

# HYGRO 2.0

(Projet PDP)

V. ANSELME  
L. DAO  
T. de FRANCE  
E. le BELLOUR  
V. PRATT  
A. SONNEY

LYCÉE MILITAIRE DE SAINT CYR

PROFESSEUR RÉFÉRENT : JC JOUAN



# SOMMAIRE

RÉSUMÉ	3
INTRODUCTION	3
<b>I. EXPERIENCES PRELIMINAIRES</b>	
1. CHOIX DE L'ÉCAILLE	3
2. MOUVEMENT DE L'ÉCAILLE DANS L'EAU	5
3. SÉCHAGE DE L'ÉCAILLE	7
<b>II. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE</b>	
1. HUMIDITÉ RELATIVE ET ABSOLUE	8
2. HUMIDITÉ ET SOLUTIONS SATURÉES	8
3. ETUDE DE LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE	10
4. UN HYGROMÈTRE LOW-COST	12
<b>III. ETUDE PHYSIQUE DE LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE</b>	
1. L'EFFET BILAME THERMIQUE	13
2. UN BILAME HYDRIQUE	14
3. ETUDE DE LA COURBURE EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ	15
CONCLUSION	21
REMERCIEMENTS	21
BIBLIOGRAPHIE	22
ANNEXE : ETUDE THÉORIQUE DE L'ANGLE DE DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE	23

## RÉSUMÉ :

Nous avons réalisé un hygromètre “low cost” basé sur la propriété que possède une écaille de pomme de pin à se déformer avec l’humidité puis étudié les mécanismes physiques responsables de cette déformation. Cette étude nous a amené à concevoir un dispositif bio inspiré mimant le mouvement de l’écaille comme le montre la vidéo accompagnant ce rapport <https://youtu.be/51B2eygn0dw>.

## INTRODUCTION

Par temps sec les pommes de pin sont ouvertes. Par temps humide les pommes de pin se ferment. Partant de cette observation, nous nous sommes demandés s’il était possible de réaliser un hygromètre « low cost » basé sur la déformation de l’écaille. La mesure de l’humidité revêt une importance dans de nombreuses situations : du contrôle de l’humidité d’une serre, à la conservation des œuvres d’art en passant par la régulation de l’humidité dans l’habitat. Pour mener à bien notre projet et approfondir les mécanismes physiques responsables du mouvement de l’écaille nous avons contacté M. Etienne Reyssat de l’ESPCI. L’étude physique de la déformation de l’écaille fera ainsi l’objet d’une troisième et dernière partie. La première partie étant consacrée à quelques expériences préliminaires qui nous ont permis de visualiser le mouvement des écailles de pomme de pin.

## I. EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

La première étape du projet a consisté à choisir la pomme de pin sur laquelle travailler dans la suite. Pour cela nous avons étudié qualitativement le comportement de différentes écailles, issues de différentes variétés de pins.

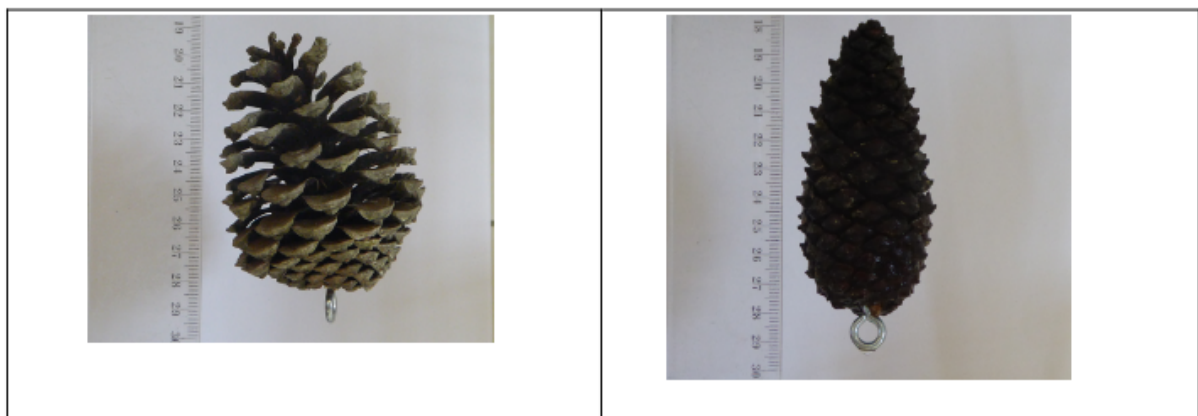
### 1. CHOIX DE L'ÉCAILLE

Les variétés de pin sont diverses : pin sylvestre (le plus commun), pin maritime, épicéa, pin pleureur d’Himalaya comme le montre la **Figure 1**.

Nous avons commencé par observer la déformation de différentes écailles que nous avons immergées dans l’eau. Notre choix s’est tout de suite porté sur les écailles de pin maritime de par leur taille, plus grandes que celles du pin sylvestre donc plus faciles à observer et de par l’amplitude de leur déformation importante. Pour les pommes de pins allongées, l’amplitude de déformation est plus faible. Nous pouvons voir sur la **Figure 2**, une pomme de pin maritime ouverte puis fermée suite à une immersion dans l’eau.

	
<p>Pin sylvestre (<i>pinus sylvestris</i>) maximum 5 cm de long</p>	<p>Epicéa (<i>Picea abies</i>) jusqu'à 18 cm de long</p>
	
<p>Pin maritime (<i>pinus pinaster</i>) jusqu'à 20 cm de long</p>	<p>Pin pleureur d'Himalaya (<i>Pinus Wallichiana</i>) 15 à 25 cm de long</p>

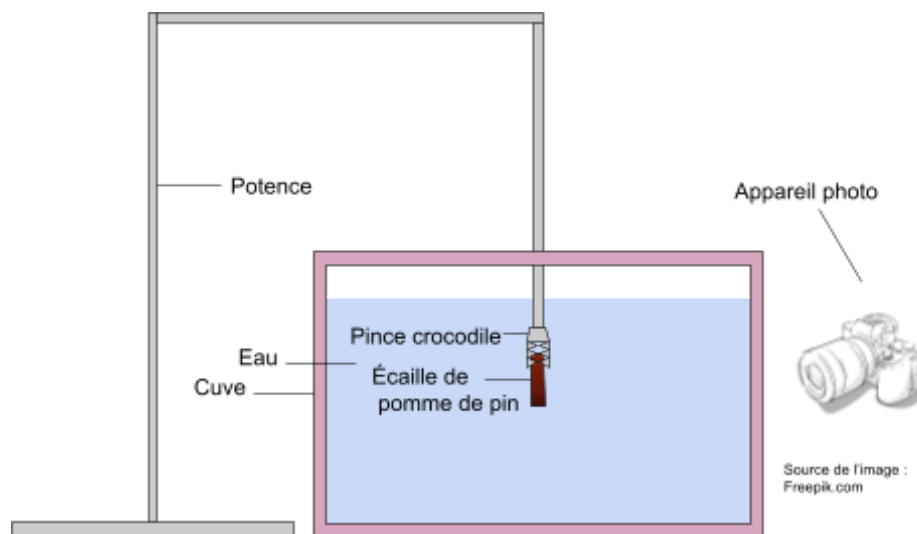
**Figure 1** : Quelques variétés de pommes de pin récoltées



**Figure 2** : Pomme de pin maritime ouverte et fermée

## 2. MOUVEMENT DE L'ÉCAILLE DANS L'EAU

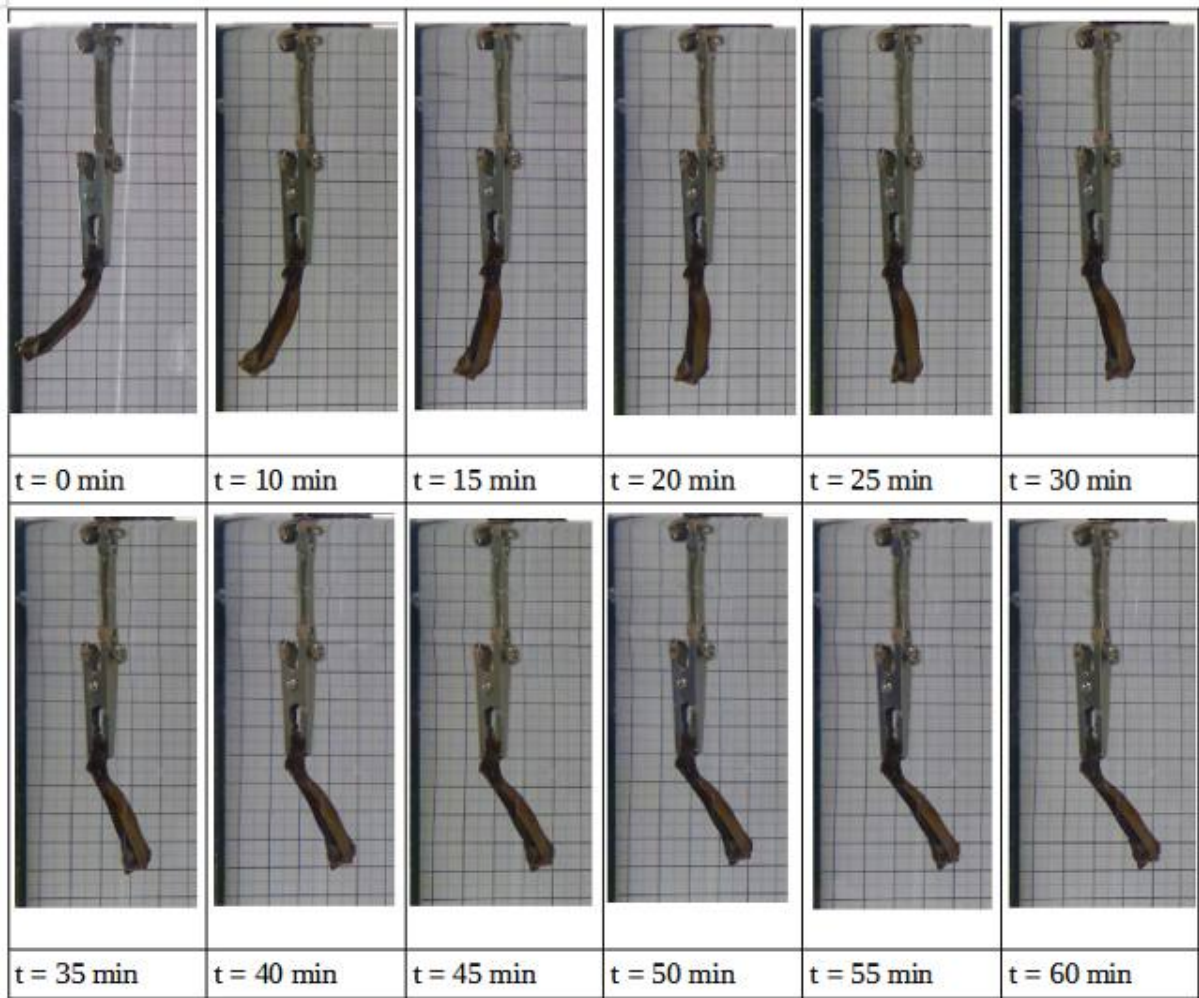
L'étape suivante a consisté à étudier le mouvement de l'écaille dans l'eau. Pour cela nous avons réalisé l'expérience ci-dessous : une écaille placée depuis un certain temps à l'étuve est fixée à une pince crocodile et immergée, à la date  $t = 0$ , dans de l'eau à température ambiante ( $20^{\circ}\text{C}$ ). Une photo de l'écaille est prise à intervalle de temps régulier. Une feuille de papier graduée en cm et fixée à la cuve permet d'avoir un étalon de longueur pour les photos. Les photos sont ensuite exploitées avec le logiciel Gimp ® qui nous permet de mesurer l'angle entre le point de fixation de l'écaille et son extrémité en fonction du temps. Le schéma du montage est représenté **Figure 3** et une chronophotographie du mouvement de l'écaille **Figure 4**.



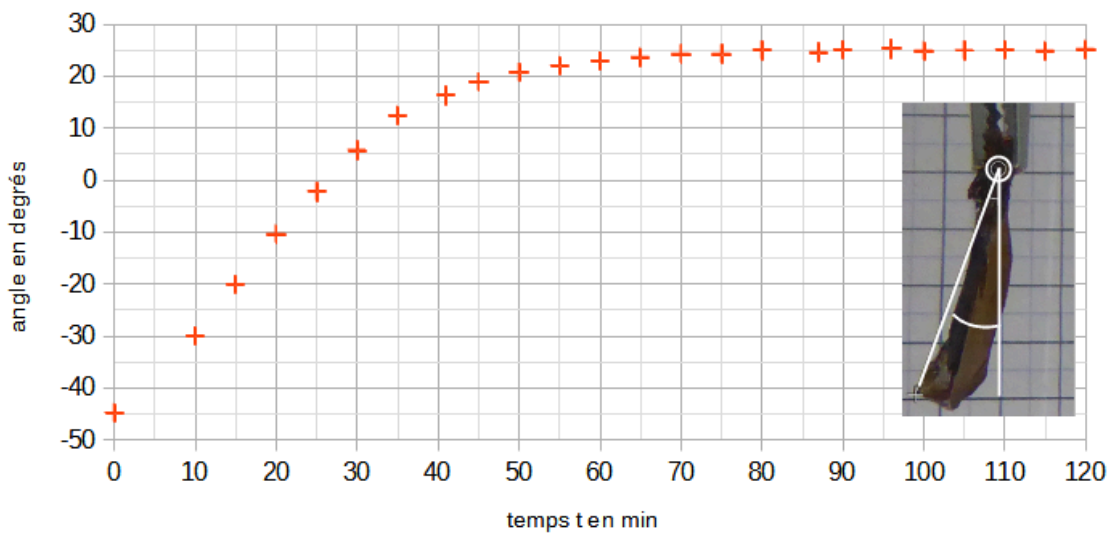
**Figure 3** : Schéma de l'expérience

Les résultats obtenus sont représentés sur la **Figure 5**. Nous observons une déformation angulaire qui atteint une asymptote au bout de 60 minutes. L'amplitude de déformation angulaire est de 70 degrés sur 40 minutes ce qui correspond à une vitesse angulaire moyenne de :

$$\frac{70^{\circ}}{40 \text{ min}} \sim 1,75^{\circ} \cdot \text{min}^{-1}.$$



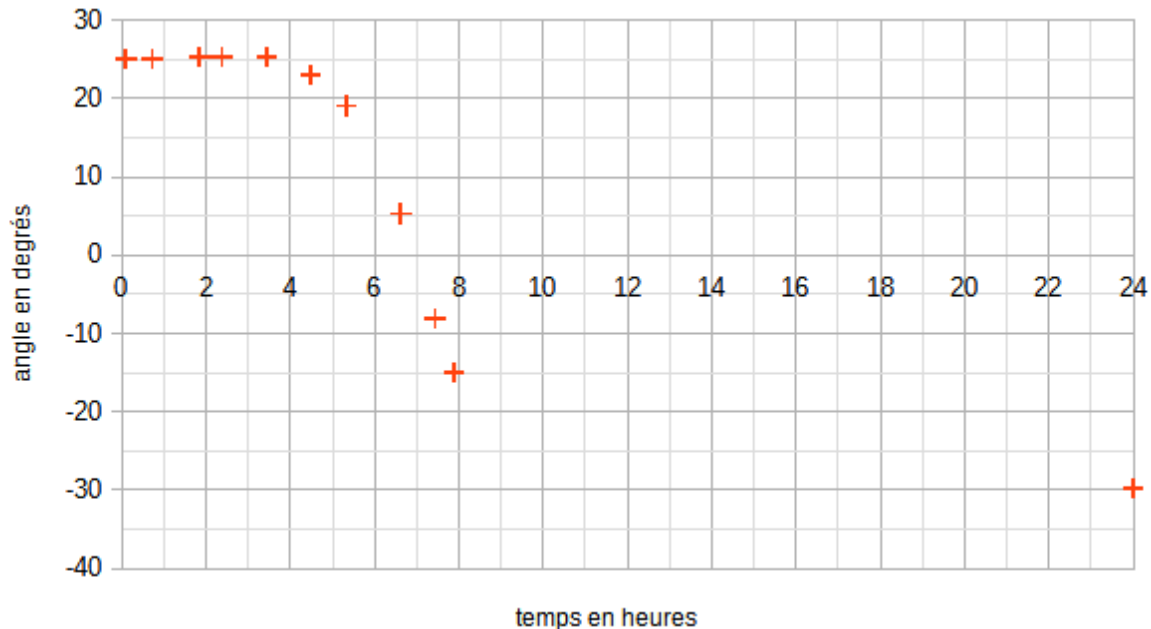
**Figure 4:** Chronophotographie du mouvement de l'écaille



**Figure 5 :** Angle de déformation de l'écaille (en degrés) en fonction du temps (en min) lors de la phase d'immersion.

### 3. SÉCHAGE DE L'ÉCAILLE

Après avoir étudié le mouvement de l'écaille dans l'eau, nous nous sommes intéressés à la phase de séchage de l'écaille. Nous avons réalisé une expérience similaire à la précédente: l'écaille est initialement immergée dans l'eau depuis un certain temps puis laissée à l'air libre. Nous obtenons les résultats de la **Figure 6**.



**Figure 6** : Angle de déformation de l'écaille en fonction du temps lors de la phase de séchage.

Nous observons que le mouvement de l'écaille commence 4h après le début de l'expérience et nous estimons la durée du mouvement à 6h pour une amplitude de déformation angulaire de 55 degrés soit une vitesse angulaire de déformation de :

$$\frac{55^\circ}{6h} \sim 9^\circ \cdot h^{-1} \sim 0,15^\circ \cdot \text{min}^{-1}.$$

La vitesse du mouvement lors du séchage est donc 10 fois plus faible que lors de la phase d'immersion. Les mécanismes physiques mis en jeu lors du séchage (évaporation d'eau à l'air) et de l'immersion (imprégnation en eau) ont donc des échelles de temps différentes.

Notons également que la déformation angulaire en fin d'expérience est de  $-30$  degrés et que l'écaille ne retrouve pas la déformation angulaire de  $-45$  degrés (**Figure 5**) qu'elle avait en sortie de l'étuve. Ceci s'explique par le fait que le taux d'humidité de l'air est différent de celui de l'étuve. C'est cette dépendance de la déformation en fonction de l'humidité que nous nous proposons d'étudier dans le paragraphe suivant. Ce qui nous amène à la question: **comment contrôler l'humidité?**

## II. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE

Après avoir rappelé quelques notions sur l'humidité nous aborderons l'astuce trouvée pour la contrôler. Nous serons alors en mesure d'étudier la déformation angulaire en fonction de l'humidité.

### 1. HUMIDITÉ RELATIVE et ABSOLUE [Référence 1]

L'humidité absolue correspond à la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné. Un volume d'air fermé en présence d'eau liquide se sature progressivement en vapeur d'eau : la masse maximale d'eau que peut contenir 1 m<sup>3</sup> d'air est  $m_{\max} = 23 \text{ g}$  à 25°C. Cette valeur dépend de la température et augmente avec la température: à 55°C,  $m_{\max} = 104 \text{ g}$  et à 5°C,  $m_{\max} = 7 \text{ g}$ .

L'humidité relative notée HR (ou degré hygrométrique) correspond au rapport entre la masse de vapeur d'eau dans un volume d'air et la masse maximale que le même volume d'air peut contenir. Celle-ci est donc exprimée en pourcentage. Une humidité relative de 0% correspond à un air sec sans vapeur d'eau et une humidité de 100 % correspond à un air dont la masse en vapeur d'eau a atteint la masse maximale et dont l'excès s'est liquéfié.

L'humidité se mesure avec un hygromètre. Il existe plusieurs types d'hygromètres qui fonctionnent selon des principes différents. Citons l'hygromètre à bobine métal-papier, l'hygromètre à cheveux, l'hygromètre à condensation ou encore l'hygromètre à capteur électronique dont la valeur d'un composant électronique (résistance ou condensateur) dépend de l'humidité.

### 2. HUMIDITÉ ET SOLUTION SATURÉE

Nous ne disposons pas au laboratoire de dispositif permettant de contrôler l'humidité. Il existe bien dans l'industrie des chambres climatiques permettant de mener des expériences à humidité contrôlée mais ce sont des dispositifs coûteux et encombrants. Nous avons trouvé une astuce permettant de résoudre le problème : **une solution ionique saturée en solide permet de contrôler l'humidité** . En effet, il s'avère que l'humidité de l'air au-dessus d'une solution ionique saturée est fixée par la nature de la solution. Les tableaux de la **Figure 7**, trouvés sur Internet, donnent quelques valeurs d'humidités relatives pour diverses solutions ioniques et à différentes températures. Pour une étude systématique de l'humidité des solutions, se référer à la **[référence 2]**.

HUMIDITE RELATIVE (%)											
T(°C)	Solution de Fluorure de Césium CsF	Solution de Bromure de Lithium LiBr	Solution de Chlorure de Lithium LiCl	Solution d'Acétate de Potassium CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	Solution de Chlorure de Magnésium MgCl	Solution de Carbonate de Potassium K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Solution de Bromure de Sodium NaBr	Solution d'Iodure de Potassium IK	Solution de Chlorure de Sodium NaCl	Solution de Chlorure de Potassium KCl	Solution de Sulfate de Potassium K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
5		7.4 ± 0.8	13 (3)		33.6 ± 0.3	43.1 ± 0.5	63.5 ± 0.7	73.3 ± 0.3	75.7 ± 0.3	87.7 ± 0.5	98.5 ± 0.9
10		7.1 ± 0.7	13 (4)	23.4 ± 0.5	33.5 ± 0.2	43.1 ± 0.4	62.2 ± 0.6	72.1 ± 0.3	75.7 ± 0.2	86.8 ± 0.4	98.2 ± 0.8
15	4.3(1) ± 1.4(2)	6.9 ± 0.6	12 (5)	23.4 ± 0.3	33.3 ± 0.2	43.2 ± 0.3	60.7 ± 0.5	71.0 ± 0.3	75.6 ± 0.2	85.9 ± 0.3	97.9 ± 0.6
20	3.8 ± 1.1	6.6 ± 0.6	12 (6)	23.1 ± 0.3	33.1 ± 0.2	43.2 ± 0.3	59.1 ± 0.4	69.9 ± 0.3	75.5 ± 0.1	85.1 ± 0.3	97.6 ± 0.5
25	3.4 ± 0.9	6.4 ± 0.5	11.3 ± 0.3	22.5 ± 0.3	32.8 ± 0.3	43.2 ± 0.4	57.6 ± 0.4	68.9 ± 0.2	75.3 ± 0.1	84.3 ± 0.3	97.3 ± 0.5
30	3.0 ± 0.8	6.2 ± 0.5	11.3 ± 0.2	21.6 ± 0.5	32.4 ± 0.1	43.2 ± 0.5	56.0 ± 0.4	67.9 ± 0.2	75.1 ± 0.1	83.6 ± 0.3	97.0 ± 0.4
35	2.7 ± 0.6	6.0 ± 0.4	11.3 ± 0.2		32.1 ± 0.1		54.6 ± 0.4	67.0 ± 0.2	74.9 ± 0.1	83.0 ± 0.3	96.7 ± 0.4
40	2.4 ± 0.5	5.8 ± 0.4	11.2 ± 0.2		31.6 ± 0.1		53.2 ± 0.4	66.1 ± 0.2	74.7 ± 0.1	82.3 ± 0.3	96.4 ± 0.5

Solution saline saturée	Humidité relative en % pour température en degré Celsius										
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	
Hydroxyde de potassium KOH (voir note 3)	14	13	10	9	8	7	6	6	6	-	
Chlorure de lithium	14	14	13	12	12	13	12	11	11	10	
Acétate de potassium	-	21	21	22	22	22	21	20	-	-	
Chlorure de magnésium MgCl	35	34	34	33	33	33	32	32	31	30	
Carbonate de potassium	-	34	34	33	33	33	32	32	31	30	
Nitrate de magnésium	58	57	56	55	53	52	50	48	46	43	
Bicarbonate de sodium	59	58	56	55	54	52	51	50	47	-	
Nitrate d'ammonium (voir note 1)	-	73	69	65	62	59	55	53	47	42	
Nitrate de sodium (voir note 2)	-	-	-	36	35	33	32	32	32	30	
Chlorure de sodium NaCl	76	76	76	76	75	75	75	75	76	76	
Sulfate d'ammonium	82	82	81	81	80	80	80	80	79	79	
Chlorure de potassium KCl	88	88	87	86	85	85	84	82	81	80	
Nitrate de potassium KNO <sub>3</sub>	96	95	94	93	92	91	89	88	85	82	
Sulfate de potassium K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96	

**Figure 7** : Humidité relative de l'air au contact de diverses solutions salines saturées.

Pour mener l'expérience suivante, nous avons investi dans un hygromètre numérique du commerce et une enceinte étanche. Les solutions ioniques présentes au laboratoire permettent d'avoir une première échelle d'humidité mais des solutions sont en commande pour augmenter le nombre de valeurs de l'échelle.

### 3. ÉTUDE DE LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE

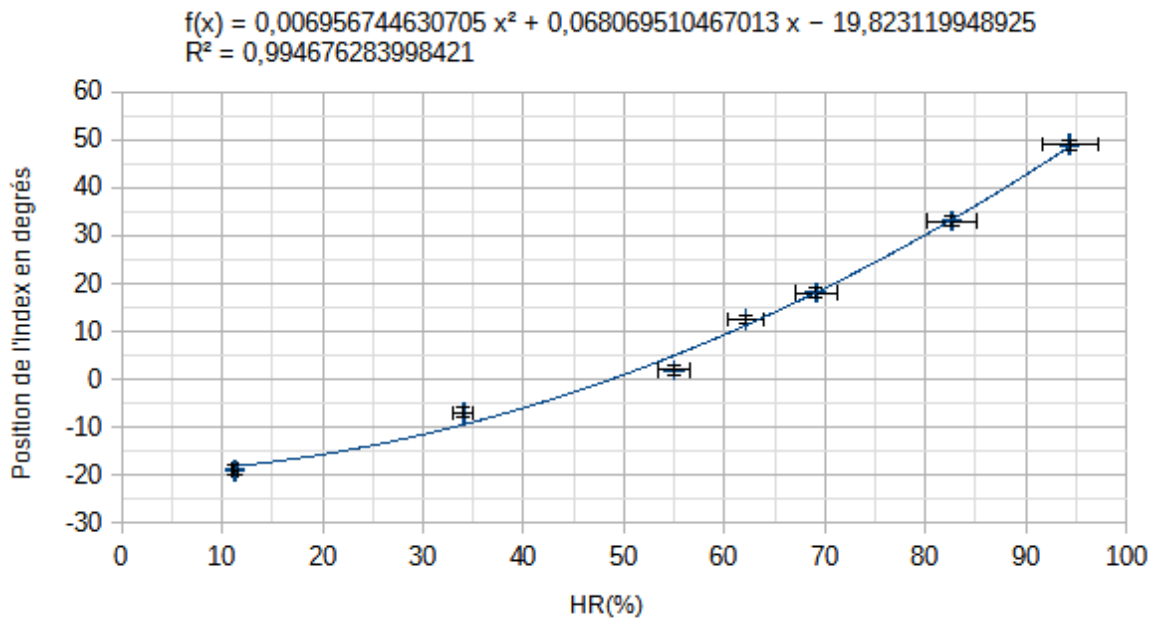
Pour étudier l'influence de l'humidité relative sur la déformation de l'écaille nous avons réalisé l'expérience suivante (**Figure 8**) : l'écaille est placée sur un support muni d'un rapporteur et de façon à ce que son point d'accroche coïncide avec le centre du rapporteur. L'extrémité de l'écaille est munie d'un index permettant la lecture de l'angle. Le support de l'écaille est placé dans une enceinte hermétique contenant une solution ionique saturée ainsi qu'un hygromètre. Pour chaque solution saturée, on note l'humidité relative ainsi que l'angle de l'index. La mesure nécessite d'attendre que l'écaille ait atteint sa position finale tout en vérifiant avec l'hygromètre la valeur de l'humidité relative.



**Figure 8:** Photo de l'expérience permettant d'étudier l'influence de l'humidité relative sur la déformation de l'écaille.

Les résultats obtenus sont représentés sur la **Figure 9**. Nous avons tracé la courbe représentant la position angulaire de l'index ( $\theta$  en degrés) en fonction de l'humidité relative (HR). Les barres d'erreurs verticales correspondent à l'incertitude sur la mesure de l'angle soit  $\pm 1^\circ$ . Les barres d'erreurs horizontales correspondent à l'incertitude sur la valeur donnée par l'hygromètre, soit 3 % de la valeur lue comme indiqué dans la notice de l'appareil.

La déformation de l'échelle est bien progressive avec l'humidité relative et la position de l'index permet une mesure de cette dernière.



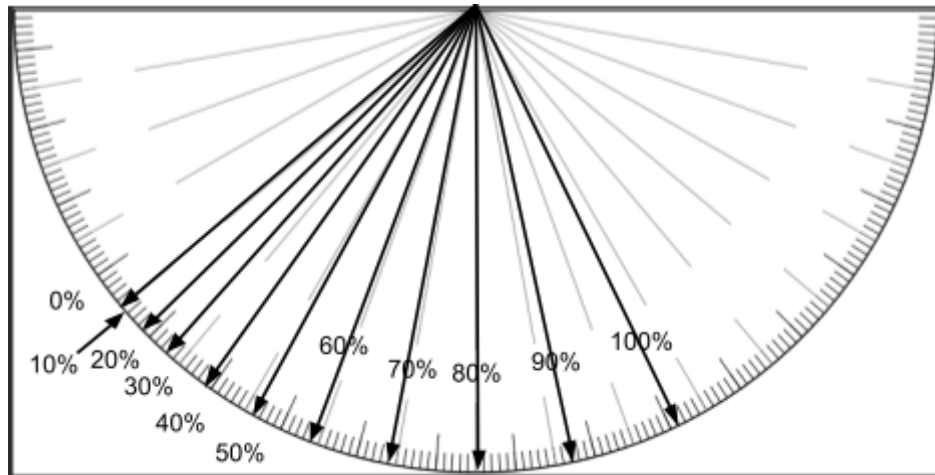
**Figure 9** : Position de l'index (en degrés) en fonction de l'humidité relative. Courbe expérimentale et sa modélisation.

Le capteur d'humidité ainsi réalisé est non linéaire. Les points expérimentaux sont ajustés par un polynôme du second degré (la justification du modèle utilisé est proposée en **annexe** en lien avec les résultats de la **partie III**) :

$$\theta = 0,006957x^2 + 0,06807x - 19,82$$

Cette équation nous permet d'étalonner l'échelle pour la mesure de l'humidité relative. Pour faciliter la lecture du capteur, nous tournons le rapporteur afin de faire coïncider 0° avec 0% d'HR. Nous obtenons donc le tableau de conversion ci-dessous et le rapporteur de la **Figure 10**.

HR (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Index (°)	0	1	4	8	14	21	29	39	50	62	76



**Figure 10** : Rapporteur donnant l'humidité selon la position de l'index de l'écaille.

La réponse du capteur étant non linéaire, la sensibilité du capteur augmente avec l'humidité relative. A ce stade du projet, plusieurs questions restent en suspens :

- Comment caractériser la précision du capteur? Comment l'améliorer?
- Quel est le temps de réponse du capteur?
- Quelle est l'influence de la température sur la déformation de l'écaille (à humidité constante)? Des tests réalisés avec la solution de NaCl à différentes températures devraient permettre de répondre à cette question. En effet, d'après les tableaux de la **Figure 7** l'humidité relative d'une telle solution est indépendante de la température.
- La déformation de l'écaille est-elle toujours reproductible après un certain nombre de cycles de déformations?

#### 4. UN HYGROMÈTRE "LOW COST"

A l'issue de cette étude nous sommes en mesure de concevoir un hygromètre "low cost" fonctionnant sans source d'électricité. Comme le montre la **Figure 11**, nous avons imprimé en 3D un boîtier pour protéger l'écaille et sur lequel nous avons fixé un rapporteur pour lire l'humidité relative. L'erreur de parallaxe lors de la lecture a été minimisée en rapprochant l'index du plan de lecture et l'utilisation d'un index de grande taille permet d'augmenter la précision de la lecture. L'écaille est collée sur un axe. L'hygromètre a été étalonné pour une température voisine de 20 degrés Celsius.

Chaque nouvel hygromètre fabriqué avec une nouvelle écaille nécessite une procédure d'étalonnage selon celle décrite au paragraphe précédent. Celle-ci est certes longue mais elle en fait un objet unique ! Argument commercial relevé par l'un d'entre nous.



**Figure 11** : Prototype d'hygromètre "low cost"

Encouragés par ces premiers résultats, nous ne nous sommes pas arrêtés là et nous avons cherché à comprendre les mécanismes physiques à l'origine du mouvement de l'écaille. C'est l'objet du paragraphe suivant.

### III. ÉTUDE PHYSIQUE DE LA DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE

La déformation de l'écaille est liée à un effet bilame étudié par E. REYSSAT [référence 4]. Avant d'étudier cet effet nous ferons quelques rappels utiles sur un autre effet bilame bien connu : le bilame thermique.

#### 1. L'EFFET BILAME THERMIQUE

Un métal soumis à une augmentation de température s'allonge : c'est le phénomène de dilatation thermique. L'allongement relatif  $(L - L_0)/L_0$  est proportionnel à la variation de température  $T - T_0$  ( $L_0$  étant la longueur de la bande de métal à la température  $T_0$ ) :

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \alpha(T - T_0)$$

où  $\alpha$  en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  est le coefficient de dilatation thermique [référence 3]. A titre d'exemple :

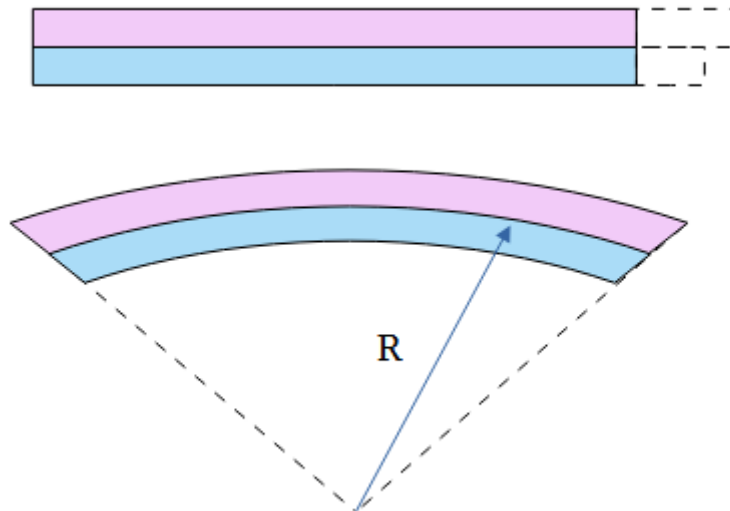
$$\alpha(\text{acier}) = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}; \alpha(\text{aluminium}) = 22 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Soudons maintenant entre eux deux métaux de coefficients de dilatation thermique différents : on crée un bilame comme le montre la **Figure 12**. Soumis à une augmentation de température, la structure se courbe; c'est l'effet bilame étudié théoriquement par S.Timoshenko en 1925 [référence 5] qui a mis en évidence que la courbure définie comme l'inverse du rayon de courbure  $R$  est proportionnelle à la variation de température :

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = k(T - T_0) = \frac{1}{h} f(h_1/h_2, E_1/E_2)(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)$$

où  $k$  (en  $\text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) est un coefficient qui dépend de la géométrie des matériaux et de leurs propriétés élastiques :  $h = h_1 + h_2$  est l'épaisseur totale de l'assemblage,  $h_1$  et  $h_2$  sont les épaisseurs respectives des deux métaux,  $E_1$  et  $E_2$  leurs modules de Young respectifs.  $R_0$  est le rayon de courbure à la température  $T_0$ .

Cet effet bilame est bien connu et son fonctionnement est intégré à notre quotidien. Il est utilisé comme interrupteur thermique dans les bouilloires électriques par exemple. Dans ce cas, le bilame se déforme brusquement à une température précise (on parle de cloquage) ce qui a pour effet d'ouvrir le circuit électrique.

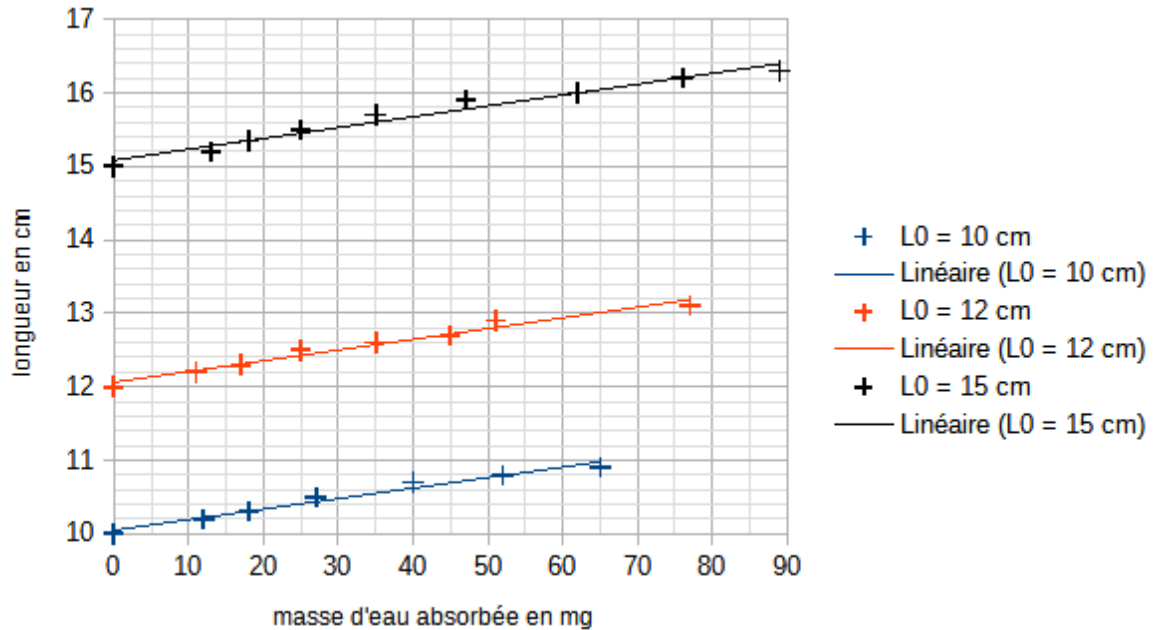


**Figure 12** : Un bilame thermique soumis à une augmentation de température. Le matériau du dessus est plus dilatable que celui du-dessous. La deuxième figure met en évidence le rayon de courbure.

## 2. UN BILAME HYDRIQUE

L'humidité est responsable de la dilatation de certains matériaux comme les fibres naturelles (bois, papier, et même cheveux) qui s'allongent quand elles absorbent de l'eau. L'effet est particulièrement visible dans le cas d'une bande de papier calque déposée à la surface de l'eau. Le papier absorbe l'eau et subit une dilatation hydrique. L'allongement est anisotrope : selon la direction dans laquelle la bande de papier a été découpée dans la feuille, l'allongement est plus ou moins important.

Nous avons étudié ce phénomène en mesurant l'allongement de bandelettes de papier calque (densité  $70 \text{ g/m}^2$ ) de différentes longueurs  $L_0$ , de même largeur  $l = 1,5 \text{ cm}$  en fonction de la masse d'eau absorbée. La bandelette sèche est pesée avec une balance au mg puis immergée quelques minutes avant d'être mise à sécher. La longueur  $L$  est mesurée ainsi que la masse  $m$  de la bandelette à intervalles de temps réguliers. Nous obtenons les résultats de la **Figure 13**.



**Figure 13 :** Longueur des bandelettes de papier calque en fonction de la masse d'eau absorbée.

Nous pouvons observer que la masse maximale d'eau absorbée est proportionnelle à la longueur  $L_0$  de la bandelette et que le coefficient de dilatation hydrique est le même pour toutes les bandelettes, soit :

$$\frac{\Delta L}{\Delta m} = 0,014 \text{ cm} \cdot \text{mg}^{-1}$$

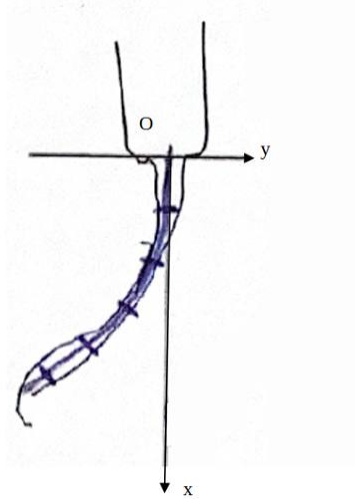
En collant entre eux maintenant deux matériaux de coefficients de dilatation hydrique différents, deux bandes de papier calque découpées dans le sens de la largeur et de la longueur d'une feuille par exemple, nous devrions être en mesure de réaliser un bilame hydrique.

C'est cet effet qui est responsable de la déformation de l'écaille. Comment caractériser, plus précisément que dans l'expérience préliminaire, la déformation de l'écaille? C'est ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.

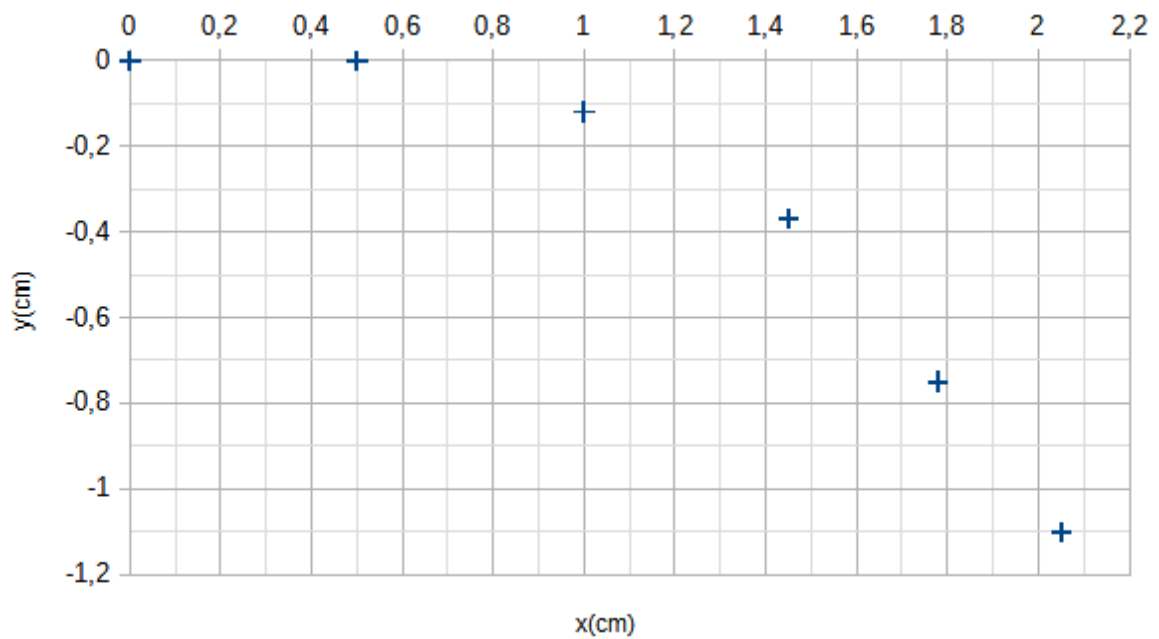
### 3. ETUDE DE LA COURBURE DE L'ÉCAILLE EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE

Afin de caractériser la déformation de l'écaille avec l'humidité relative, nous faisons évoluer le protocole de mesure. L'écaille est placée pendant une durée minimale de 24h dans une enceinte hermétique dont l'humidité relative est contrôlée. L'écaille est ensuite sortie de l'enceinte et son contour est reporté au crayon sur papier. L'opération est reproduite huit fois avec huit enceintes d'humidités relatives différentes. Nous obtenons les empreintes de la **Figure 14**.

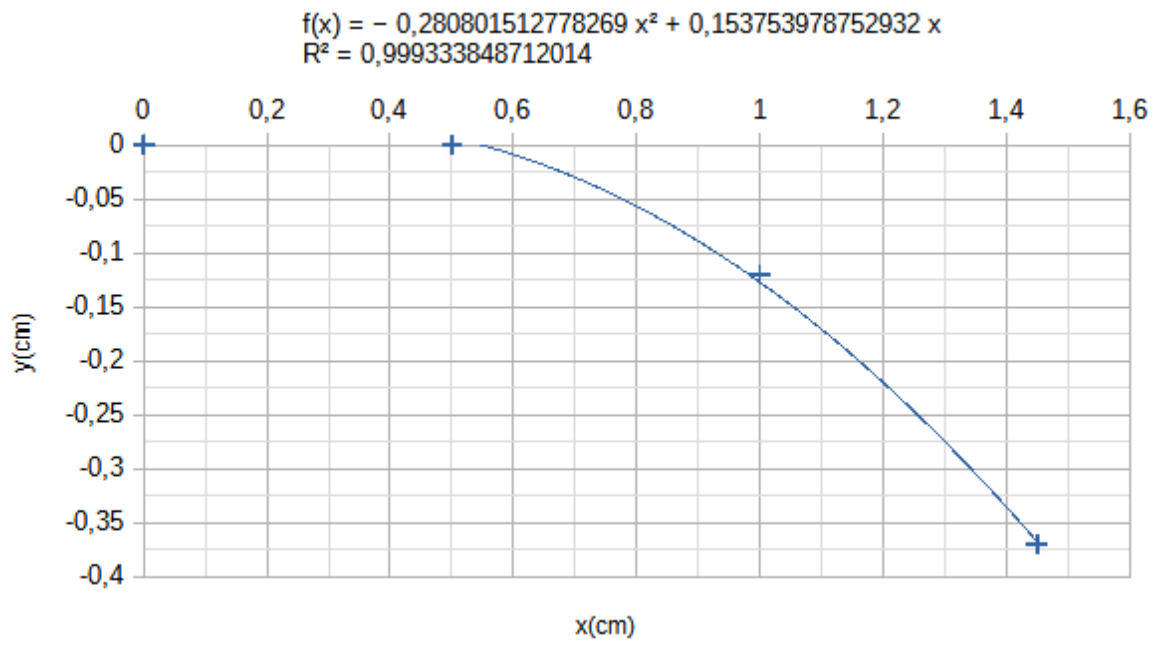
Pour chaque empreinte la ligne médiane de l'écaille est tracée et nous repérons les coordonnées  $(x,y)$  de quelques points régulièrement espacés le long de cette ligne, dans un repère  $(O,x,y)$  où l'origine  $O$  est placée au niveau de la fixation de l'écaille comme le montre la **Figure 15**. Nous pouvons donc accéder à la courbe  $y = f(x)$  de la ligne médiane de l'écaille **Figure 16.a**.



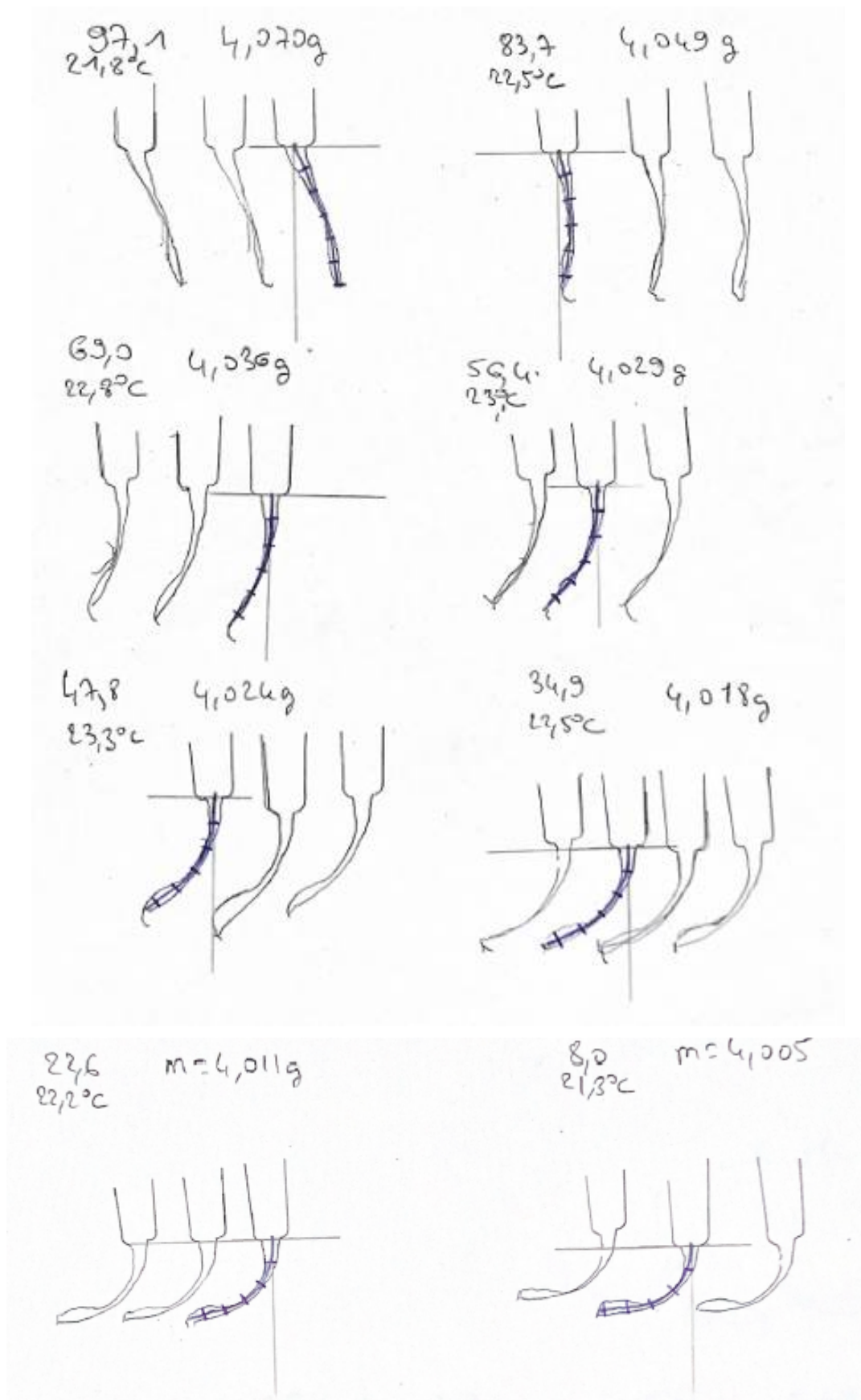
**Figure 15** : repérage des coordonnées des points le long de la ligne médiane de déformation (les points le long de la ligne médiane sont espacés de 5 mm).  
L'empreinte correspond à une humidité relative de 47,8%.



**Figure 16.a** : courbe  $y = f(x)$  de la ligne médiane de l'écaille.



**Figure 16.b** : courbe  $y = f(x)$  pour les quatre premiers points et son ajustement par un polynôme de degré 2.



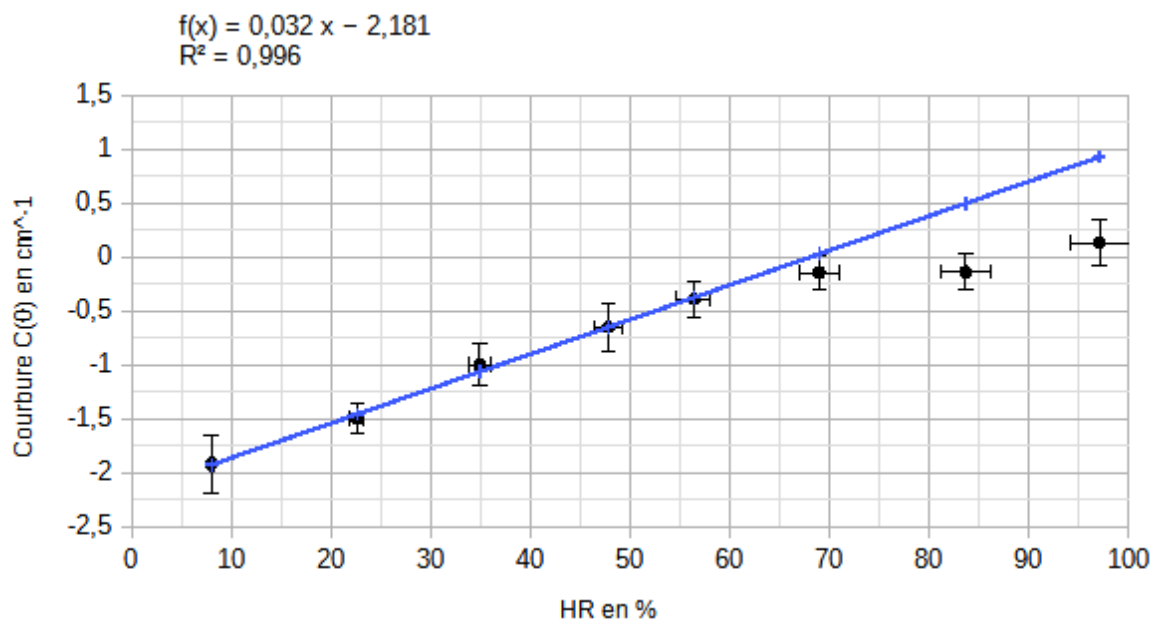
**Figure 14** : contours de l'écaille pour différentes humidités relatives allant de 97,1% à 8%. La masse de l'écaille et de son support (pince crocodile) est également indiquée.

Pour accéder à la courbure de l'écaille en  $x = 0$  soit  $C(0) = \frac{1}{R(0)}$  où  $R$  est le rayon de courbure, nous modélisons la courbe  $y = f(x)$  au voisinage de  $x = 0$  par un polynôme de degré 2 (**Figure 16.b.**):  $y = ax^2 + bx$ . Le rayon de courbure est ensuite calculé par la formule:

$$R(x) = \frac{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}}{y''}$$

où :  $y'(x) = 2ax + b$  et  $y''(x) = 2a$

Nous pouvons donc tracer l'évolution de la courbure  $C(0)$  en fonction de l'humidité relative sur la **Figure 18**. Les barres d'erreurs verticales ont été calculées en prenant une incertitude de 0,25 mm sur le repérage des coordonnées (x,y). Les barres d'erreurs horizontales sont liées à l'appareil et correspondent à 3% de la valeur lue.



**Figure 18** : évolution de la courbure  $C(0)$  en  $x = 0$  en fonction de l'humidité relative

Pour des humidités relatives inférieures à 60%, les résultats expérimentaux semblent en accord avec la formule de Timoshenko :

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = k \times HR = \frac{1}{h} \times f \times (\beta_1 - \beta_2) \times HR$$

Attendu que  $f \sim 1,3$  et  $\beta_1 - \beta_2 \sim 10^{-3}$  [**Référence 4**], le coefficient directeur issu de l'ajustement des points expérimentaux soit  $k = 0,032 \text{ cm}^{-1}$  permet de calculer l'épaisseur  $h$  de l'écaille :  $h \sim 0,04 \text{ cm} = 0,4 \text{ mm}$  valeur inférieure à celle attendue, comme le montre une vue en coupe de l'écaille (**Figure 19.a**). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cet écart. La précision du protocole : une autre exploitation des empreintes de la même écaille conduit à un coefficient directeur  $k = 0,014 \text{ cm}^{-1}$  soit  $h \sim 0,1 \text{ cm} = 1 \text{ mm}$  valeur toujours inférieure à celle que l'on peut mesurer à partir de la **Figure 19.a**. Une zone sensible à l'humidité dont l'épaisseur est inférieure à l'épaisseur réelle de l'écaille. En effet, comme le montre la **Figure 19.b**, la structure de l'écaille est complexe.

Le modèle de Timoshenko, valable pour de faibles déformations, n'est peut-être pas adapté pour décrire les déformations importantes de l'écaille. On note en effet un écart au modèle incompatible avec les barres d'erreurs pour des humidités supérieures à 60%. Notons cependant que dans ce cas les points expérimentaux correspondent à des courbures proches de 0, donc des rayons de courbure très grands donc plus difficiles à mesurer expérimentalement.



**Figure 19.a.** : vue en coupe de l'écaille qui montre une structure en bicouche.



**Figure 19.b** : structure de l'écaille, la partie hygrosensible ayant été retirée

## **CONCLUSION**

L'observation de l'effet pomme de pin nous a d'abord conduit à réaliser un hygromètre "low cost" basé sur la déformation d'une écaille de pomme de pin. Cet hygromètre original qui ne nécessite aucune source d'énergie électrique en fait un produit innovant. La compréhension des mécanismes physiques mis en jeu dans la déformation de l'écaille et la découverte de l'effet bilame, nous a ensuite conduit à imaginer des dispositifs bio inspirés qui pourraient trouver des applications pratiques comme la réalisation d'interrupteurs commandés par l'humidité dans des installations qui nécessitent de travailler à humidité contrôlée (serre,...). L'effet pomme de pin a d'ailleurs inspiré l'architecte Achim Menges qui a développé le projet "HygroSkin" (2012) : un habitat dont les ouvertures miment le fonctionnement de la pomme de pin et permettent de réguler l'humidité sans apport d'énergie électrique. A quand des applications dans le domaine du textile?

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions E. Reyssat pour son soutien tout au long du projet, pour sa visite au lycée au cours de laquelle nous avons pu échanger sur nos expériences, pour les conseils qu'il a pu nous prodiguer et pour sa présence au concours national des Olympiades de Physique pour nous encourager.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Courty, J-M., Kierlik E. (2025) Mesurer l'humidité, au cheveu près. *Pour La Science* (Février 2025) **568**

[2] Greenspan, L. (1977) Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards- A. Physics and Chemistry* (January- February 1977), **Vol. 81 A, No.1**

[3] Chareyron, D., Horsin-Molinaro, H. (2020). *Physique et Ingénierie des objets: le bilame*.  
<https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/bilame.xml>

[4] Reyssat, E., Mahadevan, L (2009) Hygromorphs : from pine cones to biomimetic bilayers. *J. R. Soc. Interface* (2009) **6**, 951-957.

[5] Timoshenko, S. 1925 Analysis of bi-metal thermostats. *J. Opt. Soc. Am* **11** 233-235.

## ANNEXE : ETUDE THÉORIQUE DE L'ANGLE DE DÉFORMATION DE L'ÉCAILLE

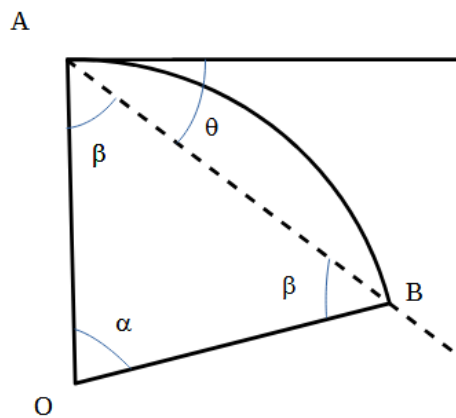
Nous cherchons à établir la relation entre l'angle  $\theta$  de déformation de l'écaille et l'humidité relative.

Assimilons l'écaille à une portion d'arc de cercle AB de longueur L dont le rayon  $R = OA = OB$  est donné par la formule de Timoshenko :

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = kx$$

où l'humidité relative a été notée x et  $R_0$  correspond au rayon de courbure à humidité nulle.

L'angle  $\theta$  utilisé pour la lecture de l'humidité relative est indiqué sur le schéma.



Nous avons d'une part :  $L = R\alpha$

Avec :  $\alpha = \pi - 2\beta = \pi - 2(\frac{\pi}{2} - \theta) = 2\theta$

Nous en déduisons :  $\theta = \frac{L}{2R}$

Par ailleurs, l'allongement relatif est proportionnel à l'humidité relative :

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \mu x$$

où nous avons noté  $L_0$  la longueur de l'écaille pour une humidité relative nulle.

Nous avons donc finalement :

$$\theta = \frac{1}{2}L_0(1 + \mu x)\left(\frac{1}{R_0} + kx\right) = \frac{L_0}{2R_0} + \frac{L_0}{2}\left(k + \frac{\mu}{R_0}\right)x + \frac{1}{2}\mu kL_0x^2$$

polynôme de degré 2 en x en accord avec la courbe de la **Figure 9 page 11**