

# Rapport de TIPE



Session 2022  
BCPST-1C

Imperméabilité des plumes d'oiseau et  
résistance aux contraintes

Dominante BIOLOGIE

Charlène CUSTOS  
Valentin AUBRY  
Julia PREMADAS  
Béatrice JUMEAU

## Imperméabilité des plumes d'oiseaux et résistance aux contraintes



Si vous n'aviez jamais observé des canaries prendre leur bain dans une assiette tout en gardant leur plumage sec, c'est le moment de passer le cap.

Résister à la pluie, aux marées ou aux tempêtes, les oiseaux y arrivent très bien. Ils n'ont qu'à se secouer après une averse et leurs plumes sont déjà presque sèches. D'après un tel constat, il serait opportun pour l'Homme d'identifier la source de cette hydrophobicité, car ne serait-il pas merveilleux de devenir hydrophobe un jour de pluie ou nous avons oublié notre parapluie ?

Afin de déterminer les caractéristiques responsables de l'hydrophobicité des plumes d'oiseaux, nous allons analyser la constitution de ces dernières. Nous réaliserons ensuite une série d'expériences dans l'optique de déceler des possibles variations entre les plumes de différentes espèces d'oiseaux, ce que nous pourrons donc corrélérer au mode de vie de chacune. En effet, nous étudierons 7 espèces différentes qui sont :

- Le Cygne australien qui vit autour d'étangs et de lacs des steppes ou de la taïga et migre vers des plaines cultivées en hiver (espèce sauvage, aquatique et migratrice) ;
- Le Canard commun qui a des exigences faibles en termes d'habitat puisqu'il fréquente toutes sortes de milieux humides même s'il n'est pas attiré par les eaux profondes ou pauvres en éléments minéraux nutritifs (espèce sauvage, aquatique et sédentaire) ;
- La Colombe qui est un animal de volière d'intérieur ou d'extérieur (espèce domestique, terrestre et confinée) ;
- Le Ara bleu qui vit dans des zones tropicales majoritairement en Amazonie (espèce sauvage, tropicale et sédentaire) ;
- Le Faisan de Colchide qui s'adapte à tous milieux même s'il préfère les paysages variés (espèce sauvage, terrestre et sédentaire) ;
- Le Pigeon capucin qui vit dans un milieu urbain pollué (espèce sauvage, terrestre et sédentaire) ;
- Le Coq Sussex qui est un coq domestique d'apparat (espèce de basse-cour, terrestre et sédentaire) ;

Quels sont les paramètres responsables de l'imperméabilité des plumes d'oiseaux et comment évoluent-ils en fonction de leur milieu de vie ?

I) Origines de l'imperméabilité

- A) Étude de la structure des plumes à l'échelle macro et microscopique
- B) Étude des composantes des plumes à l'échelle moléculaire
- C) Glande uropygienne et propriétés

II) Étude de la flottabilité et de la perméabilité

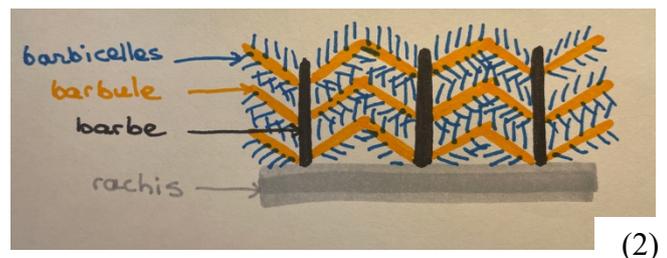
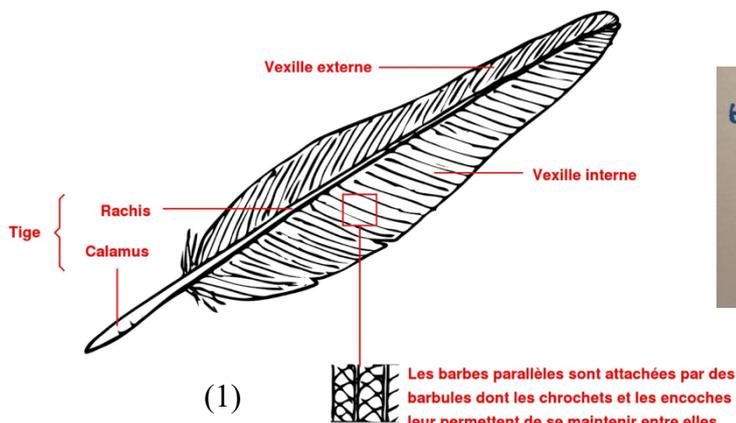
- A) Angle de mouillage, hydrophobicité, et dégraissage
- B) Expérience sur la flottabilité

I) Origines et conséquence de l'imperméabilité

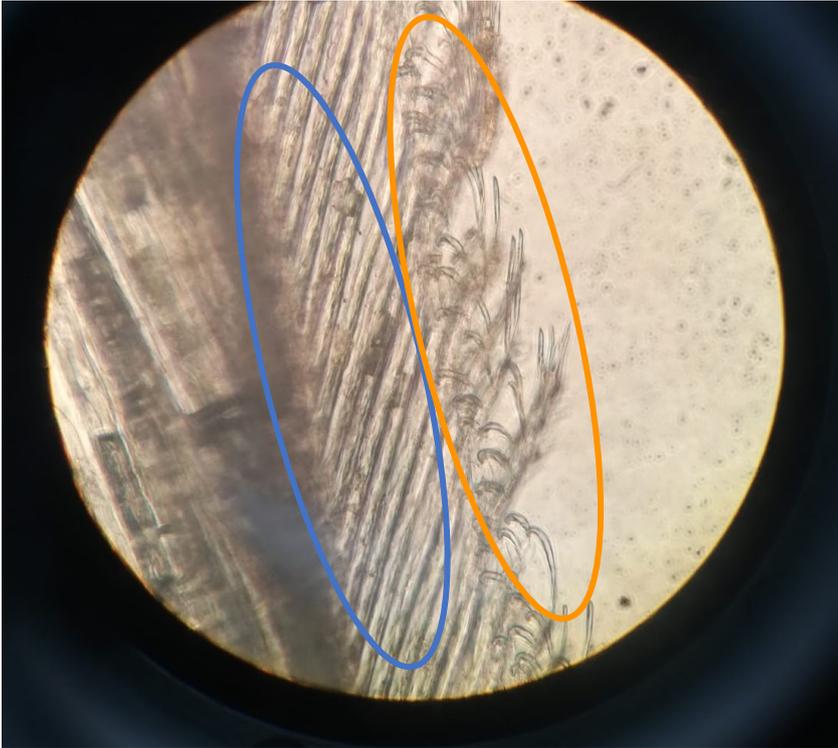
- A) Étude de la structure des plumes à l'échelle macro et microscopique

Une plume est constituée d'une tige principale, nommée rachis se terminant par le calamus, partie naissant dans une invagination épidermique de l'oiseau. De part et d'autre de la tige se répartissent les barbes, elles-mêmes garnies de barbules reliées entre elles par des barbicelles. Assimilables à des crochets, elles permettent d'éviter le décrochement et ainsi d'assurer la cohésion des barbes, mécaniquement importante pour le vol et l'imperméabilité de l'oiseau.

Lorsque l'oiseau se lisse les plumes à l'aide de son bec, il resserre les barbules entre elles, et veille ainsi au bon état de son plumage.



Schémas présentant la structure d'une plume à l'échelle (1) macroscopique et (2) microscopique



Plume de canard observé au microscope optique x10

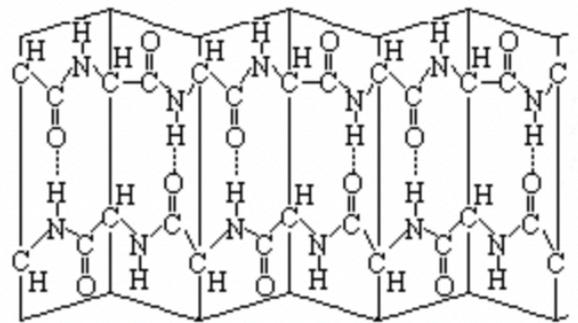
On peut ici observer les barbes dans deux états :

- en bleu, les barbes parallèles, disposition optimale pour l'oiseau
- en orange, les barbes déformées. On peut supposer que l'oiseau se chargerait de les redresser à l'aide de son bec.

On peut attribuer en partie l'imperméabilité des plumes d'oiseau à leur structure macroscopique.

### B) Étude des composantes de la plume à l'échelle moléculaire

La composante majoritaire des plumes est la  $\beta$ -kératine, protéine que l'on retrouve chez les reptiles. Cette dernière est un énantiomère de la kératine- $\alpha$ , que l'on retrouve chez les Mammifères. La différence principale entre ces deux molécules réside dans leur résistance. La  $\beta$ -kératine confère une meilleure rigidité à l'édifice qu'elle constitue. En effet, les acides aminés la constituant sont répartis en feuillet  $\beta$ , structure moléculaire connue pour sa résistance aux contraintes.



**Structure en feuillets plissés (kératine bêta)**

Un autre facteur responsable de l'imperméabilité des plumes de canard est à considérer : la cire provenant de la glande uropygienne, appelée sécrétion holocrine.

### C) Glande uropygienne et propriétés

Les oiseaux ont pour habitude de s'enduire les plumes de sécrétion holocrine, pour assurer leur hydrophobicité et par extension leur flottabilité. Ils prélèvent cette substance hydrophobe à la base de leur queue, afin de se l'enduire sur les plumes à l'aide de leur bec et de leur tête.



Glande uropygienne d'un canard commun

Détaillons la structure et la composition de cette glande sébacée :

Cette structure bilobée composée de tissus conjonctifs et adipeux se situe à la base du croupion, et est surmontée d'une petite touffe de plumes jouant le rôle de mèche pour l'écoulement de la cire monoester aliphatique.

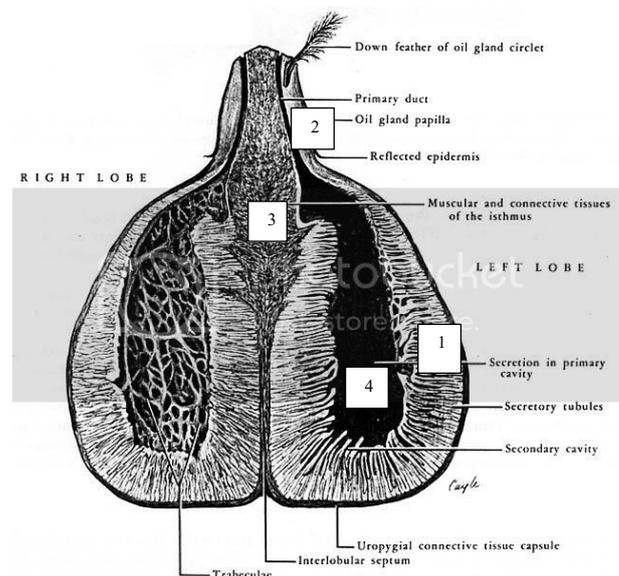
Deux constituants la composent :

- le corps gras, constitué d'acides gras ayant une queue aliphatique constituée de plus de six carbones.
- des alcools de cire monohydroxyde (par exemple : l'uropygiol) Ce sont des composés très stables au cours du temps, incolores et huileux.

La teneur respective des constituants varie selon l'espèce, l'âge, le sexe de l'individu ou encore la saison.

Le fonctionnement de la glande uropygienne est de type holocrine : la production de la substance d'intérêt est due à la rupture des cellules sécrétrices. Dans notre cas, elles se situent au niveau des **tubules sécréteurs (1)**. Par l'intermédiaire de son bec, le canard appuie sur la **papille huileuse (2)** située à la surface de la glande. Ce contact déclenche une contraction des **cellules musculaires lisses (3)** entourant la **cavité sécrétrice (4)**, acheminant la substance jusqu'à l'orifice.

Le canard peut enfin récupérer la cire produite et s'en enduire les plumes.



A la suite d'ablations expérimentales de la glande uropygienne, une dégradation du plumage et une mouillabilité accrue ont été observées sur les oiseaux, confirmant le rôle essentiel de la glande dans l'imperméabilité du plumage

## II) Étude de la flottabilité et de la perméabilité

### A) Angle de mouillage, hydrophobicité et dégraissage

L'étude de l'angle de mouillage permet de déterminer l'hydrophobicité d'un liquide donné sur une surface donnée. Dans notre cas, nous avons voulu déterminer les interactions que pouvaient avoir l'eau avec les plumes d'oiseaux. L'angle de mouillage, aussi nommé angle de contact, met en relation des tensions superficielles à plusieurs interfaces. La tension superficielle résulte de l'augmentation de l'énergie à l'interface entre deux fluides. En effet, les interfaces jouent un rôle dans la forme de la goutte d'eau par les différences d'énergies présentes à chaque interface.

Les molécules d'eau d'une goutte établissent des liaisons hydrogène entre elles. Cela implique une certaine cohésion au sein de la goutte. Cependant, à la surface, l'énergie de liaison est plus élevée car une molécule en surface est entourée à moitié d'eau, et à moitié de gaz environnant. Ayant moins de molécules homologues avec lesquelles se lier, une molécule d'eau en surface créera des liaisons plus fortes avec ses molécules d'eau voisines.

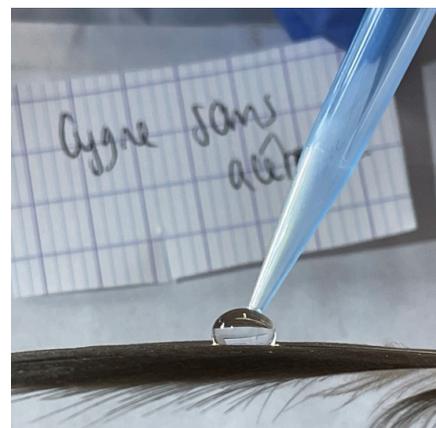
De plus, tout corps cherche constamment à diminuer son énergie interne. L'énergie étant la plus grande à la surface d'une goutte, cette dernière va chercher à diminuer sa surface, d'où la forme sphérique d'une goutte d'eau. Ainsi, c'est la tension superficielle à l'interface air/eau qui donne cette force si particulière à une goutte.

Par ailleurs, le poids est aussi un facteur à considérer lorsque l'on étudie l'angle de mouillage sur un solide. C'est la résultante de la tension superficielle et du poids qui vont donner une forme plate à l'interface eau/solide et sphérique à l'interface eau/air.

L'interprétation de l'angle de contact est assez simple. Si l'angle de la goutte sur le solide excède  $90^\circ$ , nous pouvons considérer que le matériau est hydrophobe, voir très hydrophobe. Nous pouvons déduire d'une valeur inférieure à  $90^\circ$  que le matériau est au contraire plus ou moins hydrophile. Enfin, un angle de  $90^\circ$  signifie que le matériau est parfaitement mouillable. Ainsi, plus l'angle de contact est grand, plus la mouillabilité du matériau est faible.

### **Protocole expérimental relatif aux angles de mouillage :**

Pour étudier la perméabilité des plumes, nous avons voulu comparer les angles de mouillage sur des plumes de plusieurs espèces, vivant dans des milieux de vie différents. De plus, nous souhaitons comparer l'effet de la graisse naturelle des plumes sur l'hydrophobicité. Pour cela, nous avons trempé sous la hotte les plumes dans de l'acétone pendant 5 minutes. Nous avons utilisé ce liquide incolore pour ses propriétés dégraissantes. A mi-temps nous avons retourné la plume afin de répartir équitablement l'effet de l'acétone. Enfin, nous avons laissé sécher la plume puis nous avons procédé à l'étude des angles de mouillage.



Chaque plume a été tenue horizontalement puis une goutte d'eau de 100 microlitres prélevée avec une micropipette (250 microlitres) (photo ci-dessus) y a été déposée. L'expérience a été répétée pour les plumes avec et sans acétone. Nous avons pris en photo les angles formés par les gouttes sur les plumes et mesuré ces angles informatiquement.

Ainsi, même si la précision n'est pas optimale, les résultats obtenus sont satisfaisants. En effet, deux composantes donnent à la plume sa capacité hydrophobe. Il y a tout d'abord l'écartement des barbes mais aussi le graissage de la plume à partir des sécrétions de la glande uropygienne.

	Sans acétone	Avec acétone
Cygne	104	89
Canard	122,5	74,5
Colombe	110,5	110,5
Ara	108	103
Faisan	110	0
Pigeon	129	124
Coq Sussex	109	99



Tableau présentant les valeurs d'angle de mouillage en degré en fonction de l'espèce, avec ou sans acétone

La lecture des angles a été faite par trois personnes pour pouvoir faire une moyenne de nos résultats. Nous observons des valeurs cohérentes avec nos attentes. En effet, le pigeon, le ara et la colombe (oiseaux non aquatiques) conservent une même valeur d'angle de mouillage malgré l'absence de graisse. Nous en déduisons que leur hydrophobicité proviendrait davantage de l'imperméabilité de la plume et donc de sa forme plutôt que de sa constitution chimique. A l'inverse, chez le cygne et le canard, l'angle de mouillage est réduit après le dégraissage, nous démontrant l'importance de la sécrétion uropygienne pour ces deux espèces aquatiques. Le résultat sur le faisan est radical, la plume a perdu toute son hydrophobicité après dégraissage, amenant à la même conclusion que le canard et le cygne. En revanche, nous pouvons prendre en compte la structure de la plume, qui, chez le faisan était abîmée, en effet les barbes ne s'accolaient plus aussi bien qu'elles ne l'auraient dû faussant très probablement nos résultats.

## B) Flottabilité

Une de nos expériences portait sur la flottabilité. Pour cela nous avons déposé chaque plume à la surface de l'eau puis graduellement imposé une certaine valeur de masse pour savoir combien de grammes la plume pouvait supporter avant de couler.

Les masses utilisées étaient des trombones et leurs valeurs ont été mesurées avec une balance de précision. Sachant qu'une balance mesure un poids avant de la convertir en une masse et

que les trombones étaient magnétiquement attirés à celle-ci, nous les avons placés au-dessus d'un béccher en verre afin de minimiser au maximum les erreurs de valeurs.

La surface des plumes a été mesurée au triple décimètre.

Les rapports masse/surface de la plume sont indiqués dans le tableau ci-dessous:

	Cygne	Canard	Colombe	Ara	Faisan	Pigeon	Coq Sussex
Surface (cm <sup>2</sup> )	3 x 16 = 48	2 x 14,5 = 29	2 x 7,2 = 14,4	4 x 16,5 = 66	3 x 7 = 21	6 x 2,5 = 15	13 x 2,8 = 36,4
Masse maximale supportée (g)	10,522	0,635	3,194	12	3,472	2,25	6,167
Rapport de flottabilité (g/cm <sup>2</sup> )	0,22	0,02	0,22	0,18	0,17	0,15	0,17

Notons que les rapports de flottabilité sont en moyenne situés autour de 0,18 si on ignore le canard. Cette dernière valeur est en effet non utilisable car les plumes que nous avons à disposition étaient très abîmées. La graisse a donc très certainement été altérée, ce qui entraîne la perte du caractère hydrophobe de la plume.

En considérant donc nos autres résultats, nous constatons une flottabilité maximale pour le cygne et la colombe. Le premier résultat est cohérent puisque le cygne est un oiseau aquatique. Nous ne savons pas si cette valeur est due à la forme de la plume et la disposition de ses barbes ou à la présence de graisse. Une deuxième expérience de flottabilité avec des plumes dégraissées à l'acétone aurait pu permettre de répondre à cette question mais notre nombre de plumes ne nous a malheureusement pas permis de la faire.

Pour ce qui est de la colombe, la déduction la plus probable serait de considérer la disposition des barbes de ses plumes: puisque très resserrées, le caractère imperméable est très bien conservé.

En revanche, en prenant en compte l'étendue des valeurs utilisables, nous constatons qu'elle est seulement de 0,07. Ce résultat est trop petit pour interpréter les écarts de valeurs entre chaque espèce.

### **Expérience microscopique relative à la présence ou non de bulles d'air à la surface de la plume**

Dans cette expérience, nous cherchons à savoir si la graisse sur les plumes permet à celle-ci de conserver de l'air lorsqu'elle est plongée dans l'eau. Nous coupons donc quelques barbes du rachis que l'on place séparées sur une lame microscopique. Nous déposons dessus une goutte d'eau de 100 microlitres puis nous refermons le système avec une lamelle que l'on vient observer au microscope. Nous réitérons l'expérience pour chaque espèce quand la plume a subi un traitement à l'acétone ou non. Pour toutes les espèces, nous observons la présence de bulles d'air sous les barbes lorsque la plume n'a pas été traitée à l'acétone. Lorsque la

plume a été traitée à l'acétone, il n'y a cette fois plus aucune trace d'air. Cela confirme donc que l'hydrophobicité de la graisse permet à la plume de conserver de l'air près d'elle et donc au plumage de rester à peu près sec puisque l'effet est multiplié quand les couches de plume se succèdent.

	Sans acétone	Avec acétone
Cygne	Bulles d'air	Peu de bulles
Canard	Bulles d'air	Aucune bulle
Colombe	Bulles d'air	Aucune bulle
Ara	Bulles d'air	Aucune bulle
Faisan	Grosses bulles	Aucune bulle
Pigeon	Quelques bulles	Aucune bulle
Coq Sussex	Quelques bulles	Aucune bulle

Tableau présentant la présence de bulles d'air avec/sans acétone selon chaque espèce

### **Conclusion :**

Finalement, nous avons pu constater que l'hydrophobicité du plumage des oiseaux est multifactorielle et complexe.

En effet, nos expériences ont permis de mettre en avant le rôle primordial joué par la graisse enduisant les plumes, ainsi que celui de la structure microscopique "entrelacée" de la plume. La nature a encore une fois montré qu'elle savait répondre aux besoins relatifs aux espèces en les dotant de caractéristiques précises, telles que la glande uropygienne et la structure des plumes dans notre cas, ce qui leur permet de répondre aux exigences liées à leur cadre de vie.

De même que l'Homme s'est inspiré des fruits de la bardane ayant pour propriétés de s'accrocher aux vêtements à l'aide de crochets souples pour créer le Velcro®, nous pouvons nous demander dans quelles mesures l'Homme peut s'aider des techniques hydrophobes des oiseaux pour améliorer l'imperméabilité des tissus par exemple. A l'heure où de nombreux groupes de défense de l'environnement appellent à l'interdiction complète de substances perfluorées et polyfluoroalkylées utilisées pour leurs propriétés hydrophobes et grassante, le développement de nouveaux produits moins nocifs pour l'environnement et la santé semble être primordial. D'autant plus que les anciennes substances risquent de disparaître du marché textile. Le modèle d'hydrophobicité des oiseaux constitue alors une source d'inspiration de premier choix.

## Bibliographie:

1. La flottabilité chez les êtres vivants
  - <https://1760927.site123.me/l-hydrophobie-chez-les-etres-vivants-le-canard>
  - <https://la-flottabilite-des-etres-vivants.webnode.fr/i-b/>
  
2. Composition et structure des plumes:
  - <https://www.oiseaux.net/dossiers/ornithopedia/les.plumes.html#:~:text=La%20plume%20est%20faite%20de,l'arrangement%20rappelle%20un%20peigne.>
  
3. La glande uropygienne: emplacement et fonctions
  - <http://www.animogen.com/2015/01/16/sante-la-glande-uropygienne-emplacement-fonctions-et-pathologies-chez-les-perroquets/>
  
4. Glandes holocrines
  - <https://www3.unifr.ch/apps/med/elearning/fr/epithel/epithel11.html>
  - [https://stringfixer.com/fr/Preen\\_gland](https://stringfixer.com/fr/Preen_gland)
  
5. Composition de la cire produite par la glande uropygienne
  - [https://www.researchgate.net/figure/Molecules-other-than-esters-from-the-uropygial-secretions-collected-on-different-birds\\_tbl3\\_51530281](https://www.researchgate.net/figure/Molecules-other-than-esters-from-the-uropygial-secretions-collected-on-different-birds_tbl3_51530281)
  
6. Industrie textile
  - <https://www.modeintextile.fr/fonction-hydrofuge-vers-produits-fluores/>