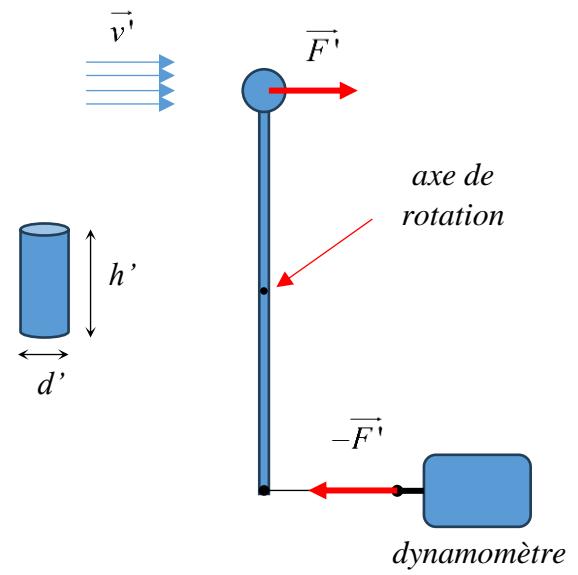
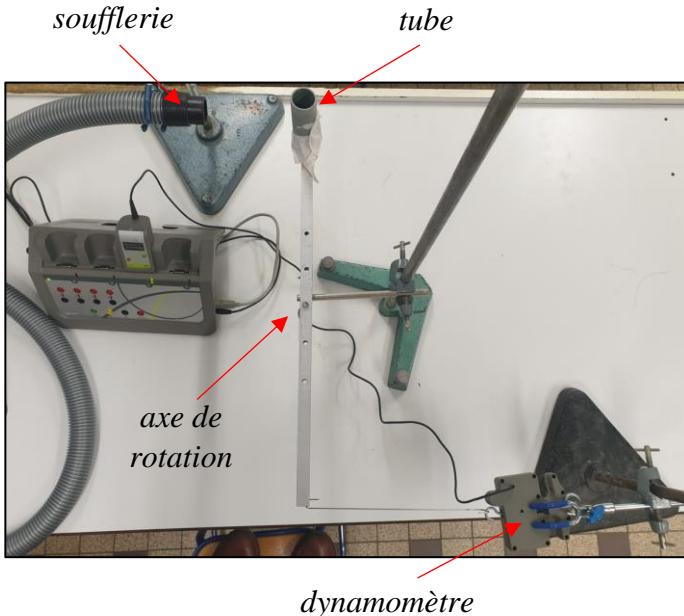
On suppose pour simplifier que notre tour est cylindrique de hauteur  $h$  et de diamètre  $d$ , on a alors :

$$S = d \times h = 0,60 \text{ m}^2$$

Pour un vent de vitesse 50 km/h, on a :  $v = 50 \times \frac{1000}{3600} = \frac{50}{3,6} = 14 \text{ m/s}$

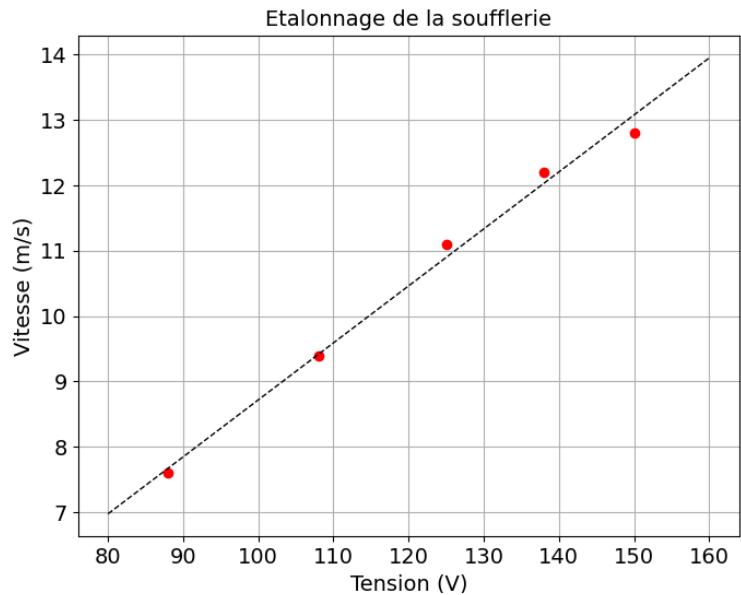
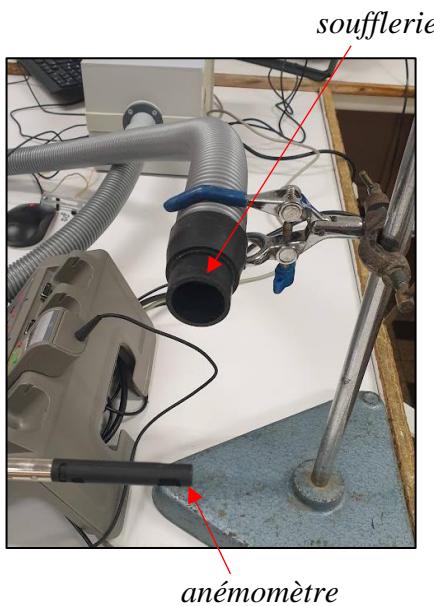
Pour pouvoir calculer la force exercée par l'air sur la tour, il faut maintenant connaître le coefficient  $C$ .

Nous avons donc fabriqué un banc de tests avec une soufflerie pour créer un écoulement à vitesse connue autour d'une tour miniature assimilée à un tube en PVC (de diamètre  $d' = 32 \text{ mm}$  et de hauteur  $h' = 107 \text{ mm}$ ).



Le cylindre est monté sur un bras en rotation autour d'un axe. La force  $\vec{F}'$  exercée par l'air sur le tube peut ainsi être mesurée directement par un dynamomètre car l'axe de rotation est situé au milieu de la barre.

On peut modifier la vitesse de l'air en réglant la tension  $U$  aux bornes du moteur de la soufflerie. On procède tout d'abord à un étalonnage de notre banc de test en mesurant la vitesse  $v'$  de l'air avec un anémomètre à fil chaud en fonction de la tension  $U$ .

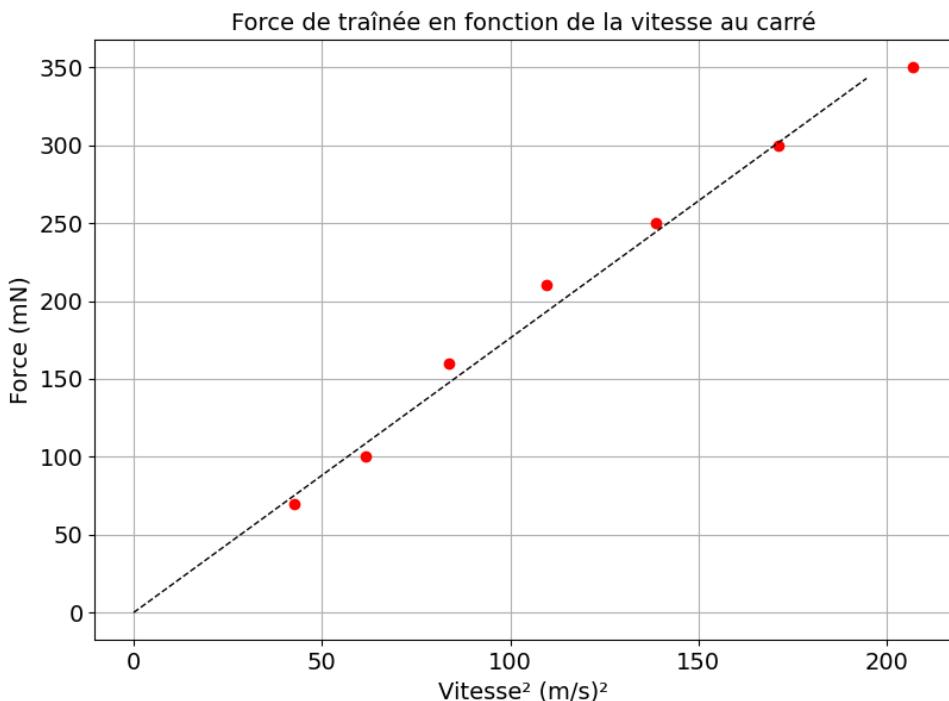


On obtient une droite d'étalonnage de la forme :  $v' = k \times U$  avec  $k = 0,087 \text{ m/s/V}$   
 On mesure enfin la force exercée par l'air sur la tour pour différentes tensions :

$U$ (V)	75	90	105	120	135	150	165
$F'$ (N)	0,07	0,10	0,16	0,21	0,25	0,30	0,35

La force s'exprime comme précédemment par :  $F' = \frac{1}{2} \rho_{air} C S' v'^2$  avec  $S' = d' \times h' = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

On trace donc  $F'$  en fonction de  $v^2$  :



On trouve bien graphiquement une relation de la forme :  $F' = a \times v^2$  avec  $a = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}^{-2} \cdot \text{s}^2$  obtenu grâce à une régression linéaire.

On en déduit le coefficient  $C$  (qui ne dépend que de la forme de l'obstacle) :  $C = \frac{2a}{\rho_{air} S} = 0,86$ .

Si on tient compte de la répartition statistique des points on obtient :  $C = 0,86 \pm 0,10$ .

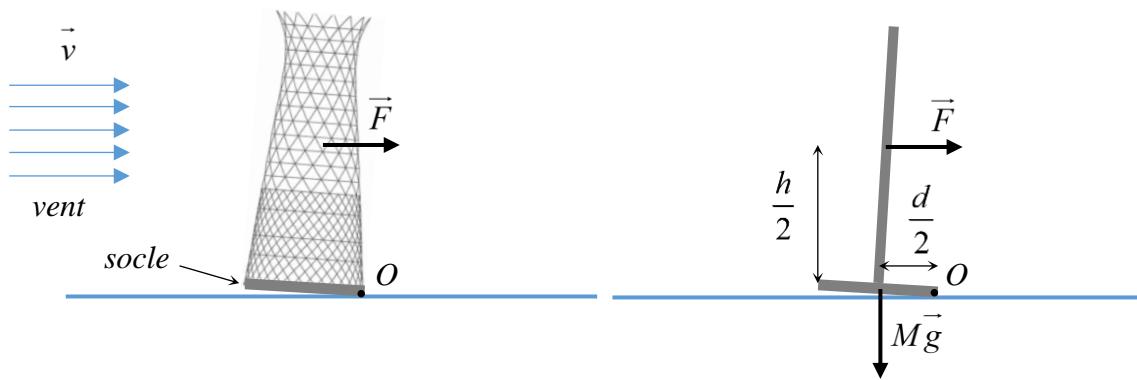
Cette valeur semble cohérente, intermédiaire entre la sphère ( $C = 0,47$ ) et le cube ( $C = 1,1$ ) (Wikipédia).

On peut maintenant calculer la force exercée par un vent de 50 km/h sur la tour de hauteur 1,50 m :

$$F = \frac{1}{2} \rho_{air} C S v^2 = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 0,86 \times 0,60 \times 14^2 = 61 \text{ N}$$

### Dimensionnement du socle

Cette force va s'appliquer au milieu de la tour et aura tendance à la faire basculer. On souhaite donc fixer la tour sur un socle contenant du sable et on cherche à estimer la masse de sable nécessaire. On utilise un modèle simple de la tour permettant de calculer cette masse.



Pour éviter que la tour ne pivote autour du point  $O$ , le moment du poids doit être supérieur au moment de la force de traînée :  $Mg \times \frac{d}{2} > F \times \frac{h}{2}$ , c'est-à-dire :  $M > \frac{Fh}{gd} = \frac{61 \times 1,50}{9,81 \times 0,40} = 23,3 \text{ kg}$ .

**Un sac de sable de 25 kg sera donc suffisant pour maintenir notre tour en place dans ces conditions.**

En pratique les architectes et les ingénieurs utilisent des logiciels qui calculent directement les efforts sur les bâtiments, ce qui leur permet d'adapter par exemple la taille des poutres ou de rajouter des renforts sous la forme de contreventements si nécessaire.

Notre *Warka Tower* peut maintenant être munie de son filet de récupération.

La partie suivante propose une étude de la capture des gouttelettes de brouillard par différents matériaux.

## Troisième partie

### Attraper des gouttelettes de brouillard

Certaines régions du monde sont peu irriguées par les pluies, mais selon les conditions météorologiques, il peut apparaître régulièrement du brouillard.

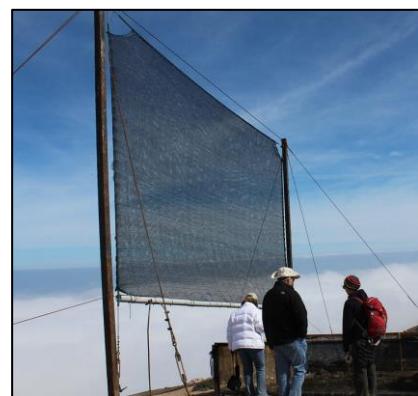
Le brouillard, constitué de fines gouttelettes d'eau, peut aussi être une source d'eau potable pour les habitants.

Les plantes et les animaux sont généralement bien adaptés pour capter ces gouttelettes et permettre leur survie en milieu hostile. Par exemple, le *ténébrion du désert* (*onymacris unguicularis*) ou encore le *stenocara* sont des coléoptères de la région du désert du Namib (Namibie, Afrique) capables de capter le brouillard sur leur carapace pour s'hydrater (Wikipédia).

De manière analogue, les filets à brouillard, comme les *Warka Towers*, permettent la récupération des gouttelettes d'eau avec un rendement de l'ordre de 10 L d'eau récupérée par jour et par mètre carré.



Ténébrion du désert (Source : Wikipédia)



Filet à brouillard au Chili (Source : Wikipédia)

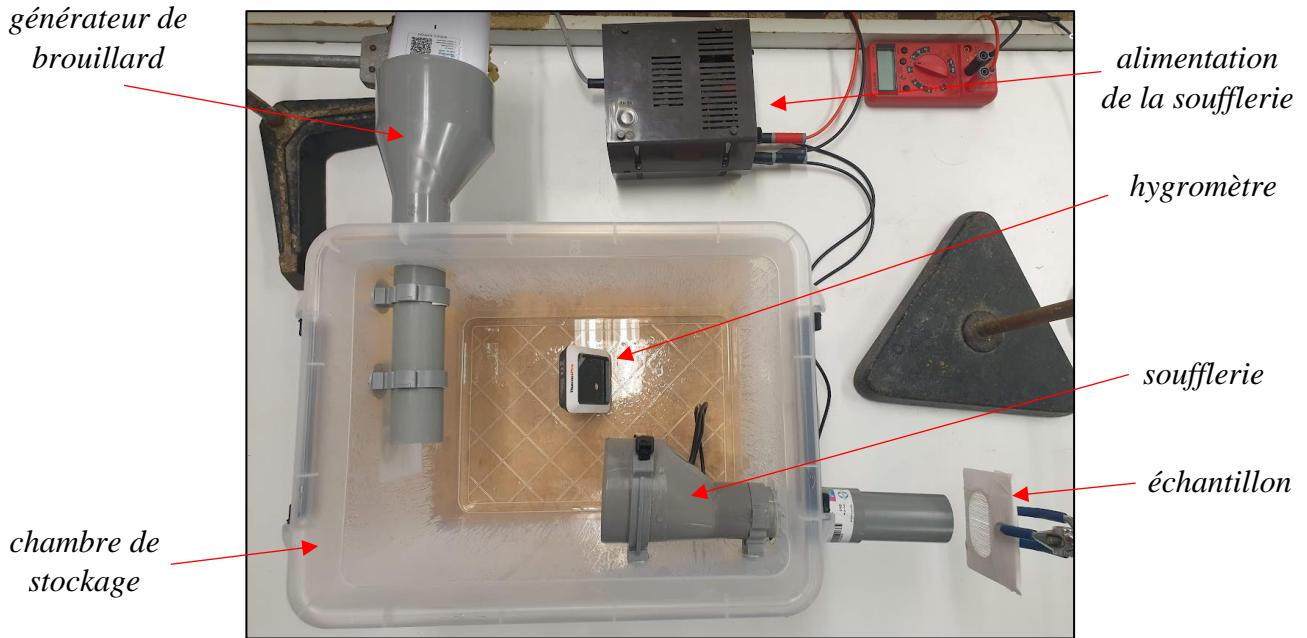
Quelles sont les caractéristiques des matériaux qui pourraient optimiser la récupération des gouttelettes ?

#### Du brouillard fait maison

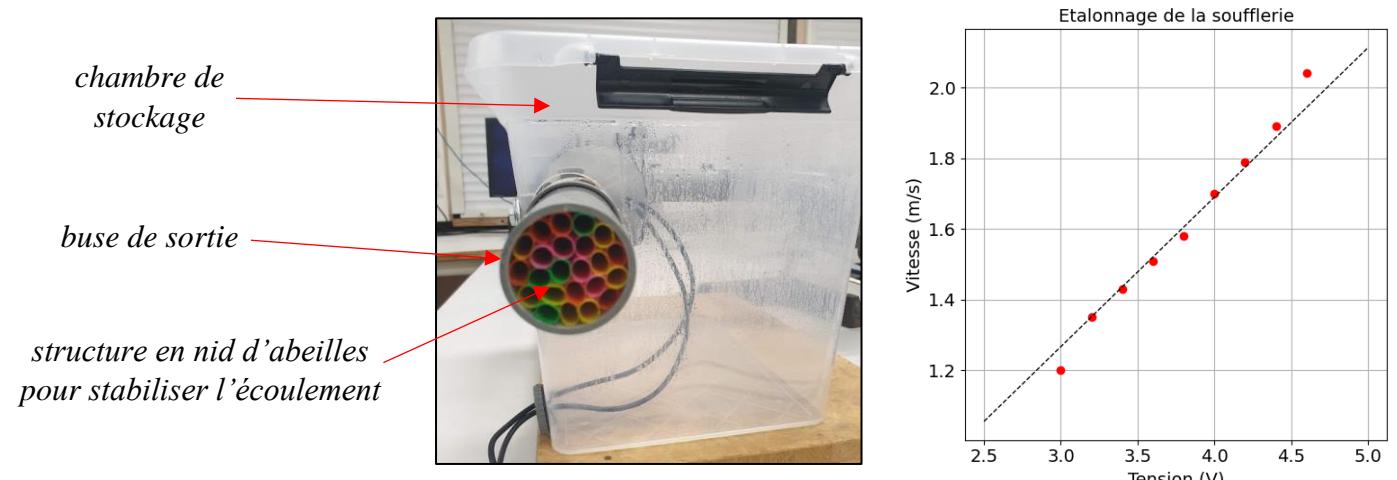
Nous avons fabriqué un banc d'essais permettant de tester les capacités de récupération de gouttelettes de différents matériaux plongés dans le brouillard.

Nous avons ainsi transformé une boîte en plastique en chambre de stockage de brouillard. Un défroisseur à vêtements constitue le générateur de brouillard et un ventilateur de sèche-cheveux sert de soufflerie pour éjecter le brouillard à une vitesse variable (jusqu'à 2 m/s) sur un échantillon.

L'humidité relative dans la boîte atteint ainsi 90 % pour une température de l'ordre de 40 °C.



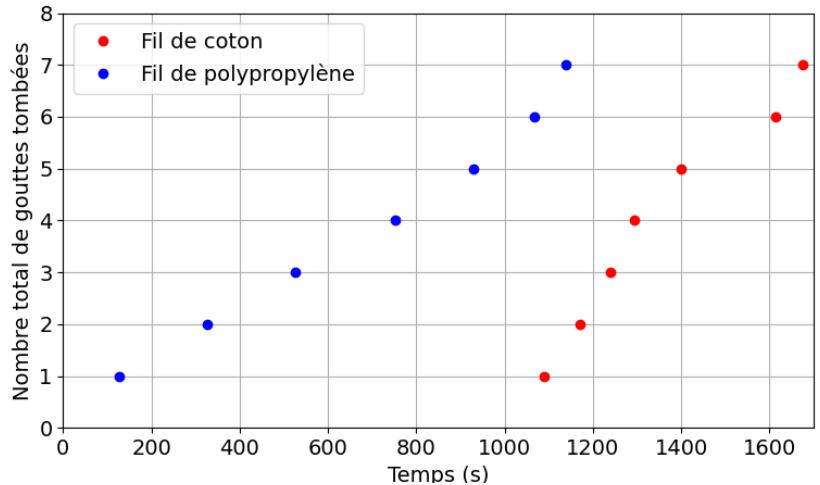
Nous avons placé des pailles alimentaires dans le tuyau de sortie pour stabiliser l'écoulement d'air et obtenir un jet régulier de brouillard. Nous avons ensuite procédé à un étalonnage de la soufflerie en mesurant la vitesse de l'écoulement à l'aide d'un anémomètre à fil chaud en fonction de la tension appliquée au moteur. Il sera ainsi possible de reproduire les expériences en maîtrisant les différents paramètres.



Pour nos premiers essais, nous avons réalisé un modèle simple de filet que nous avons placé dans le jet de gouttelettes à la sortie de la chambre à brouillard. La tension appliquée au moteur vaut 4,0 V. Nous avons testé l'expérience avec deux types de fils différents : du coton et du polypropylène.



Lorsque le filet est plongé dans le brouillard, les fils se chargent de gouttelettes qui finissent par ruisseler et tomber. On compte alors le nombre de gouttes récupérées au cours du temps. Nous avons rassemblé les résultats sur le graphe suivant :



Avec le fil de coton, la première goutte apparaît après plus de 18 minutes dans l'écoulement. Les gouttes tombent ensuite avec une durée moyenne de 90 s entre deux gouttes.

Avec le fil de polypropylène, la première goutte très rapidement, après seulement 2 minutes dans l'écoulement. Les gouttes tombent ensuite toutes les 170 s en moyenne.

Une goutte pèse en moyenne 0,03 g (mesure effectuée sur plusieurs gouttes similaires avec une balance précise) et a donc un volume de  $3.10^{-5}$  L. La surface de capture correspond à un disque de 40 mm de diamètre (taille de l'écoulement en sortie), soit  $1,3.10^{-3}$  m<sup>2</sup>. Avec une goutte toutes les 90 s, le filet en coton a une efficacité de capture de  $\frac{3.10^{-5}}{90 \times 1,3.10^{-3}} = 2,6.10^{-4}$  L.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, soit encore 23 L par m<sup>2</sup> et par jour (24 h, soit 24 x 3600 s). Le même calcul appliqué au filet de polypropylène donne un rendement de 12 L par m<sup>2</sup> et par jour. Notre système reproduit fidèlement le principe du filet à brouillard, mais les résultats semblent dépendre fortement du matériau utilisé. En particulier, on se demande pourquoi il faut attendre si longtemps avant d'obtenir la première goutte avec le coton et pourquoi le rendement est plus faible avec le polypropylène...

### Des matériaux textiles aux propriétés étonnantes

Les matériaux utilisés généralement pour récupérer les gouttelettes sont des matériaux textiles. Pour en savoir plus à ce sujet nous avons pris contact avec l'École Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT) de Roubaix près de Lille et nous avons rencontré des professeurs et des chercheurs qui ont pu nous éclairer sur les différentes spécificités de chaque matériau.

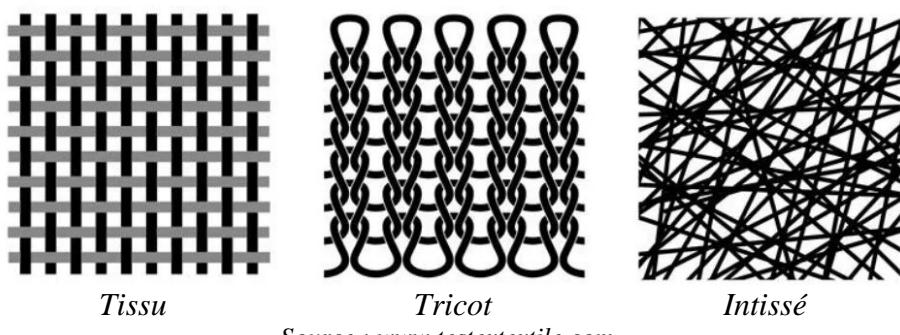
Nous avons ainsi appris à comprendre les matériaux textiles en découvrant leur processus de fabrication. Tout commence avec la fibre, qui est la plus petite unité des matériaux textiles. Une fibre est un filament fin et souple, souvent d'origine naturelle (comme le coton ou la laine) ou synthétique (comme le polyester ou le polypropylène).

Ces fibres sont ensuite transformées en fil grâce à un processus appelé filature, où les fibres sont torsadées ensemble pour former une structure continue et résistante. On obtient alors un fil qui est plus résistant et de longueur aussi grande que nous le souhaitons, que l'on pourra tisser ou tricoter.

Le fil est ensuite utilisé pour créer différentes structures textiles :

- Le *tissu* est fabriqué par un procédé de tissage, où deux ensembles de fils sont croisés perpendiculairement pour former une surface plane et solide.
- Le *tricot*, lui, est réalisé en croisant les fils sous forme de boucles. Cela rend le tricot plus extensible et doux que le tissu, ce qui est idéal pour des vêtements comme les pulls ou les t-shirts.
- Le *matériau intissé*, contrairement au tissu et au tricot, n'utilise pas de fil. Il est fabriqué directement à partir de fibres qui sont liées entre elles par des procédés mécaniques (comme le feutrage), thermiques (chauffage)

ou chimiques (liants). Cela donne un matériau souvent plus léger et plus facile à produire, on les utilise en majorité pour des applications comme les lingettes ou les filtres.



Source : [www.testextile.com](http://www.testextile.com)

Suite à notre visite et grâce à l'implication des chercheurs de l'ENSAIT (en particulier Christine Campagne, Ostyn Hubert, Stéphane Giraud et Philippe Vroman), nous avons pu obtenir des échantillons de tissus, de tricots et de textiles intissés avec des matériaux différents réalisés spécialement pour notre projet.

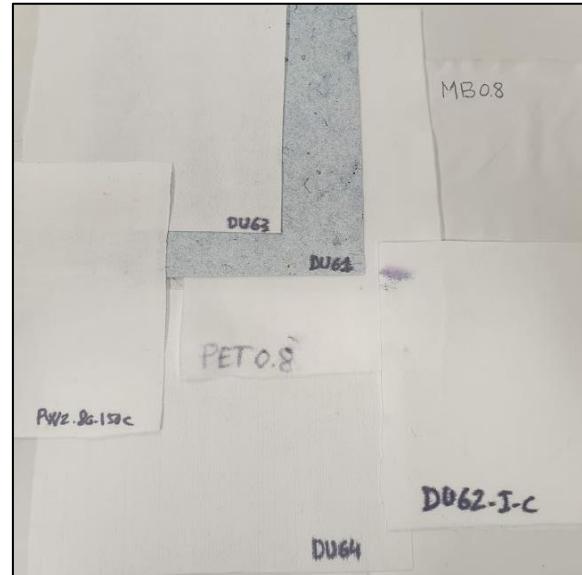
Avant de placer les matériaux dans le jet de brouillard, on souhaite d'abord étudier leur comportement vis-à-vis des gouttelettes d'eau.

Nous disposons de 7 échantillons de textiles intissés avec des compositions différentes. Les caractéristiques (nature et taille des fibres) sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

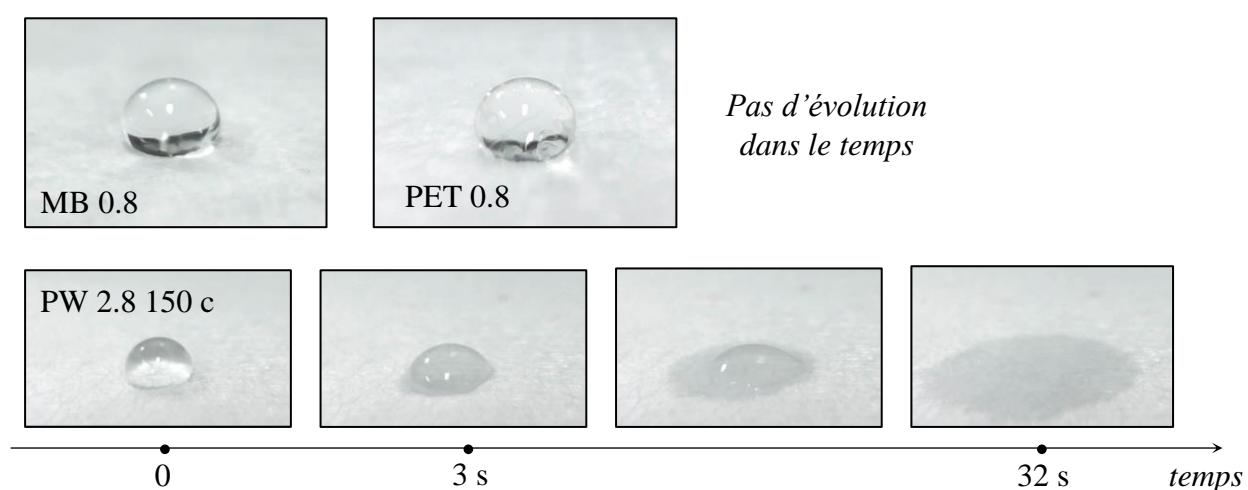
Référence	Composition
MB 0.8	100 % PP (fibres submicroniques 0,8 µm)
PET 0.8	100 % PET (fibres microniques 9 µm)
DU 61	40 % PET, 30 % PA6, 30 % coton (60 % supermicrofibre + coton hydrophile)
DU 62Ic	40 % PET, 30 % PA6, 30 % viscose (60 % supermicrofibre + viscose hydrophile)
DU63	70 % PET, 30 % PA6 (60 % supermicrofibre + fibre standard PET)
DU64	70 % PET, 30 % PA6 (60 % supermicrofibre + microfibre)
PW2.80 150 c	60 % PET, 40 % PA6 (80 % supermicrofibre)

PP : polypropylène, PET : polyéthylène téréphtalate

PA6 : polyamide (nylon)



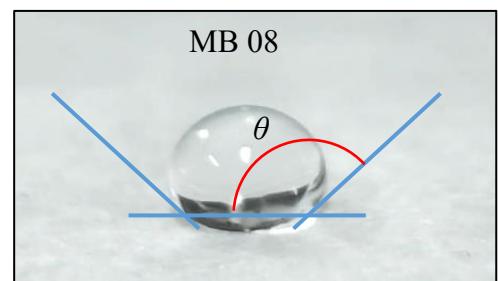
Nous avons déposé une goutte d'eau (avec un compte-gouttes) sur chaque échantillon posé à plat et observé son évolution au cours du temps en vidéo. Voici quelques clichés obtenus :



*Pas d'évolution  
dans le temps*

Pour des matériaux comme le MB 0.8 et le PET 0.8, la goutte d'eau déposée sur la surface reste stable dans le temps. On peut alors mesurer l'angle de mouillage qui caractérise le degré d'hydrophobie du matériau :

Référence	Angle de mouillage $\theta$
MB 0.8	entre 120° et 130°
PET 0.8	entre 120° et 130°

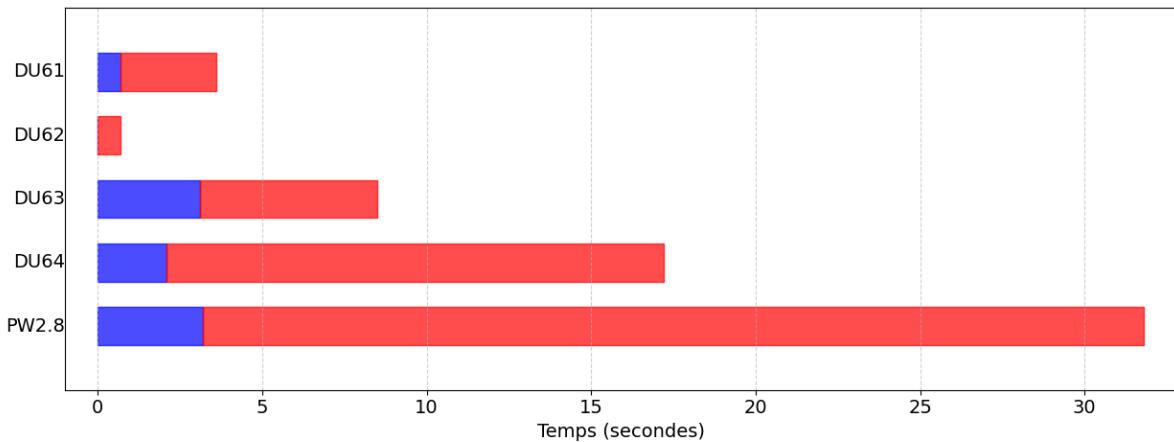


La mesure de l'angle de mouillage est délicate à effectuer car le résultat dépend de l'orientation de la caméra. La surface est dite hydrophile lorsque  $\theta < 90^\circ$  et hydrophobe pour  $\theta > 90^\circ$ . Avec ici un angle de mouillage  $\theta > 120^\circ$  les matériaux MB 0.8 et PET 0.8 sont même super hydrophobes !

Pour les autres matériaux intissés la mesure de l'angle de mouillage est rendue difficile par le fait que la goutte finit par être absorbée par le textile. Il apparaît cependant des différences dans les durées de vie caractéristiques des gouttes à la surface selon le matériau utilisé que l'on peut analyser à l'aide des vidéos.

On dépose la goutte à l'instant initial et on observe la goutte à la surface. A partir d'un instant noté  $t_1$ , la goutte commence à être absorbée, jusqu'à l'instant  $t_2$  où elle a complètement disparu. On reporte les instants  $t_1$  et  $t_2$  pour les différents échantillons dans le tableau suivant, que l'on visualise avec le graphique ci-dessous (en bleu la goutte reste à la surface et en rouge la goutte est en train d'être absorbée jusqu'à disparition totale) :

Référence	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)
DU 61	0,7	3,6
DU 62Ic	0	0,7
DU63	3,1	8,5
DU64	2,1	17,2
PW2.80 150 c	3,2	31,8



Ainsi les matériaux comme le DU62 et le DU61 sont particulièrement hydrophiles et vont absorber très rapidement une goutte déposée en surface (le DU62 ne laisse même pas le temps à la goutte de se former à la surface qu'elle est déjà absorbée !). Les matériaux DU63, DU64 et PW2.80 150 c sont également hydrophiles, avec des temps caractéristiques d'absorption plus importants.

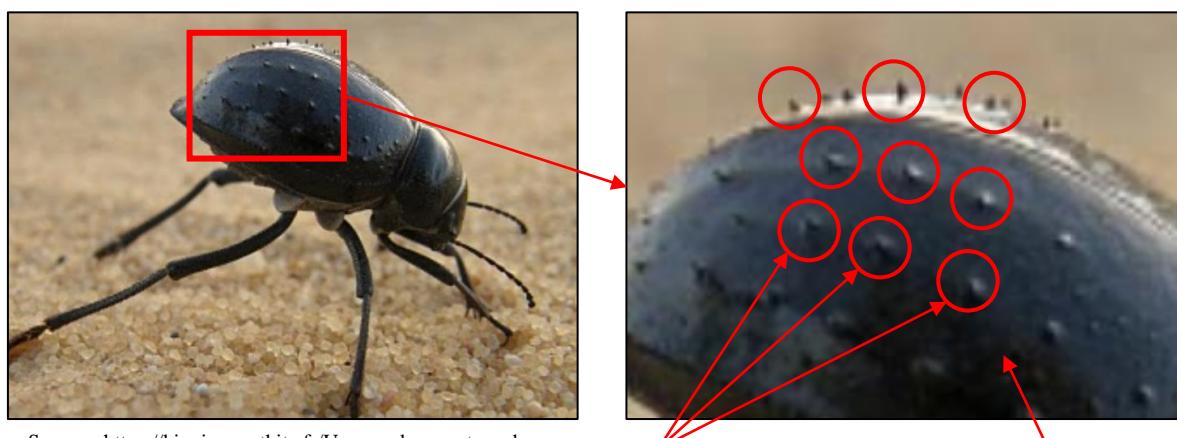
On peut déduire simplement de ces observations que le fil en coton que nous avons utilisé pour le filet est un matériau plutôt hydrophile (comme dans le DU61), tandis que le fil en polypropylène (PP) est un matériau plutôt hydrophobe (comme dans le MB 0.8). Quand le filet en coton est plongé dans les gouttelettes du

brouillard, les gouttes qui se forment à la surface sont, dans un premier temps, absorbées par le matériau hydrophile. Lorsque les fibres de coton sont complètement remplies d'eau, les gouttelettes supplémentaires ne peuvent plus être absorbées et finissent par ruisseler, ce qui explique le retard observé lors de l'apparition des gouttes. Avec le filet en polypropylène, les gouttes qui apparaissent à la surface ne sont pas absorbées et tombent dès qu'elles sont suffisamment lourdes.

En pratique, le choix du matériau pour une Warka Tower devra aussi tenir compte du coût du matériau, de la facilité de mise en place et de la durabilité dans le temps. En général, le filet utilisé est en polypropylène qui a l'avantage d'avoir une bonne résistance mécanique, ainsi qu'une bonne résistance à l'humidité et au soleil.

## Vers du biomimétisme

La nature offre déjà des solutions efficaces pour capter les gouttelettes de brouillard, même dans des conditions difficiles. Ainsi la carapace du ténébrion du désert est une surface hydrophobe parsemée de petites pointes hydrophiles. Les gouttelettes d'eau sont capturées par les zones hydrophiles, grossissent pour former des gouttes qui vont pouvoir s'écouler sur la surface hydrophobe et atteindre la bouche du coléoptère pour l'hydrater.



Source : <https://bionique.artbite.fr/Un-scarabee-capteur-de-brouillard.html>

On peut s'inspirer de la nature en associant un matériau hydrophile et un matériau hydrophobe pour augmenter l'efficacité de la récupération des gouttes. C'est le principe du biomimétisme.

On dispose de deux échantillons similaires constitués de l'association de deux tricots, un tricot fait de fils de coton (hydrophile) et un tricot fait de fils de polyester (hydrophobe). Dans l'échantillon 1, les tricots sont assemblés par du fil de coton. Dans l'échantillon 2, les tricots sont assemblés par du fil de polyester.

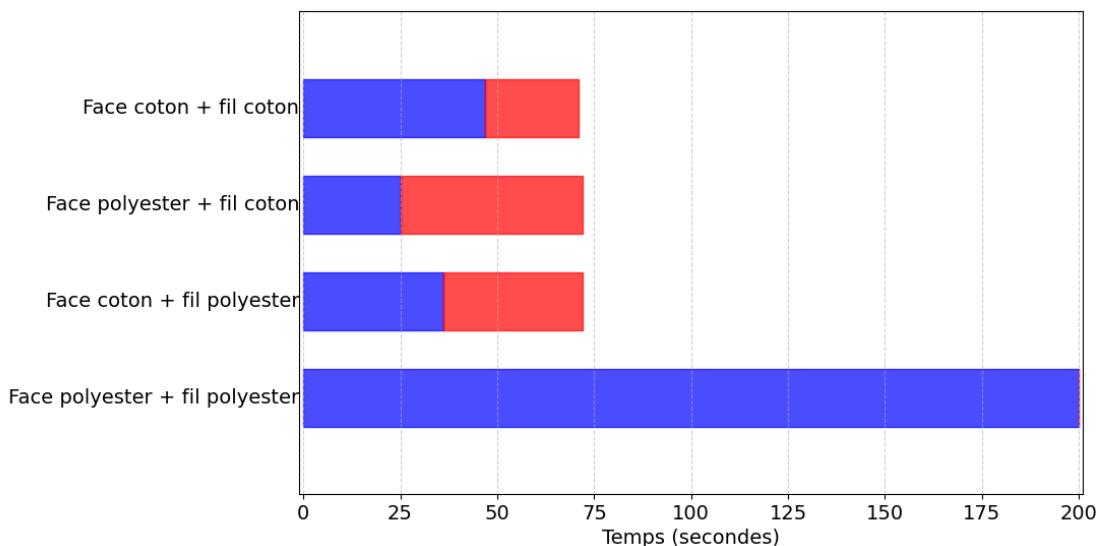


Échantillon 1

Échantillon 2

On obtient ainsi plusieurs configurations possibles : surface hydrophile (face coton) avec points hydrophiles ou surface hydrophobe (face polyester) avec points hydrophiles pour l'échantillon 1 ; surface hydrophile (face coton) avec points hydrophobes ou surface hydrophobe (face polyester) avec points hydrophobes pour l'échantillon 2. Pour tester le comportement de chaque face vis-à-vis des gouttelettes, on dépose à nouveau une goutte à la surface et on mesure la durée d'absorption par le matériau textile.

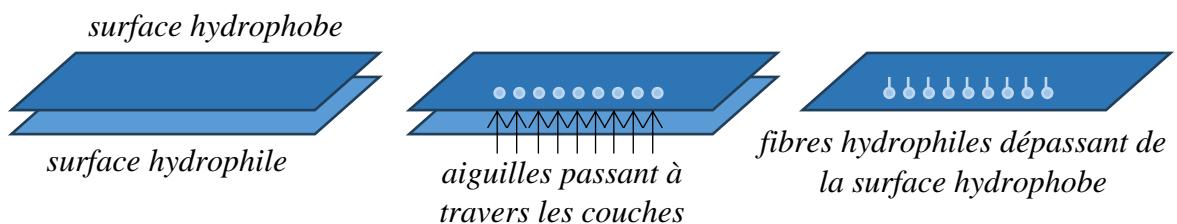
On obtient les résultats suivants (en bleu la goutte n'évolue pas, en rouge la goutte est absorbée) :



On note quelques différences dues à la structure composite du textile. La face coton est toujours hydrophile, que le fil soit en coton ou en polyester (avec peu de différences entre les deux). La face polyester avec fil polyester est complètement hydrophobe. En revanche, la face polyester (hydrophobe) parsemée de fils de coton (hydrophile) devient hydrophile : une goutte d'eau déposée à la surface est absorbée par le fil de coton. On aurait ici une surface analogue à la carapace du ténébrion du désert...

Nous avons placé ces échantillons à la sortie de notre générateur de brouillard pour voir quelle face permettrait de capturer le plus de gouttelettes. Avec les expériences réalisées jusqu'à présent, nous n'avons récupéré aucune gouttelette, même après une demi-heure dans le jet de brouillard. En particulier avec l'échantillon présentant la face polyester avec fil coton côté brouillard, la face arrière en coton se charge d'eau sans arrêt car les gouttelettes sont transférées d'une face à l'autre par le fil de coton. Il ne semble donc pas possible de récupérer l'eau par ruissellement dans ces conditions.

Pour remédier à ce problème, Philippe Vroman, chercheur au laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT, propose de réaliser pour notre projet un assemblage de fibres intissées qui pourrait imiter la carapace du ténébrion du désert. Il s'agit de superposer une couche super hydrophobe (comme le MB 0.8 étudié précédemment) avec une couche super hydrophile (comme le DU62 ou le DU61), puis de faire dépasser des fibres hydrophiles à travers la surface hydrophobe à l'aide d'aiguilles régulièrement réparties sur la surface.



La courte fibre hydrophile à la surface pourrait ainsi se charger facilement en eau et permettre la création d'une goutte qui pourra ruisseler sur la surface hydrophobe. Il reste encore à réaliser ces échantillons au laboratoire GEMTEX et à tester l'efficacité de cette méthode de récupération du brouillard... affaire à suivre !

# Conclusion

---

Notre étude a permis de mettre en évidence les conditions de récupération de l'eau contenue dans l'air humide. On peut ainsi forcer la liquéfaction de la vapeur d'eau sur une surface dont la température est inférieure à la température de rosée (qui dépend de l'humidité relative et de la température de l'air). Parmi les différents systèmes de récupération de l'eau atmosphérique, les Warka Towers sont une solution simple et élégante qui permet de concilier efficacité et esthétique. La structure en bambou doit cependant être suffisamment solide pour pouvoir soutenir le filet de récupération et résister au vent. Enfin, il est possible de concevoir des techniques de récupération des gouttelettes d'eau contenues dans le brouillard par biomimétisme en utilisant des surfaces combinant des matériaux hydrophiles et des matériaux hydrophobes. En réalisant des échantillons à base de textiles intissés de différentes propriétés il sera possible de déterminer la configuration optimale et peut-être d'obtenir une efficacité de récupération proche de la carapace du ténébrion du désert.

## Bibliographie et références

---

- Pour comprendre l'humidité dans l'air

Courty, J.-M., Kierlik, E. *Un verre de rosée ou de brouillard ?* Dans *La physique buissonnière* (pp. 66-69). Éditions Belin-Pour la science.

Courty, J.-M., Kierlik, E. *Vapeurs sous pression.* Dans *La physique buissonnière* (pp. 58-61). Éditions Belin-Pour la science

Corboz, Y. (2000). *Condensation et condensation ! Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP)*, 94(820), Janvier.

Site wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression\\_de\\_vapeur\\_saturante](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_vapeur_saturante)

- Sur le projet des Warka Towers et la construction du prototype :

Site officiel du projet Warka Water : <https://warkawater.org/>

Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (Centrale Lyon) : <https://ltds.ec-lyon.fr/?p=1891>

- Entreprise de récupération de l'eau sur le principe du déshumidificateur d'air :

<https://waterfromair.fr/>

- Principe des systèmes de récupération de l'eau dans l'air :

Guyon, E., Hulin, J.-P., Moisy, F., Rabaud, M. *Ratisser les eaux du ciel.* Dans *L'impermanence du monde* (pp. 32-41). Éditions Flammarion.

- A propos du ténébrion du désert et sa capacité à capter le brouillard :

Site wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Onymacris\\_unguicularis](https://fr.wikipedia.org/wiki/Onymacris_unguicularis)

- Principe de l'expérience de récupération des gouttelettes de brouillard :

Labbé, R., Duprat, C. (2019). *Capturing aerosol droplets with fibers.* *Soft Matter*, 15, 6946-6951.

## Remerciements

---

Nous tenons à remercier Christine Campagne de l'ENSAIT (École Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles) à Roubaix pour la visite de l'école et son aide apportée pour l'étude des matériaux textiles, Philippe Vroman du laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT pour les échantillons de textiles intissés et ses explications, Nadia Lecocq de l'ENSAPL (École Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Lille) pour la visite de l'école d'architecture et son aide dans notre projet, Delphine Désert et Mohammad Mansouri, enseignants à l'ENSAPL, pour leurs explications complémentaires sur la structure architecturale de la Warka Tower et Stéphane Beaudonnet pour la visite de l'atelier. Merci à nos professeurs encadrants Pascaline Dépret et Benoît Dépret pour nous avoir accompagnés tout le long de ce projet.