

UNE SOLUTION EN BÉTON

ROELENS Carla, SOFIA Ugo et STRIMBU-LEE Arthur

Mars 2025



nos professeurs encadrants :

M. Fisher-Côte, M. Barbier et M. Boudoyen

L'ÉQUIPE

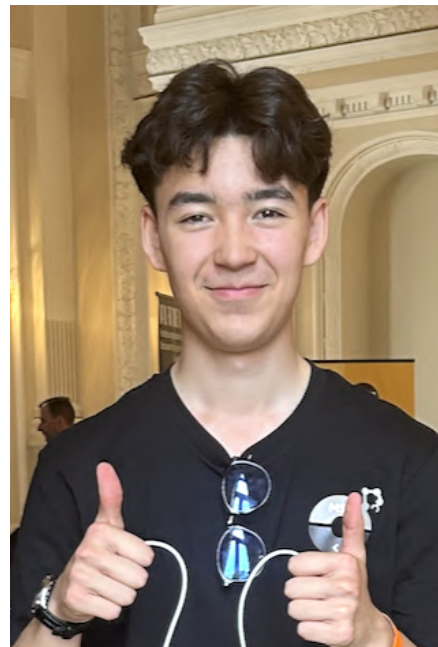
Tenaces. Voilà comment nous nous décrivons. Persévérance. Voilà par quoi nous définissons notre état d'esprit. Nous sommes issus d'un groupe d'Olympiades de Physique composé de six élèves. Depuis notre défaite à la finale interacadémique à Nancy en décembre 2024, nous améliorons notre sujet et en développons un nouvel aspect. La passion et le goût de la démarche scientifique nous ont poussé à ne pas nous arrêter et à nous présenter au concours CGénial. Voici donc qui nous sommes.



(a) ROELENS Carla (vidéo et contact avec l'Université)



(b) SOFIA Ugo (recherche et calculs)



(c) STRIMBU-LEE Arthur (rédaction et codage)

"J'adore le processus de recherche et travailler sur les bétons permet de voir une application concrète de notre travail. "
- ROELENS Carla

"Passionné de sciences, j'adore en apprendre d'avantage. Ce projet m'a vraiment permis d'étendre mes horizons et de découvrir de nouveaux domaines. " - SOFIA Ugo

"J'ai toujours aimé les maths et le codage. Le code Python était intéressant à programmer et j'ai découvert LaTeX, que j'adore ! " - STRIMBU-LEE Arthur

Remerciements

Nous souhaitons remercier nos professeurs de physique et de mathématiques M. Fischer-Côte, M. Boudoyen et M. Barbier qui nous ont accompagné tout au long de notre processus de recherche. Nous remercions également le professeur Jan Lagerwall et le doctorant Yosuke Pestana Nakamura de l'université de Luxembourg pour avoir pris le temps de nous conseiller et de répondre à nos questions ainsi que nos parents pour leur encouragement et leur soutien indefectible tout au long du projet.

1 Introduction

Le béton armé est un composé matériel très largement utilisé dans beaucoup de types d'infrastructures tels que les ponts ou les écoles. Son utilisation s'est très largement répandue au XX^{ème} siècle notamment pour sa force et sa durabilité. Nous pouvons citer les travaux remarquables de Le Corbusier qui a été l'architecte de deux monuments classés au patrimoine mondial de l'UNESCO : La Cité Radieuse de Marseille (Figure 1.a) et la Villa Savoye à Poissy (Figure 1.b).



(a) La Cité Radieuse à Marseille



(b) La Villa Savoye à Poissy

Figure 1: Constructions en béton armé de Le Corbusier

Cependant, après une visite de la Cité Radieuse de Marseille, nous avons remarqué des fissures plus ou moins grandes à plusieurs endroits de sa structure, dont ses pilonnes (Figure 2). Après quelques recherches, nous avons compris que le phénomène de carbonatation au sein du béton armé avait lieu. Cette dégradation progressive du béton armé représente un danger pour l'infrastructure. Après cette visite, nous avons immédiatement établis un lien entre ce problème et notre sujet d'Olympiades.



Figure 2: Fissure observée sur un pillone de la Cité Radieuse de Marseille

Nous sommes des élèves de Vauban, Lycée Français de Luxembourg (Figure 3) et notre école a également été construite en béton armé. Sa construction date de 2020 et ne présente pas encore de fissures comme celles de la Cité Radieuse de Marseille qui date de 1952.



Figure 3: Vauban, Lycée Français de Luxembourg

Problématiques : Comment préserver une infrastructure en béton armée et ralentir voire arrêter sa dégradation ? Comment l'application d'une peinture peut-elle prévenir les cracks d'une structure en béton ? En quoi brancher un bâtiment entier à un générateur peut-il le sauver ?

Nous allons répondre à ces questions dans ce mémoire et notre équipe va donc vous présenter (en toute humilité) comment sauver Vauban !

2 Évaluation de la dégradation du béton armé

2.1 Qu'est-ce que le béton armé ?

2.1.1 Formation du béton armé

Le béton armé est un assemblage de béton structuré par des barres d'acier (Figure 4). Ces deux composants du béton armé ont leur intérêt et leurs avantages.

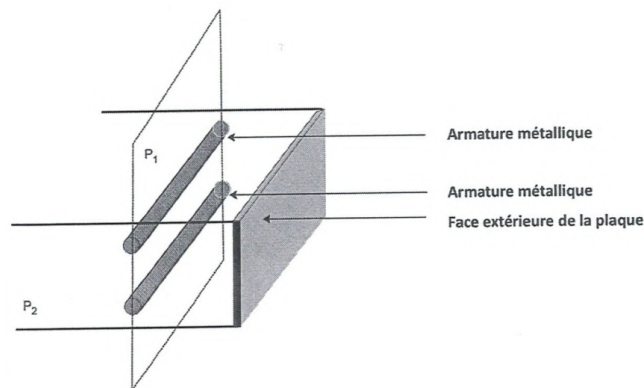
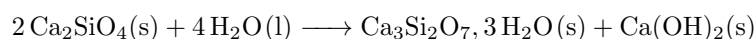


Figure 4: Schéma d'un béton armé

Le béton est composé de ciment, de granulats¹ et d'eau. Le ciment étant un liant hydraulique, il durcit au contact de l'eau dans un processus s'appelant l'hydratation. Il est assimilé à du silicate dicalcique de formule chimique Ca_2SiO_4 .

Nous pouvons donc exprimer la formation du béton par la réaction chimique suivante :



L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) produit est une base forte. Il rend le béton basique par le biais de l'eau et son pH est compris entre 12 et 14.

¹composé de sable ou gravier

2.1.2 Propriétés physiques du béton armé

Le béton supporte très bien la force de compression et mal la force de traction, et par la même occasion de flexion. C'est un problème puisqu'une infrastructure doit également pouvoir résister à la traction et à la flexion. L'acier, lui, supporte très bien les forces de traction et de flexion. Son ajout dans le béton pour faire du béton armé est donc justifié.

2.2 Création de notre béton armé

Nous avons réalisé plusieurs tests de création de béton armé dont vous trouverez le protocole de fabrication en annexe A. Cependant, nous devons d'abord trouver les quantités de mortier et d'eau à utiliser pour créer le béton plus solide. Nous avons donc créé huit bétons différents en utilisant pour chaque échantillon 60 grammes de mortier et entre 0 et 35mL d'eau à intervalle de 5mL d'un échantillon au suivant (Figure 5).

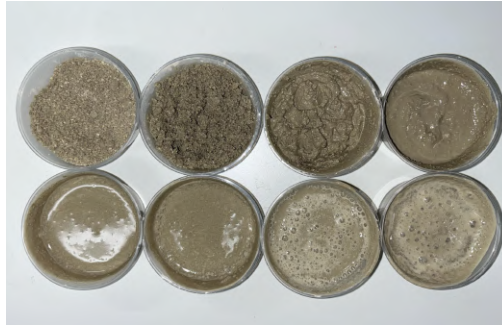


Figure 5: Nos huit échantillons de béton

Après les avoir laisser sécher nos préparations 24h, nous avons remarqué que les bétons de quantité d'eau 0, 5 et 10mL étaient trop poudreux et n'avaient même pas réellement solidifié tandis que les échantillons de 30 et 35mL étaient très fragiles et se désagrégeaient au moindre toucher. Parmi les bétons de quantité d'eau 15, 20 et 25mL, le béton à 15mL d'eau était le plus solide et compacte, moins pateux que les autres. Nous en avons déduit qu'il faut une concentration massique de mortier dans l'eau de :

$$\begin{aligned} Cm &= \frac{m}{V} \\ \Leftrightarrow Cm &= \frac{60\text{ g}}{15 \times 10^{-3} \text{ mL}} \\ \Leftrightarrow Cm &= 4 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

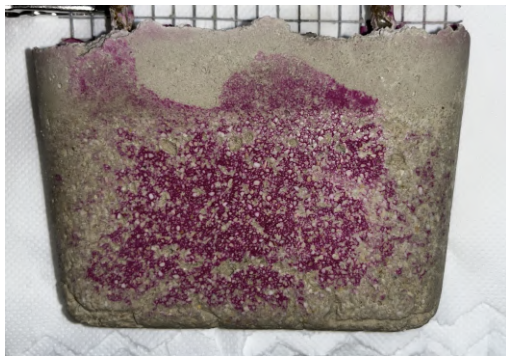
Nous avons appris que les bétons utilisés dans les bâtiments sont classés en différentes catégories. La norme NF EN 206/CN catégorise les bétons en trois groupes selon leur masse volumique :

- Béton léger : ρ entre 800 et 2000 kg/m³
- Béton normal : ρ entre 2000 et 2600 kg/m³
- Béton lourd : $\rho > 2600$ kg/m³

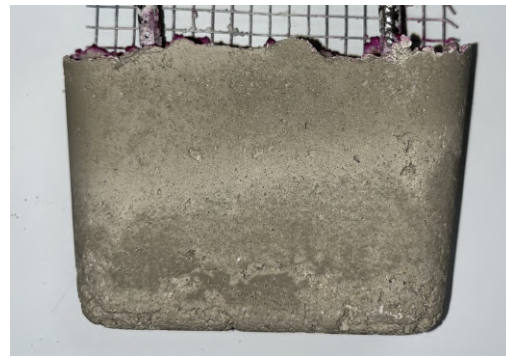
Notre béton est composé de 60g de mortier et de 15mL d'eau qui font 75g, donc $75 \times 10^{-3} \text{ kg}$. Le volume de notre béton est de 35mL soit $35 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Donc la masse volumique de notre béton est égale à :

$$\begin{aligned} \rho_{\text{béton}} &= \frac{75}{35} \\ \rho_{\text{béton}} &= 2140 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Notre béton peut donc être catégorisé parmi les bétons normaux. Tous les bétons que nous avons créés par la suite, armés ou non, ont été créés en utilisant la concentration massique de mortier optimale démontrée. Pour évaluer sa basicité, nous avons utilisé de la phénolphthaléine (Figure 6). Il s'agit d'un indicateur acido-basique incolore lorsque le pH du milieu étudié est inférieur à 9 et rose lorsqu'il est égal ou supérieur à 9.



(a) Béton armé basique

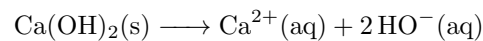


(b) Béton armé acidifié

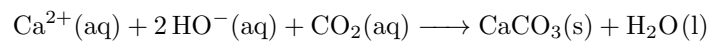
Figure 6: Tests à la phénolphthaléine : à gauche le béton armé basique, à droite le béton armé acidifié

2.3 La carbonatation

Au fil du temps, tout béton subit un phénomène de vieillissement. Il s'agit de la carbonatation. En effet, le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère se diffuse dans le béton à travers ses pores et s'y dissout grâce à l'eau présente. Pendant la carbonatation, le dioxyde de carbone va dissoudre l'hydroxyde de calcium que nous pourrions écrire :



La réaction de carbonatation fait donc réagir l'hydroxyde de calcium avec le dioxyde de carbone pour former du carbonate de calcium et de l'eau. Les autres espèces chimiques constituant le béton sont spectatrices. C'est pourquoi elles ne sont pas représentées dans l'équation chimique suivante :



Comme dit précédemment, l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) présent dans le béton est responsable du caractère basique de celui-ci. Nous l'avons mis en évidence avec la forme dissoute de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui présentait des ions hydroxydes (OH^{-}), responsables de la basicité d'une solution. Nous remarquons qu'après la réaction de carbonatation, les ions hydroxydes ont disparus. Lorsque l'hydroxyde de calcium a entièrement été consommé, le béton s'acidifie.

Lorsque le béton s'acidifie, la couche qui protège les aciers n'est plus stable. En se détruisant, cette couche permet à l'humidité de corroder l'armature en acier (Figure 7). Quand l'armature est fortement corrodée, les produits de la corrosion peuvent gonfler, dégrader le béton et provoquer des fissurations ou des ruptures (Figure 2 - Cité Radieuse de Marseille).



Figure 7: Exemple des conséquences de la corrosion due à la carbonatation (rouille)

2.4 Étude de la rigidité de deux bétons

Avant de proposer des solutions pour sauver les constructions en béton armé, nous devons nous assurer qu'un béton acidifié, autrement dit "vieilli", est moins résistant aux forces qui lui sont appliquées qu'un béton basique, dit "jeune".

Nous n'avons pas incliné d'armature en acier dans notre expérience puisque nous cherchions seulement à évaluer la solidité d'un béton acide et d'un béton basique. Pour évaluer leur solidité, nous avons calculé leur module d'Young. Nous avons

donc créé deux bétons de même concentration (voir partie 2.2) et les avons soumis à des forces de compression. Le principe est de placer le béton qu'on teste entre les mors de la presse. Puis nous tournons la manivelle de la presse en mesurant le nombre de tours en degrés. Mais avant nous avons mesuré la hauteur de nos bétons identiques à l'aide d'un pied à coulisse (Figure 8). Nous avons mesuré 15,7mm.



Figure 8: Mesure de la hauteur des deux bétons

La Figure 9 illustre notre montage.



(a) Vue de la déformation du béton



(b) Vu de l'angle de rotation de la manivelle de la presse

Figure 9: Montage de notre expérience pour calculer le module d'Young

Dans notre cas, le module d'élasticité aussi appelé module d'Young est une grandeur qui exprime la rigidité du béton en fonction de la contrainte exercée sur lui. Le module d'Young s'exprime par :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

avec E le module d'Young en Pa, σ la contrainte en Pa et ε sans unité et exprimable par $\frac{d}{l_0}$

La contrainte peut être exprimée par $\frac{F}{A}$ qui sont respectivement la force appliquée sur la surface de contact $A = 8 \times 10^{-3} m^2$. Notre montage nous permet de calculer la force F grâce à la formule suivante :

$$F = \frac{C\theta}{d}$$

avec C le couple de force qui est une constante dans notre calcul, θ l'angle de rotation de la manivelle en degrés et d la différence de hauteur du béton $l_0 - l$ après la compression

Pour récapituler, notre montage nous fournit toutes les informations nécessaires pour calculer ce module : C le couple de force qui est une constante que nous ne remplaceront par 1 puisque nous ne l'avons pas calculé (cela n'affectera pas les résultats du calcul), θ l'angle de rotation de la manivelle de la presse en degrés, l_0 la hauteur initiale de notre béton en m, l la hauteur finale du béton en m et d la différence entre la hauteur initiale du béton et la hauteur après la compression m. Finalement, la formule que nous allons utiliser pour calculer le module d'Young du béton acide et du béton basique est :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\Leftrightarrow E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{d}{l_0}}$$

$$\Leftrightarrow E = \frac{\frac{C \times \theta}{d}}{\frac{d}{l_0}}$$

$$\Leftrightarrow E = \frac{C \times \theta \times l_0}{A \times d}$$

$$\Leftrightarrow E = \frac{C \times \theta \times l_0}{A \times d^2}$$

Enfin, nous avons réalisé les expériences sur un béton basique, dit "jeune" et un béton acide, dit "vieux". Les résultats sont montrés sur la Figure 10. Le béton acide a été acidifié dans de l'acide chloridrique de concentration molaire $C = 1\text{mol/L}$. Nous avons tourné la manivelle de 90° pour les deux tests. Ensuite, nous avons mesuré la différence d des deux bétons :

- $d_{\text{basique}} = 15.7 - 13 = 2.7 \text{ mm}$
- $d_{\text{acide}} = 15.7 - 12.7 = 3 \text{ mm}$

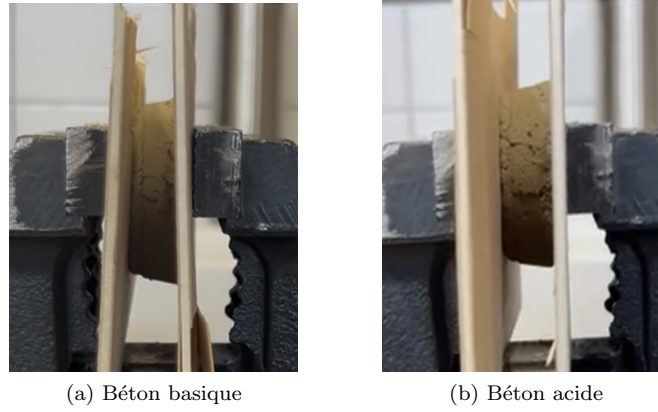


Figure 10: Résultats de l'expérience du module d'Young

Nous avons ensuite calculé le module d'Young des deux bétons dont voilà les résultats :

$$E_{\text{basique}} = \frac{C \times \theta \times l_{0\text{basique}}}{A \times d_{\text{basique}}^2} \quad \text{et} \quad E_{\text{acide}} = \frac{C \times \theta \times l_{0\text{acide}}}{A \times d_{\text{acide}}^2}$$

$$E_{\text{basique}} = \frac{90 \times 15.7}{8 \times 10^{-3} \times 2.7^2} \quad \text{et} \quad E_{\text{acide}} = \frac{90 \times 15.7}{8 \times 10^{-3} \times 3^2}$$

$$E_{\text{basique}} \approx \mathbf{24 \text{ MPa}} \quad \text{et} \quad E_{\text{acide}} \approx \mathbf{19 \text{ MPa}}$$

D'où $24 \text{ MPa} > 19 \text{ MPa}$, et nous pouvons conclure sur la confirmation de notre hypothèse avancée au début de cette partie : les bétons acides sont moins résistants que les bétons basiques. Nous pouvons noter que notre béton correspond à un BPE¹ et presque à un BFC². Mais maintenant, intéressons nous aux solutions que nous proposons.

¹Béton Prêt à l'Emploi (entre 16MPa et 60 MPa)

²Bétonnage Fabriqué sur Chantier (entre 25MPa et 35 MPa)

3 Prévention : les cristaux liquides

3.1 Introduction aux cristaux liquides

La matière peut être catégorisée en trois états selon l'arrangement de ses molécules : solide, liquide et gazeux. Cet arrangement dépend des conditions auxquelles sont soumises la matière, comme la température et la pression. Les cristaux liquides représentent un état unique de la matière. En effet, depuis les travaux du physicien allemand Otto Lehmann sur l'ester de cholestérol fondu, nous savons que l'état d'un cristal liquide se trouve à mi-chemin entre celui d'un solide cristallin (Figure 11.a) et celui d'un liquide isotrope¹ (Figure 11.b). On parle d'état mésophase. D'après ses observations, le liquide apparaissait biréfringent² comme un cristal.

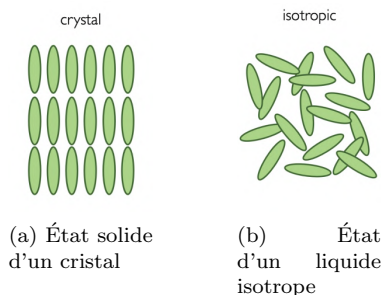


Figure 11: Les états extrêmes d'un cristal

À l'intérieur même de cet état mésophase, les cristaux liquides se distinguent en deux catégories : les nématiques et les smectiques. Les molécules à l'intérieur d'un cristal liquide nématique sont libres de leur mouvement à la manière d'un liquide et s'orientent tous en moyenne vers un même axe \mathbf{n} (Figure 12). Cette orientation est un "ordre à longue distance".

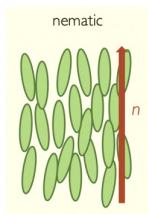


Figure 12: Cristal liquide nématique

Pour les cristaux liquides smectiques, les molécules sont organisées en couches où elles sont toutes orientées dans le même sens, soit tout droit soit en diagonale (Figure 13).

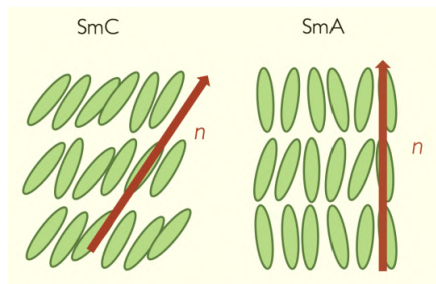


Figure 13: Cristal liquide smectique - à gauche un smectique C et à droite un smectique A

Cette organisation moléculaire rend les cristaux liquides nématiques plus fluides que les smectiques. Dans ce mémoire, nous allons nous concentrer sur une sous-catégorie des cristaux liquides nématiques : les nématiques chiraux autrement appelés cholestériques.

Les cristaux liquides cholestériques sont des cristaux liquides nématiques où a été introduits un additif chiral³. Cet additif

¹milieu dans lequel les propriétés sont identiques quelle que soit la direction d'observation

²corps qui possède deux indices de réfraction

³un système est dit chiral (dérivé du grec : kheir signifiant main) s'il ne peut pas être superposé à son symétrique dans aucune combinaison quelconque de rotations et de translations

confère au cristal liquide une structure hélicoïdale. En effet, les molécules sont structurées en couches¹. La structure des molécules de cristaux liquides reste nématique et elles sont toujours dirigées vers leur directeur \mathbf{n} . La chiralité implique une rotation perpendiculaire de ce directeur par rapport au pas de l'hélice \mathbf{p} (Figure 14). Le pas de l'hélice \mathbf{p} est défini sur l'axe \mathbf{m} par la rotation complète du directeur \mathbf{n} .

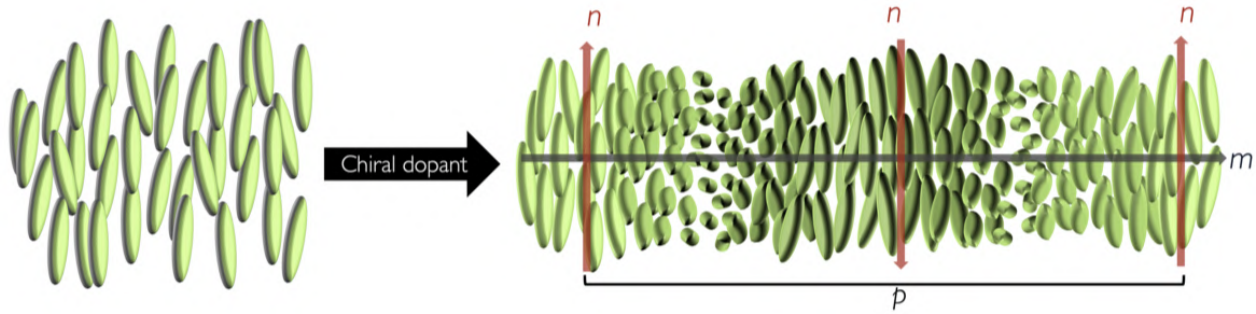


Figure 14: Schéma expliquant la chiralité à l'échelle moléculaire du cristal liquide cholestérique

3.2 Mécanisme de changement de couleur d'après une déformation mécanique

Dans un cristal liquide cholestérique, la couleur que nous voyons est le résultat d'une réflexion sélective de la lumière par les couches de sa structure hélicoïdale (Figure 15). Nous pouvons expliquer le chemin de la lumière en fonction du pas de l'hélice \mathbf{d} et de l'angle d'incidence θ du rayon comme sur la Figure 11.

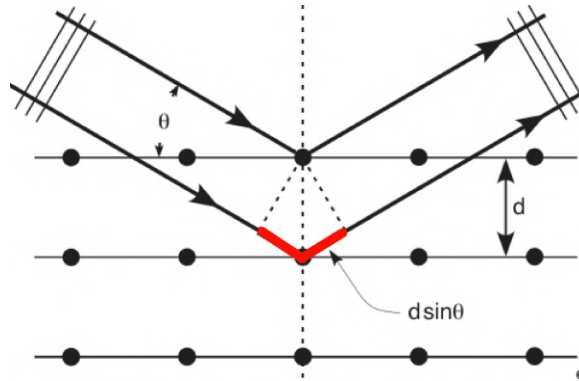


Figure 15: Schéma du phénomène de diffraction dans un cristal

Les deux ondes réfléchies par les deux couches du cristal se superposant, elles doivent former une interférence constructive (Figure 16) pour que la longueur d'onde émise soit visible.

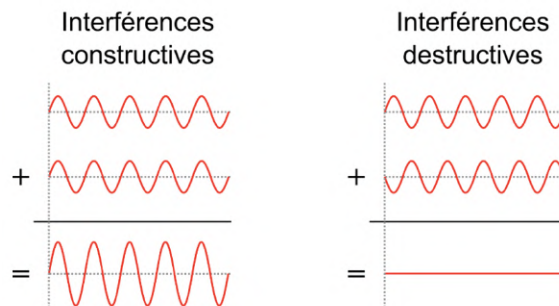


Figure 16: Schéma des phénomènes d'interférences constructives et destructives

¹elles prennent d'ailleurs la propriété des cristaux liquides smectiques qui sont plus visqueux

Pour que les interférences soient constructives, la différence de marche (surlignée en rouge dans la Figure 15) doit être un multiple de longueur d'onde. Nous pouvons exprimer la différence de marche par la loi de Bragg :

$$k\lambda = 2nd \sin \theta$$

avec k un entier naturel correspondant à l'ordre d'interférence dans le plan cristallin et n l'indice de réfraction du cristal.

Sachant cela, nous proposons une l'expérience de l'application d'une couche de cristal liquide sur un support déformable. Le cristal liquide étant incompressible, si le support est étiré, le pas de l'hélice va diminuer. La Figure 17 montre le phénomène d'élongation du support et ce que cela entrainerait au niveau de la structure hélicoïdale.

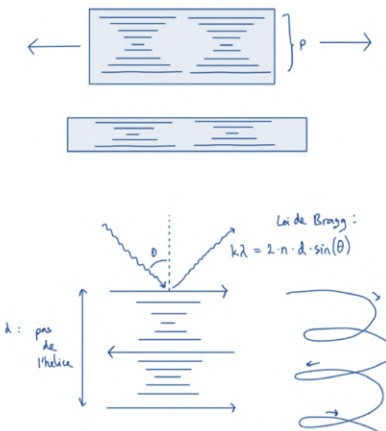
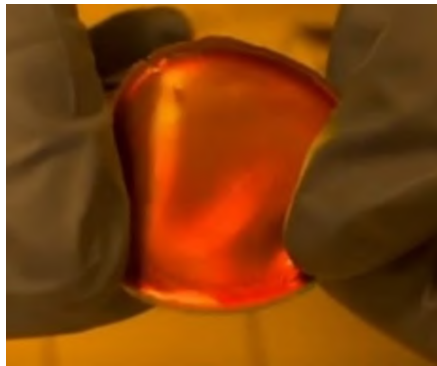
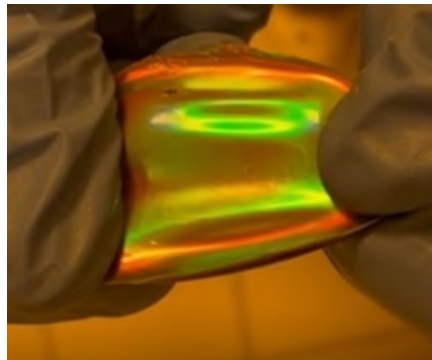


Figure 17: Schéma de l'élongation du support et de ses conséquences au niveau moléculaire

En pratique, cela devrait donner un résultat comme sur la Figure 18. Nous allons maintenant vous montrer ce que nous avons fait.



(a) Tension modérée : couleur observée rouge ($\sim 700\text{nm}$)



(b) Tension plus forte : couleur observée vert ($\sim 550\text{nm}$)

Figure 18: Déformation d'un support à cristaux liquides

3.3 Principes de notre analyse quantitative

3.3.1 La démarche

Nous cherchons dans notre étude à déterminer le pas de l'hélice de notre cristal liquide en fonction de la couleur que nous observons. Pour cela, nous avons fait varier la couleur de notre cristal liquide de deux manières différentes (voir partie **3.4**) et avons pris des photos de nos observations. Par "notre" cristal liquide, nous faisons référence à la peinture à cristaux liquides cholestériques achetée auprès de l'entreprise SFXC (Figure 19).



Figure 19: Peinture à cristaux liquides cholestériques de SFCX

Une fois les photos prises, nous devons les exploiter pour trouver le pas de notre hélice. Il s'agit de la partie compliquée de cette analyse.

3.3.2 D'une image au pas de l'hélice

Pour passer d'une image au pas de l'hélice, nous devons passer par beaucoup d'étapes. Pour une explication plus claire, nous allons aller à reculons, du pas de l'hélice à l'image.

Supposons que nous devons analyser une couleur, que l'on appelle A.

Pour déterminer le pas de l'hélice, nous avons besoin de la longueur d'onde associée à la couleur A. Il peut être exprimé par la loi de Bragg que nous avons réarrangée :

$$d = \frac{k\lambda}{2n \sin \theta}$$

Pour trouver la longueur d'onde de la couleur A, nous allons utiliser le diagramme de chromacité défini par la CIE en 1931 (Figure 20).

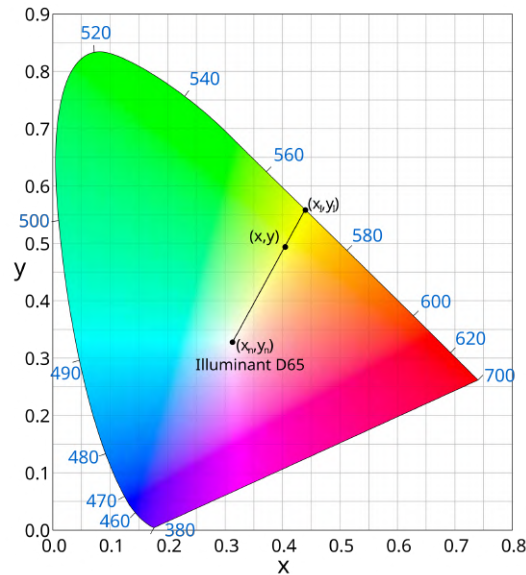


Figure 20: Diagramme de chromacité CIE 1931

La courbe du diagramme exprime les longueurs d'onde du visible sur un plan (x, y). Nous avons donc besoin des coordonnées de la longueur d'onde recherchée.

Cependant, les coordonnées (x, y) du diagramme de chromacité ne sont qu'une représentation bidimensionnelle d'un espace XYZ, défini par la CIE. Les coordonnées (x, y) sont exprimées par :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Nous avons donc besoin des valeurs XYZ de la couleur A. Jusqu'à maintenant, la photo de notre couleur A ne pouvait être définie qu'avec son code informatique RVB. Heureusement, il existe un lien direct entre le code RVB et les valeurs XYZ. Nous devons calculer un produit matriciel. Le code RVB peut être exprimé sous forme d'une matrice 3x1 tout comme les valeurs de l'espace associé XYZ. Leur relation s'exprime par :

$$M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Avec M la matrice CIE RVB définie par la CIE :

$$M = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.2 \\ 0.17697 & 0.8134 & 0.01063 \\ 0 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix}$$

C'est donc comme cela que nous pouvons passer du simple code RVB de la photo au pas de l'hélice de la couleur A.

Toutefois, un problème subsiste. Les couleurs des cristaux liquides sont monochromatiques tandis que ceux d'une photo sont polychromatiques¹. Nous pouvons nous retrouver dans des cas où les coordonnées du plan ne se trouvent pas sur la courbe extérieure du diagramme. Elles sont soit dans le diagramme, soit en dehors et ne correspondent à aucune longueur d'onde théorique². Pour pallier ce problème nous avons implémenter l'algorithme de NSS³ qui cherche le point de la courbe le plus proche des coordonnées de la couleur A. De cette manière, nous avons une approximation à 10nm près de la longueur d'onde de la couleur A.

En résumé, nous avons créé un code qui utilise des images de cristaux liquides pour déterminer le pas de leur hélice en suivant la méthode présentées. Notre code Python est retrouvable en Annexe B.

3.4 Nos expériences

3.4.1 Déformation mécanique

Nous avons premièrement essayé d'appliquer notre cristal liquide sur un support déformable de sorte à ce qu'une fois séché, nous puissions étirer la ceinture et observer un changement de couleur. Notre montage ressemblait à la Figure 21.



Figure 21: Cristaux liquides appliqués sur un support déformable

¹un pixel informatique est défini par un code RVB qui est une superposition de rouge, vert et de bleu. C'est pourquoi on considère la photo polychromatique.

²problème dû à la polychromacité de l'image

³Nearest Neighbour Search

Après avoir étiré notre ceinture à cristaux liquides, nous n'avons pas une seule fois observé un changement de couleur (Figure 22).



(a) Tension faible : aucune couleur observée



(b) Tension forte : aucune couleur observée

Figure 22: Déformation de notre ceinture à cristaux liquide

Puis, nous avons découvert après quelques recherches le principe d' "index matching". L' "index matching" ou l'adaptation d'indice de réfraction est un procédé visant à faire correspondre les indices de réfraction de deux milieux différents pour réduire le phénomène de diffusion de la lumière à leur interface. Notre cristal liquide est un colloïde puisque qu'il s'agit d'une solution aqueuse dans laquelle des particules de cristaux liquides sont en suspension. Ces particules sont assez petites ($<1\mu\text{m}$) pour ne pas être visibles et assez grandes ($>1\text{nm}$) pour diffuser la lumière qu'elles reçoivent. Dans un colloïde à l'échelle moléculaire, les rayons de lumière incidents sont diffusés par ces particules en suspension. Il s'agit de l'effet Tyndall (Figure 23).

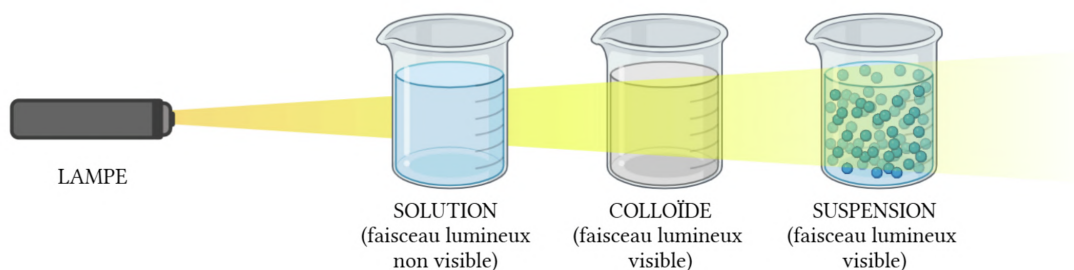


Figure 23: Schéma de l'effet Tyndall

Dans notre cristal liquide colloïdal, la lumière étant diffusée, nous ne pouvons pas observer de changement de couleur. L'index matching prend tout son sens à ce moment là. Pour pouvoir observer la couleur de notre cristal liquide, nous devons trouver un fluide ayant le même indice de réfraction que celui-ci qui est de 1,5. Ce fluide empêche la diffusion de la lumière par les particules en suspension. Dans notre cas, le glycérol correspond au fluide recherché avec un indice de réfraction de 1,47 ce qui est suffisamment proche de 1,5. La Figure 24 schématise ce qu'il se passe au niveau moléculaire avant et après l'ajout de glycérol.

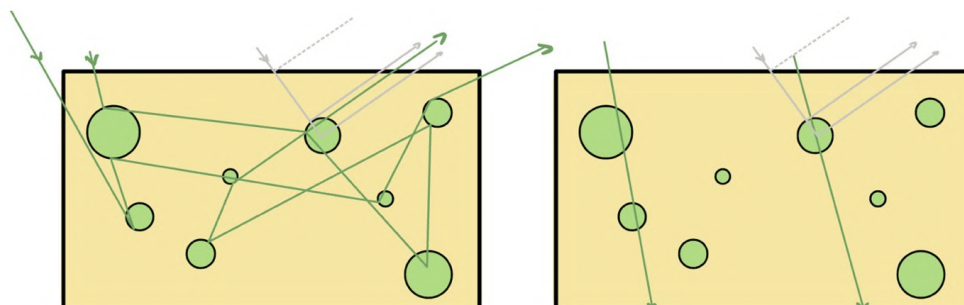


Figure 24: Schéma de l'influence de l'application de glycérol sur notre montage initial (avant-après application)

Après avoir appliqué du glycérol, nous n'avons toujours pas pu observer de changement de couleur en étirant la ceinture (Figure 25).



(a) Tension faible : aucune couleur observée



(b) Tension forte : aucune couleur observée

Figure 25: Déformation de notre ceinture à cristaux liquide où on a ajouté du glycérol

N'ayant pas trouvé d'autres solutions et explications à la constance de la couleur de notre ceinture, nous avons fait appel à notre partenaire : L'Université de Luxembourg avec le Professeur Jan Lagerwall et le doctorant Yosuke Pestana Nakamura. Grâce à leurs explications nous avons compris pourquoi il nous était impossible de créer nous même une ceinture à cristaux liquides. Les molécules de notre cristal liquide appliquées au support ne sont pas polymérisées ce qui rend impossible la visualisation du changement de couleur par déformation mécanique. Ce processus de polymérisation n'est pas effectuable dans notre lycée, c'est pourquoi nous sommes allés créer une ceinture à cristaux liquides (Figure 26) à l'université, au sein de leur laboratoire.

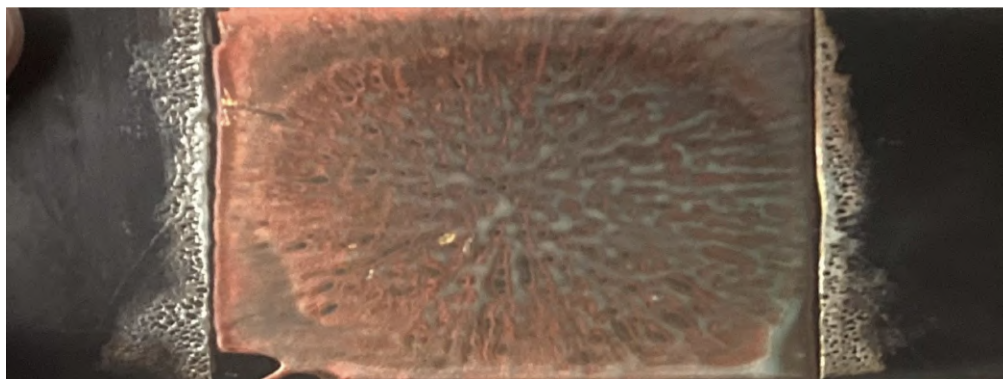


Figure 26: Ceinture à cristaux liquides polymérisés sur un support déformable

Enfin, nous avons mené notre analyse quantitative du changement de couleur de la ceinture à cristaux liquides en fonction de sa déformation mesurée par l'élongation. Il fallait suivre quelques étapes. Pour faire changer la couleur de la ceinture, le pas de l'hélice des cristaux liquides doit varier. Nous avons donc étiré la ceinture pour modifier le pas de l'hélice. La formule de l'élongation (en %) de la ceinture est la suivante :

$$\text{Élongation} = \frac{L - LO}{LO} \times 100$$

avec **L** la longueur de la ceinture (en cm) et **LO** la longueur originale de la ceinture (en cm).

Ensuite, à chaque étape de l'élongation nous avons pris une photo de la ceinture et l'avons entrée dans notre code Python pour qu'il nous donne le pas de l'hélice. Pour ne pas avoir de valeurs imprécises en étirant à la main la ceinture, nous avons créé une petite machine qui le fait plus précisément (Figure 27).

Il suffit donc de placer les deux extrémités de notre ceinture sur les supports dédiés et de mettre en marche le rail qui va tirer la ceinture. Nous pouvons bloquer l'étape qui nous intéresse en plaçant des barres de métal dans la structure. Cela nous permet de prendre des photos précises de notre ceinture sans se soucier qu'elle change de taille si elle est tenue par

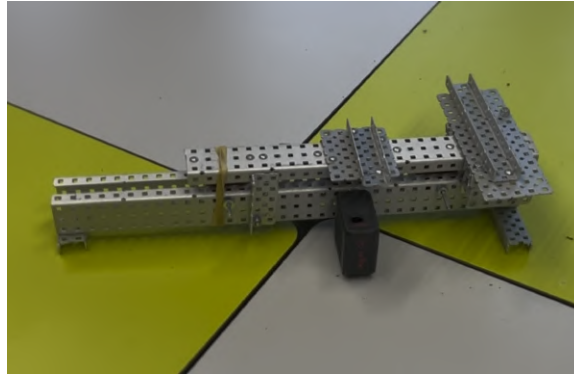
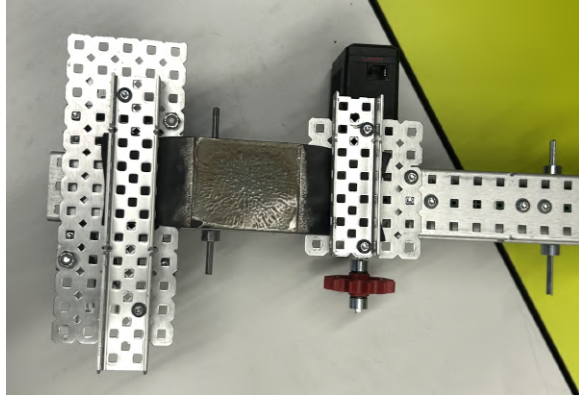
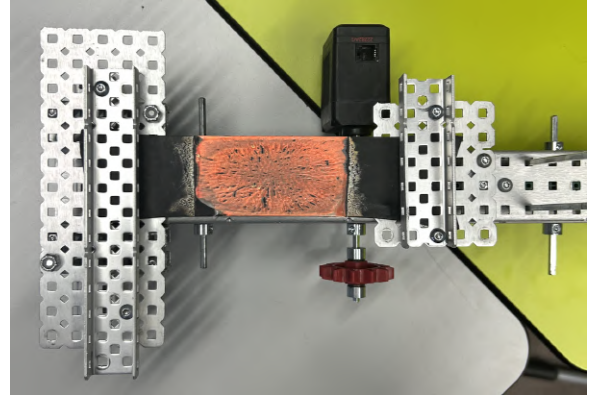


Figure 27: Machine qui étire précisément la ceinture à cristaux liquides



(a) État initial de la machine de la ceinture



(b) État à un certaine mesure de la ceinture

Figure 28: Démonstration de l'efficacité de l'élongation par la petite machine

un humain (Figure 28). Nous prévoyons d'améliorer ce modèle pour qu'il fonctionne automatiquement avec un moteur. Les résultats sont présentés dans la partie **3.5**.

Nos premières expériences sur le support déformable n'auront pas été inutiles...

3.4.2 Variation de la température

La température d'un cristal liquide influence le pas de son hélice. Mais quel est le lien entre les premières expériences ou nous essayions de modifier mécaniquement le pas de l'hélice et la température d'un cristal liquide ? Nous avons réalisé énormément de mouvements de va-et-vient en étirant la ceinture, et très vite. L'énergie mécanique produite par nos mouvements ont été convertis en énergie thermique. C'est pourquoi on peut observer un changement de couleur des extrémités du cristal après un certain temps (Figure 29).



Figure 29: Notre ceinture à cristaux liquides après une trentaine de va-et-vients rapides

Nous avons ensuite remarqué que le petit emballage de notre pot à cristaux liquides précisait que les cristaux liquides changent de couleur entre 30 et 35°C. Dans cette partie, notre étude consiste à confirmer ce qui est écrit sur le produit. Notre protocole est donc légèrement différent. Nous devons appliquer notre cristal liquide sur un support rigide et plus grand, pour mieux visualiser le changement de couleur.

Nous avons premièrement appliqué une couche de cristaux liquides sur une feuille blanche collée à une plaque de verre pour que le montage soit rigide. Bien sûr, pour éviter le problème de la diffusion nous avons ajouté une couche de glycérol. Nous avons ensuite chauffé cette plaque pour que le cristal s'imprègne dans la feuille. Comme le cristal change de couleur entre 30 et 35°C, la chaleur de notre corps est suffisante pour faire changer le faire changer de couleur. Nous avons chauffé notre plaque mais nous n'avons vu que de très faibles couleurs, presque imperceptibles (Figure 30).

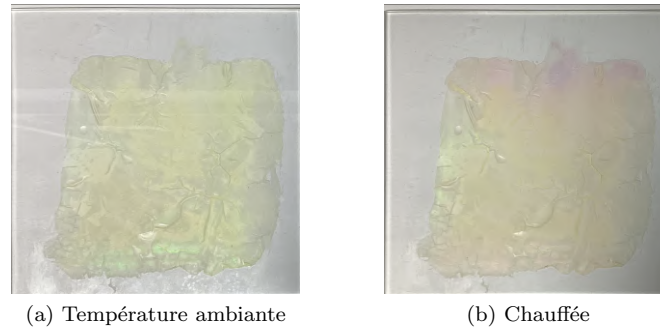


Figure 30: Couleur observée en changeant la chaleur de la plaque

Nous avons ensuite compris que le phénomène de réflexion entrainait en jeu. Notre cristal liquide étant toujours un colloïde, certains rayons passent à travers le cristal et sont réfléchis par la feuille blanche ; feuille blanche qui renvoie toutes les longueurs d'ondes du spectre du visible. Les ondes réfléchies par le cristal et celles réfléchies par la feuille blanche se confondent et rendent très difficile la visualisation de la couleur des cristaux liquides (Figure 31).

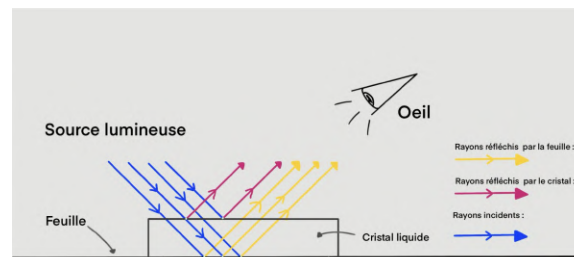


Figure 31: Schéma du phénomène de réflexion dans le premier montage

Nous avons donc réglé le problème de la réflexion en changeant le fond de la plaque pour un fond noir, qui absorbe toutes les longueurs d'ondes. Notre second montage nous a permis d'observer un changement de couleur en fonction de la température (Figure 32).

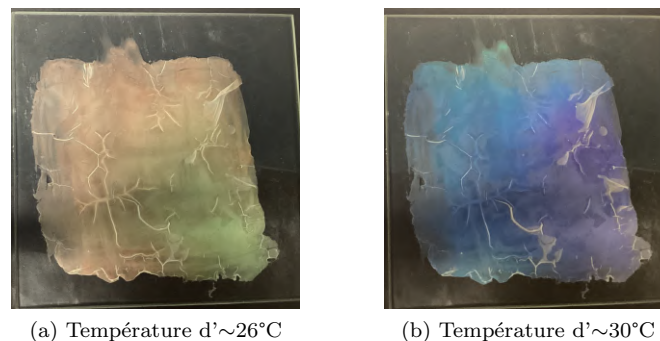


Figure 32: Couleur observée en changeant la chaleur de la plaque

Grâce à notre code Python et les valeurs qu'il nous a renvoyées, nous avons pu créer le graphique suivant qui représente le pas de l'hélice de notre cristal liquide en fonction de sa température (Figure 33).

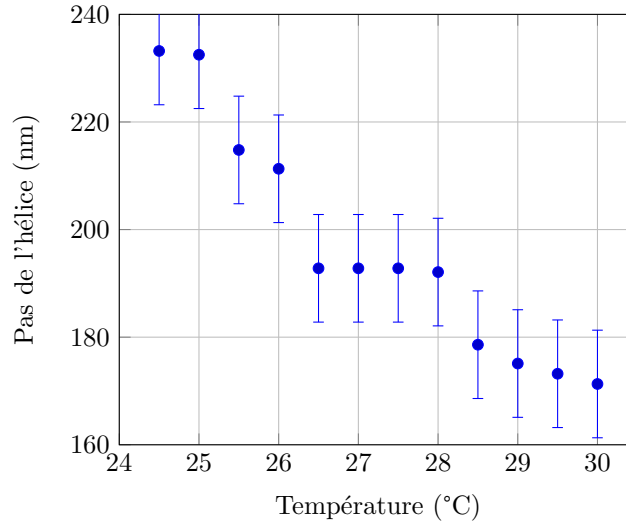


Figure 33: Évolution du pas de l'hélice en fonction de la température avec une incertitude de 10 nm

Finalement, le fabricant n'avait pas tout à fait raison puisque nos expériences ont démontré une variation de couleur entre 24 et 30°C au lieu de 30 à 35°C. Bien que très intéressant à étudier, changer le paramètre de la température sur un cristal liquide ne nous intéresse pas pour trouver une solution à notre problématique.

3.5 Résultats et calculs des incertitudes

Voilà les résultats de notre analyse quantitative par déformation mécanique (Table 1). Finalement, nos valeurs avec notre code étaient tellement incertaines que dans la conception de ce tableau, elles n'étaient pas intéressantes. Nous avons donc utilisé le site 405nm.com.

Élongation (%)	Valeurs RVB	Longueur d'onde (nm)	Pas de l'hélice(nm)
35.0	193, 137, 126	630	210.0
38.3	201, 131, 118	627	209.0
41.7	213, 132, 113	621	207.0
50.0	219, 134, 106	620	206.7
56.7	221, 138, 97	615	205.0
60.0	220, 146, 89	613	204.3
68.3	217, 155, 84	610	203.3
73.3	207, 173, 80	605	201.7
76.7	199, 186, 79	601	200.3
80.0	194, 192, 81	599	199.7
83.3	187, 195, 81	557	185.7
88.3	179, 198, 82	555	185.0
90.0	175, 196, 83	554	184.7
91.7	174, 194, 83	553	184.0

Table 1: Tableau de correspondance entre élongation, valeurs RVB, longueurs d'onde et pas de l'hélice

La Figure 34 représente la couleur émise par les cristaux liquides en fonction de son élongation. On remarque un changement considérable de la couleur entre le rouge et le vers aux alentours de 80%.

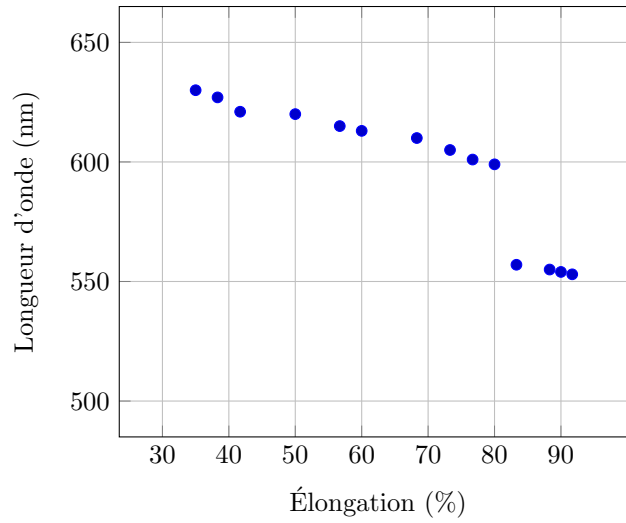


Figure 34: Longueur d'onde en fonction de l'élongation

Ces 80% représentent bien les fissures que peuvent présenter les bétons, supposant que 100% est la brisure complète du béton. Les cristaux liquides sont donc une solution très intéressante lorsqu'on les applique sur une surface en béton pour visualiser et prévenir les fissures. Mieux vaut prévenir que guérir !

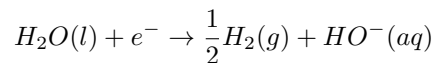
4 Restauration : la protection cathodique

4.1 Fonctionnement de la protection cathodique

La protection cathodique contre la corrosion fonctionne en modifiant les rapports de tension électrique pour inverser les réactions électrochimiques. Lorsque la couche de passivation de l'acier est endommagée, par exemple par des chlorures, le potentiel électrochimique de la zone affectée se déplace vers des tensions plus négatives. Cela crée une différence de potentiel entre les zones passivées et corrodées, permettant à un petit courant de circuler, à condition qu'il y ait un milieu conducteur, dans notre cas le béton. Comme dans une batterie, un petit courant circule entre ces deux zones. Le processus commence à l'anode, où l'oxygène attaque le fer, entraînant la corrosion.

Dans ce système, une anode stable à base de fer est placée sous forme de treillis sur la surface du béton, puis recouverte d'une couche de mortier ou de béton conducteur. À l'aide d'une source de courant continu, une différence de potentiel est créée entre le treillis, qui constitue l'anode, et l'armature, reliée au pôle négatif, qui agit comme la cathode (Figures 35 et 36).

À la cathode, qui est constituée de l'armature en acier dans le béton, une réaction de réduction de l'eau se produit par électrolyse, régénérant des ions hydroxyde selon l'équation suivante :



En conséquence, il n'est pas nécessaire de démolir la couche de béton. Pour assurer une protection uniforme, l'armature doit être suffisamment interconnectée pour former un réseau électrique, ce qui est généralement le cas avec des arrangements standard d'armatures.

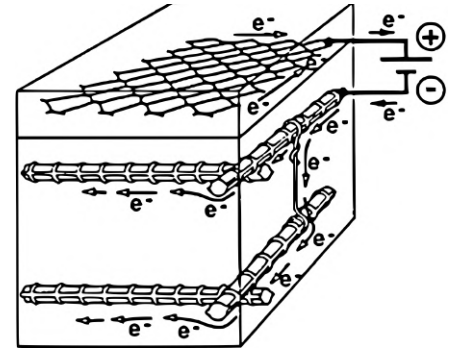


Figure 35: Protection cathodique contre la corrosion

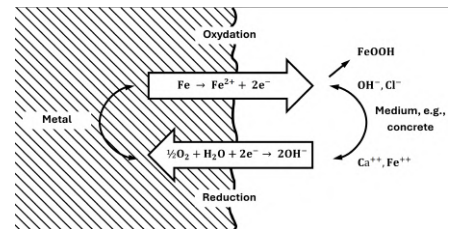


Figure 36: Élément électrochimique avec réactions de réduction à l'anode et à la cathode

4.2 Nos expériences

Dans notre expérience, nous acidifions du béton contenant un métal conducteur afin de le vieillir artificiellement et de simuler les conditions d'un béton nécessitant une régénération. La phénolphthaléine, un indicateur de pH, est utilisée pour surveiller les variations de pH. Sous forme acide, la phénolphthaléine est incolore, mais elle devient rose lorsque la solution devient basique. Après l'acidification du béton, une tentative est faite pour restaurer son état basique par électrolyse. Au début, la phénolphthaléine doit rester incolore, car le mélange est acide. Si l'électrolyse fonctionne comme prévu et que le pH revient à un niveau basique, la phénolphthaléine deviendra rose. L'ensemble du processus est enregistré en vidéo pour observer attentivement le changement de couleur.

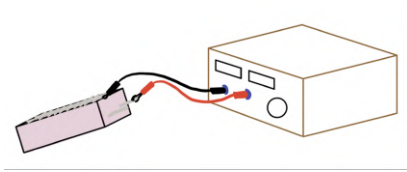


Figure 37: Générateur connecté au béton

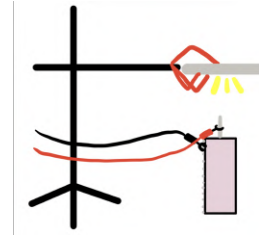


Figure 38: Configuration de la capture vidéo avec un trépied

Protocole

Fabrication:

- Créer une dalle de béton de 3 cm d'épaisseur avec une barre d'acier en forme de U de 6 mm de diamètre (voir annexe pour le protocole)
- Placer un treillis métallique sur le béton recouvert d'agar-agar pour assurer une bonne distribution de l'électricité, le tout enveloppé dans un film plastique.

Vieillissement:

- Acidifier le béton avec une solution d'acide chlorhydrique à 1 mol/L (préparée en mélangeant 200 mL d'acide chlorhydrique concentré avec 600 mL d'eau) pendant 30 minutes.
- Appliquer de la phénolphthaléine là où la barre d'acier sort (c'est ici que le phénomène se produira).

Restauration:

- Connecter le béton à un générateur à l'aide de fils (et de pinces crocodiles) : négatif au cathode et positif à l'anode (le treillis).
- Allumer le générateur avec une intensité de courant de 0.4 Ampère à 15 V et attendre que le mélange devienne à nouveau basique.

Enregistrer une vidéo pour suivre la génération des ions OH^- et leur propagation/diffusion au fil du temps autour de l'armature, permettant ainsi de calculer la vitesse de régénération en cm/min.

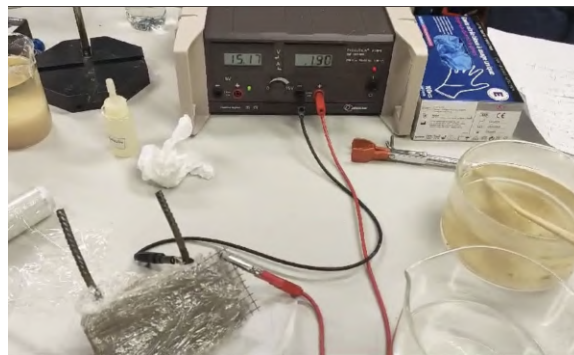


Figure 39: Configuration expérimentale pour la restauration électrochimique du béton

4.3 Résultats

Plus les valeurs RGB sont élevées, plus la couleur apparaît brillante. Cela peut être observé lors du processus de vieillissement du béton, qui prend environ 10 minutes pour acidifier la surface à un pH inférieur à 7, comme montré dans la

Figure 40. Après 30 minutes, l'indicateur de phénolphthaleïne devient complètement transparent, signalant que la surface a été suffisamment acidifiée. Il serait pertinent d'ouvrir davantage le béton pour examiner si l'intérieur a également subi une acidification, car cela pourrait fournir des informations plus détaillées sur l'état du matériau.

Dans le processus de restauration électrochimique, le temps nécessaire pour que la réaction d'électrolyse se déplace de la barre d'armature au treillis est illustré dans la Figure 41. Il faut environ 7 minutes pour que la réaction restaure une couche de béton de 0,9 cm entre la barre d'armature et le treillis. Prolonger le temps d'électrolyse serait probablement bénéfique pour une régénération supplémentaire du béton, car une période de réaction plus longue garantirait un processus de restauration plus complet, menant à une durabilité améliorée.

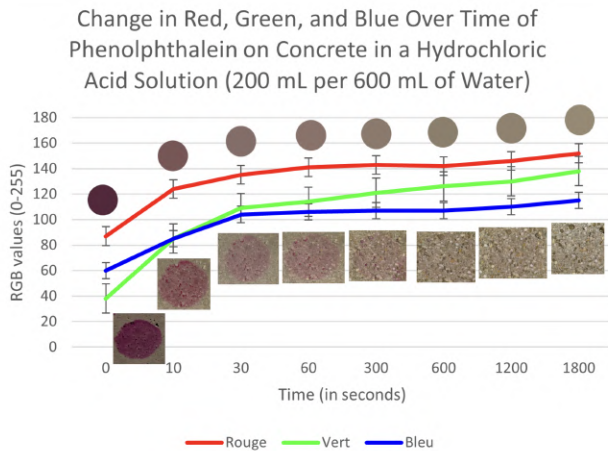


Figure 40: Vieillissement

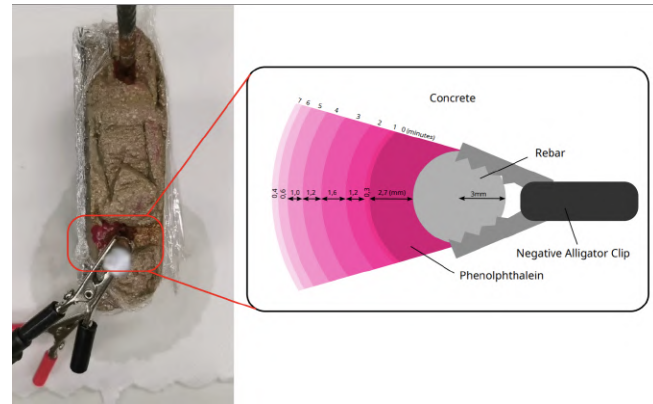


Figure 41: Suivi vidéo de la réalcalinisation du béton au fil du temps : configuration expérimentale (gauche) et résultats d'analyse montrant l'expansion de la zone réalcalinisée le long de l'axe inter-électrodes (droite).

Le graphique (Figure 42) montre l'évolution de la vitesse de régénération au fil du temps, qui semble suivre de près une courbe exponentielle, indiquant un bon ajustement. Cela suggère que les processus de diffusion sont le principal facteur limitant pour la vitesse de régénération. De plus, plus la zone est éloignée de l'électrode, plus il faut de temps pour que la régénération se produise, mettant en évidence la nécessité de patience lorsqu'on cherche à restaurer des zones plus éloignées de la source.

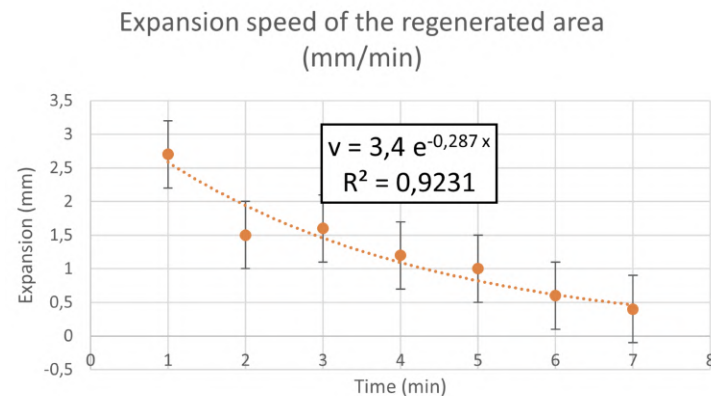


Figure 42: Évolution de la vitesse de régénération en cm en fonction de la distance par rapport à l'électrode.

5 Mise en place de ces solutions

5.1 Application d'une couche de cristaux liquides

Il n'y a pas grand chose à dire, il faut uniquement appliquer sur tout Vauban une couche de peinture à cristaux liquides. Bien sur, la diversité de ceux-ci nous permet de ne pas forcément avoir recours à des cristaux très voyants comme le vert. Il existe des cristaux liquides dont le changement de couleur s'effectue dans le domaine des ultraviolets, beaucoup plus esthétique et tout aussi efficace.

5.2 Protection cathodique

Quantités principales des travaux de structure : Volume de béton : 37 000 m³, Quantités d'armature : 5 330 tonnes, Coffrage des murs : 63 000 m², Coffrage des dalles : 59 000 m², Surface totale à traiter : $S = 122,000 \text{ m}^2$.

Le processus d'électrolyse nécessiterait une quantité massive de charge électrique pour traiter toute la structure en béton de l'école. Cependant, il est important de noter que les électrons sont produits à l'électrode, puis doivent migrer à travers le béton, ce qui est un processus difficile limitant l'efficacité de la technique. Dans le cas de murs épais, comme dans le projet Vauban, cela signifie que les ions doivent parcourir de longues distances, compliquant encore davantage le processus.

Étant donné cela, la question que nous devons nous poser est la suivante : sachant que nous voulons régénérer la structure Vauban en une semaine, quelle intensité devons-nous appliquer ?

Dans ce calcul, nous allons uniquement déterminer le nombre de moles d'électrons nécessaires pour l'électrolyse sur 7 jours. Ce résultat n'implique pas que la structure Vauban sera réellement régénérée durant cette période. Tout d'abord, nous devons estimer le nombre d'ions OH⁻ nécessaires à la réalcalinisation. Cela nous donnera le nombre d'électrons nécessaires car, selon la demi-réaction (équation 7), 1 électron produit 1 ion OH⁻.

Pour référence, dans la section précédente, la densité de courant était supposée être $j = 20 \text{ A/m}^2$, avec 0.4 A pour une surface de 0.02 m². Une intensité plus faible pourrait prolonger le temps nécessaire à la migration des ions et à l'obtention de la régénération souhaitée, nous allons donc choisir une densité de courant pour un véritable traitement par électrolyse.

Densité de courant pour l'électrolyse : $j = 6.25 \text{ A/m}^2$, Durée du traitement : $\Delta t = 7 \text{ jours} = 7 \times 24 \times 3600 \text{ s}$.

Étape 1 : Calculer la charge totale (Coulombs) requise

Nous commençons par calculer la charge totale requise pour le processus d'électrolyse, qui dépendra de la densité de courant et de la durée du traitement.

La charge totale Q est donnée par l'équation :

$$Q = j \times S \times \Delta t$$

où :

$$S = 122,000 \text{ m}^2 \quad (\text{surface à traiter}),$$

$$j = 6.25 \text{ A/m}^2 \quad (\text{densité de courant}),$$

$$\Delta t = 7 \times 24 \times 3600 \text{ s} = 604,800 \text{ s} \quad (\text{durée du traitement}).$$

En substituant ces valeurs dans l'équation :

$$Q = 6.25 \text{ A/m}^2 \times 122,000 \text{ m}^2 \times 604,800 \text{ s} = 4.7 \times 10^{13} \text{ C}.$$

Étape 2 : Calculer le nombre d'électrons transférés

Le nombre de moles d'électrons transférés durant le processus d'électrolyse peut être déterminé en utilisant la constante de Faraday, $F = 96,500 \text{ C/mol}$.

Le nombre de moles d'électrons n est calculé par :

$$n = \frac{Q}{F} = \frac{4.7 \times 10^{13} \text{ C}}{96,500 \text{ C/mol}} \approx 4.87 \times 10^8 \text{ mol}.$$

Étape 3 : Déterminer l'intensité de courant requise

L'étape suivante consiste à déterminer l'intensité de courant nécessaire pour obtenir cette charge sur la période spécifiée. En utilisant l'équation :

$$I = \frac{Q}{\Delta t},$$

nous substituons les valeurs :

$$I = \frac{4.7 \times 10^{13} \text{ C}}{604,800 \text{ s}} \approx 7.78 \times 10^7 \text{ A}.$$

Ainsi, l'intensité de courant requise pour régénérer la structure Vauban en 1 semaine est d'environ $7.78 \times 10^7 \text{ A}$.

Le processus d'électrolyse nécessiterait une quantité massive de charge électrique pour traiter toute la structure en béton de l'école. Si l'on compare cela aux études existantes sur la réalcalinisation par électrolyse, un tel traitement serait réalisable mais nécessiterait une puissance et un temps considérable.

Autre approche : cibler les zones à haut risque

ANNEXES

A. Protocole de fabrication d'un béton armé

Pour le petit bloc de béton que nous souhaitons fabriquer, il est préférable de réaliser du mortier (sans l'agrégat).

Matériel :

- Sac de 10 kg de mortier
- Eau
- Tupperware
- Planche en bois découpée au laser qui s'adapte à la forme du Tupperware pour faire un séparateur
- Tige en acier
- Bécher de 400 mL
- Spatule
- Support de levage
- Grue et écrou de fixation



Figure 43: Balance, spatule, barres en U et béchers



Figure 44: Notre mélange de mortier

Protocole :

1. À l'aide d'une balance, pesez 450 g de mortier dans un bécher de 400 mL.
2. Dans un autre bécher, ajoutez 100 mL d'eau puis quelques mL de phénolphthaléine.
3. Incorporez progressivement le mortier dans l'eau, en veillant à bien mélanger.
4. Le mortier devrait devenir rose, ce qui indique qu'il est basique.
5. Pendant le mélange, préparez le moule pour le mortier, qui fera partie du Tupperware séparé par la planche en bois (facile à ajuster pour obtenir l'épaisseur souhaitée). De l'autre côté, un support de levage agira comme un compresseur face à la planche. À l'aide d'une grue et d'un écrou de fixation, maintenez la tige en U au centre du moule, avec les extrémités vers le haut.
6. Incorporez soigneusement le mélange dans le moule, en vous assurant de bien remplir toutes les interstices.
7. Aplatissez le dessus et compressez avec le support de levage.
8. Et voilà ! Il suffit maintenant d'attendre plus de 24 heures.

B. Code Python d'une image au pas de l'hélice

```

1 # from PIL import Image
2 import numpy as np
3
4 # fonction qui convertit RGB, XYZ et (x,y) d'une image avec forme de rectangle
5 def tout(fichier):
6
7     # conversion en RGB image
8     def conversionRGB(fichier):
9
10         image = image.open(fichier)
11         image_numpy = np.array(image)
12         rgb = image_numpy.swapaxes(0, 1)
13
14         RGB = [round(float(value), 2) for value in rgb]
15         rgb = [round(float(rgb[0]/255), 2), round(float(rgb[1]/255), 2), round(float(rgb[2]/255), 2)]
16
17         return RGB
18
19     # conversion des matrices
20     rgb = conversionRGB(fichier)
21     rgb_pour_conversion = [round(value, 2) for value in rgb]
22     M_RGB = [[0.4124, 0.3576, 0.1871],
23              [0.2126, 0.7152, 0.0722],
24              [0.0131, 0.1192, 0.9581]]
25     M_CIE94 = [[0.40, 0.41, 0.19],
26                [0.1707, 0.8134, 0.0169],
27                [0, 0, 0.99]]
28
29     # conversion RGB vers XYZ
30     def conversionXYZ(rgb_pour_conversion):
31
32         XYZ = [0, 0, 0]
33
34         for i in range(3):
35             for j in range(3):
36                 XYZ[i] += valeurrgb[j]*M_CIE94[i][j]
37                 XYZ[i] = round(XYZ[i], 2)
38
39         return XYZ
40
41     xyz = conversionXYZ(rgb_pour_conversion)
42
43     # conversion XYZ vers (x, y)
44     x = round(xyz[0]*(xyz[1]-xyz[2]), 4)
45     y = round(xyz[1]*(xyz[1]-xyz[2]), 4)
46     coordonnees = (x, y)
47
48     return rgb, xyz, coordonnees
49
50 def rgblangueurdonde(x, y, c):
51     # conversion RGB vers XYZ
52     def conversionXYZ(x, y, c):
53
54         XYZ = [0, 0, 0]
55         valeurrgb = [x, y, c]
56
57         M_CIE94 = [[0.40, 0.41, 0.19],
58                    [0.1707, 0.8134, 0.0169],
59                    [0, 0, 0.99]]
60
61         for i in range(3):
62             for j in range(3):
63                 XYZ[i] += valeurrgb[j]*M_CIE94[i][j]
64                 XYZ[i] = round(XYZ[i], 2)
65
66         return XYZ
67
68     xyz = conversionXYZ(x, y, c)
69
70     # conversion XYZ vers (x, y)
71     x = round(xyz[0]*(xyz[1]-xyz[2]), 4)
72     y = round(xyz[1]*(xyz[1]-xyz[2]), 4)
73     coordonnees = (x, y)
74
75     return coordonnees
76
77 dico = {}
78 dico[0] = (0.17, 0.01), 300: (0.166, 0.002), 400: (0.162, 0.005),
79         410: (0.158, 0.130), 420: (0.154, 0.183), 430: (0.15, 0.223),
80         440: (0.147, 0.265), 450: (0.144, 0.289), 460: (0.14, 0.303),
81         470: (0.13, 0.36), 480: (0.09, 0.14), 490: (0.05, 0.3),
82         500: (0.01, 0.54), 510: (0.04, 0.685), 520: (0.07, 0.83),
83         530: (0.15, 0.79), 540: (0.23, 0.79), 550: (0.3, 0.49),
84         560: (0.37, 0.03), 570: (0.44, 0.08), 580: (0.51, 0.05),
85         590: (0.57, 0.43), 600: (0.63, 0.37), 610: (0.64, 0.34),
86         620: (0.69, 0.31), 630: (0.686, 0.304), 640: (0.702, 0.290),
87         650: (0.708, 0.283), 660: (0.714, 0.268), 670: (0.7, 0.259),
88         680: (0.727, 0.273), 690: (0.734, 0.267), 700: (0.74, 0.26)
89
90 import math

```

```

91 # fonction de distance euclidienne
92 def distance_euclidienne(p1, p2):
93     return math.sqrt((p1[0]-p2[0])**2 + (p1[1]-p2[1])**2)
94
95 # Algorithme de Nearest Neighbor Search
96 def algo_NNS(x, y, helices):
97     min_distance = float('inf') # initialisation à l'infini pour comparer
98     nearest_step = None
99
100     for step, (he, hy) in helices.items():
101         # calcul de la distance euclidienne entre le point donné (x, y) et chaque point dans le dico
102         distance = distance_euclidienne((x, y), (he, hy))
103
104         # si la distance est plus petite, on met à jour la plus petite distance et le pas associé
105         if distance < min_distance:
106             min_distance = distance
107             nearest_step = step
108
109     return nearest_step
110
111 # Exemple d'utilisation
112
113 # le dictionnaire avec les pas de l'hélice et les coordonnées associées
114 helices = {}
115 helices[0] = (0.17, 0.01), 300: (0.166, 0.002), 400: (0.162, 0.005),
116         410: (0.158, 0.130), 420: (0.154, 0.183), 430: (0.15, 0.223),
117         440: (0.147, 0.265), 450: (0.144, 0.289), 460: (0.14, 0.303),
118         470: (0.13, 0.36), 480: (0.09, 0.14), 490: (0.05, 0.3),
119         500: (0.01, 0.54), 510: (0.04, 0.685), 520: (0.07, 0.83),
120         530: (0.15, 0.79), 540: (0.23, 0.79), 550: (0.3, 0.49),
121         560: (0.37, 0.03), 570: (0.44, 0.08), 580: (0.51, 0.05),
122         590: (0.57, 0.43), 600: (0.63, 0.37), 610: (0.64, 0.34),
123         620: (0.69, 0.31), 630: (0.686, 0.304), 640: (0.702, 0.290),
124         650: (0.708, 0.283), 660: (0.714, 0.268), 670: (0.7, 0.259),
125         680: (0.727, 0.273), 690: (0.734, 0.267), 700: (0.74, 0.26)
126
127 # Point (x, y) à tester
128 filename = "seau-orange-codexpython.jpg"
129 x = tout(filename)[0]
130 y = tout(filename)[1]
131
132 # Appel de la fonction pour trouver le pas le plus proche
133 nearest_step = algo_NNS(x, y, helices)
134
135 # Affichage du résultat
136 print(f"La longueur d'onde la plus proche de (x, y) est (nearest_step).")
137 print(f"nearest_step: {nearest_step} (x: {x}, y: {y})")
138
139 print(nearest_step, round(nearest_step*(2*pi*10**9/1000), 2), "nm")
140
141 print(nearest_step, round(nearest_step*(2*pi*10**9/1000), 2))

```

BIBLIOGRAPHIE

- P. G. de Gennes, The Physics of Liquid Crystals.
- Sophie Norvez, “Les cristaux liquides: D’un état insoupçonné de la matière aux écrans plats,” L’actualité chimique, n°387-388-389, juillet-octobre 2014, pp. 148-151.
- Rijeesh Kizhakidathazhath, Yong Geng, Venkata Subba Rao Jampani, Cyrine Charni, Anshul Sharma, and Jan P. F. Lagerwall, “Facile Anisotropic Deswelling Method for Realizing Large-Area Cholesteric Liquid Crystal Elastomers with Uniform Structural Color and Broad-Range Mechanochromic Response,” Advanced Functional Materials, vol. 30, no. 7, 2020, DOI: 10.1002/adfm.201909537.
- D.Y. Kim, K.M. Lee, T.J. White, et al., “Cholesteric liquid crystal paints: in situ photopolymerization of helicoidally stacked multilayer nanostructures for flexible broadband mirrors,” Nature, NPG Asia Mater 10, 1061–1068 (2018). <https://www.nature.com/articles/s41427-018-0096-4>.
- Pestana Nakamura, Y., Excerpt from the researcher’s thesis, Luxembourg.
- Emmanuel Cailleux et Elisabeth Marie-Victoire, “La réalcalinisation, une nouvelle technique de conservation des monuments historiques en béton armé – Évaluation de l’efficacité, de la durabilité et de l’innocuité des traitements,” L’actualité Chimique, n°312-313, octobre-novembre, p. 22.
- Valérie L’Hostis, Philippe Dillmann, Walter-John Chitty, Alain Millard et Régis Faquin, “Du Palais des Papes en Avignon au château d’eau Perret à Saclay – Les monuments historiques pour la compréhension du comportement à long terme de l’interface métal/béton,” L’actualité Chimique, n°312-313, octobre-novembre, p. 17.
- Y. Houst, “Carbonatation du béton et corrosion des armatures,” Chantiers/Suisse, vol. 15, n°6, 1984, pp.569-574.
- Réfection des ouvrages en béton, 1994, 145 pages. ISBN 3-905234-85-8. Edition originale: ISBN 3-905223471-8. Form. 724.462 f.