

C Génial 2026

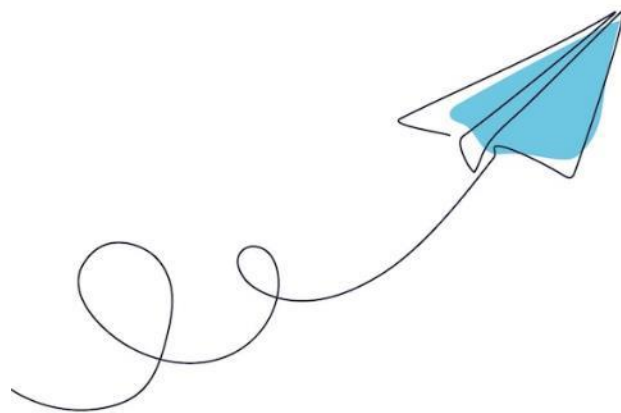
Plaqués au sol par un avion en vol Mesure du poids d'un avion en vol

Aristide ANDRES ; Thaïs CHAMPETIER ; Louis DUTOT

Encadrés par M.CROZATIER

Cité Scolaire Internationale Europole de Grenoble

Vidéo de présentation associée sur Youtube : https://youtu.be/s_rp70xBxLU



FONDATION
CGENIAL

Sciences à l'École


CONCOURS 2026
Lycée **CGENIAL**

Table des matières

I.	Introduction	3
	Qui sommes-nous ?	3
	Idée de départ	3
II.	Expériences préliminaires	3
III.	Modèle théorique du vol de l'avion	4
	La loi de Bernoulli	4
	Loi de Newton	5
IV.	Nos hypothèses.....	5
	Hypothèse 1 : propagation de l'onde de surpression	6
	Hypothèse 2 : propagation du courant d'air.....	6
V.	Protocole et montage	6
	Montage	6
	Fonctionnement des cellules de pesée et programmes informatiques	7
	Preuve du fonctionnement de nos balances	8
	Choix de l'avion.....	9
	Tentative de reproductibilité.....	10
	Protocole.....	10
VI.	Mesures et analyse	10
	Hypothèse du courant d'air.....	10
	Expériences liées à l'hypothèse de l'onde de surpression et mesures avec nos capteurs.....	11
	Interprétations des résultats	14
	Vitesse de l'avion.....	15
VII.	Incertitudes	15
	Incertitude relative sur les masse mesurées	16
	Incertitudes de poids et de temps liés à nos capteurs.....	16
	Incertitudes des plaques	16
	Incertitudes dues aux montages.....	16
VIII.	Modélisation de la pression au sol	16
	Modèle de l'ombre de pression au sol.....	16
	Modèle gaussien.....	17
	Modèle de l'onde sphérique/demi-sphérique.....	18
IX.	Conclusion	20
X.	Sens critique	20
XI.	Bibliographie	21
XII.	Remerciements	21
XIII.	Annexe22	
	Colonne	22

Tableau 2x3	22
4 capteurs et une plaque	23
Feuilles	24
Bords	24
Bords et feuilles	25

I. Introduction

Qui sommes-nous ?

Nous sommes trois lycéens (presque physiciens ?) en Terminale, nous connaissant depuis 2 ans, et avec l'envie depuis un petit moment de participer à des concours de physique : C Génial a été l'occasion parfaite de réaliser ce projet.

Idée de départ

Tout a commencé avec une publication Instagram de Fabrizio Bucella, qui demandait :

- « Si on pèse un bocal fermé contenant une mouche qui vole, pèse-t-on aussi le poids de la mouche ? »
- « Si le bocal est ouvert, que pèse-t-on ? »

À la sortie du lycée, nous en avons débattu et, après discussion, nous en avons conclu que, lorsque le bocal est fermé, le poids de la mouche est mesuré et, qu'en ouvrant le bocal, rien ne devrait changer. Mais pouvait-on facilement convaincre les personnes qui semblaient penser le contraire ? Et, plus complexe, qu'allait indiquer la balance si la mouche était légèrement au-dessus du bocal ? Plusieurs semaines plus tard, nous avons regardé une vidéo (« I weighted an airplane... while it was flying! », de AlphaPhoenix) dans laquelle il était question de peser le poids d'un avion lorsque celui-ci était en vol. Plus ambitieux que la mouche... Le vidéaste restait cependant assez flou sur les causes du déplacement de la force exercée par l'avion jusqu'à la balance et ne précisait pas non plus comment se déplaçait cette force en 3 dimensions.

Nous avons immédiatement pensé à utiliser un drone, qui vole grâce à une propulsion d'air vers le bas. Nous nous sommes donc dit que son poids devrait se retrouver sur une balance grâce à ce déplacement d'air, qui viendrait appuyer sur le plateau. Nous avons donc commencé des expériences préliminaires, avec d'abord un drone, puis avec un avion en papier. Les expériences avec l'avion nous ont semblé plus intéressantes et plus complexes. Nous avons donc basé notre projet sur l'avion.

II. Expériences préliminaires

Avertissement : Il est important de préciser que tout au long de ce mémoire, les mesures données par nos balances sont exprimées en gramme. Les cellules de pesée de nos balances renvoient un courant électrique que l'on peut interpréter comme une pression ou une force, la résistance du capteur variant en fonction de la déformation causée par la force exercée sur le plateau. Dans le cas du vol de l'avion, cette force résulte du champ de pression au sol créé par l'avion. Comme nous cherchons à mesurer la masse de l'avion, les forces exercées sur les plateaux seront interprétées comme un poids, converties et exprimées en gramme, grâce à la formule $P = m \times g$.

Nous avons commencé par faire des expériences avec notre balance de cuisine précise à 1g près. Les mesures avec le drone étaient plutôt concluantes, mais pour l'avion, nous n'observions rien. Cependant,

nous ne nous sommes pas découragés et avons décidé de tester avec une balance de meilleure précision. Pour cela, nous avons contacté un chercheur en sciences expérimentales, Cédric D'Ham de l'UGA de Grenoble. Nous avons pu accéder au laboratoire de sciences et utiliser une balance précise au centième de gramme. Avec ce nouvel instrument, lorsque l'avion passait au-dessus, et suffisamment proche, nous avons eu les premières mesures, qui montaient jusqu'à 0.04g.

Cela nous a interpellés, et nous nous sommes demandé si nous pouvions peser l'intégralité du poids de l'avion au sol. Nous avons donc centré notre projet sur les questions suivantes :

- Quel est le montage qui nous permet de mesurer au mieux le poids d'un avion en papier volant ?
- Quelle proportion du poids peut-on peser avec ce montage ?
- Quel est le meilleur avion pour nos expériences ?
- Quels sont les modèles théoriques qui permettent d'expliquer la propagation du poids de l'avion jusqu'à la balance ?
- Ces modèles permettent-ils d'expliquer la répartition spatiale et temporelle de la pression mesurée au sol ?

Pour commencer, nous nous sommes demandé comment vole un avion.

III. Modèle théorique du vol de l'avion

Lors d'un vol théorique où l'avion garde une altitude et une vitesse constantes, la somme des forces s'exerçant sur l'avion est nulle. En effet, son mouvement est rectiligne uniforme, donc d'après la 1ère loi de Newton, la portance de l'avion est égale au poids de l'avion. Afin de voler et donc de générer de la portance, l'avion exerce une force de réaction sur l'air. C'est donc cette force que nous essayons de mesurer par la suite, et son origine que nous expliquons à présent.

Pour expliquer le vol d'un avion, on doit tout d'abord comprendre l'écoulement de l'air autour de l'aile. Cet écoulement est théoriquement prédit par les équations de Navier et Stokes, dont les solutions donnent en tout point la vitesse et la pression de l'air. Cette équation étant très compliquée, Kutta et Jukowski les ont simplifiées à l'aide de différentes approximations, s'avérant toutes fausses. Cependant, elles fonctionnent suffisamment pour que l'on s'en serve encore maintenant.

En connaissant l'écoulement de l'air en tout point, on peut expliquer le vol d'un avion de deux manières : le principe de Bernoulli et celui de Newton. Les deux théories sont souvent vues comme opposées, cependant on peut démontrer qu'elles sont équivalentes et que l'une fonctionne aussi bien que l'autre, elles expliquent le même phénomène de différentes manières.

La loi de Bernoulli

Principe de Bernoulli : dans un fluide s'écoulant horizontalement, la pression du fluide aux points où sa vitesse est élevée est plus faible que la pression du fluide aux points où sa vitesse est plus faible.

En effet, la loi de Bernoulli, en deux points de l'écoulement d'une même ligne de flux), s'écrit :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Les variables P_1 , v_1 et h_1 représentent respectivement la pression, la vitesse et l'altitude du fluide au point 1, tandis que les variables P_2 , v_2 et h_2 font référence à la pression, la vitesse et l'altitude du fluide au

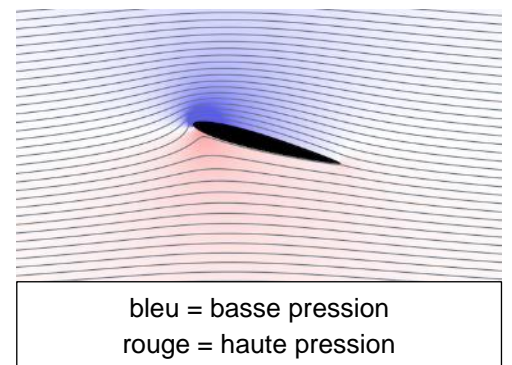


Figure 1 champ de pression (source : science étonnante)

point 2. Donc à une altitude constante, lorsque la vitesse en un point d'une ligne de flux augmente, la pression en ce point diminue.

D'après les équations de Kutta-Jukowski, l'air passant au-dessus de l'aile accélère, cela crée donc une dépression d'après le principe de Bernoulli. Cette dépression « aspire » l'avion et vient compenser le poids, ce qui maintient l'avion en l'air. Inversement, un ralentissement de l'air sous l'aile est induit, cela cause une surpression qui « pousse » l'aile vers le haut.

Une autre manière de comprendre l'origine de cette variation de pression plus intuitivement est de considérer que le flux d'air passant sous l'avion se heurte à la face inférieure de l'aile à cause de l'angle d'attaque et se comprime donc en ce point, poussant l'avion vers le haut. De même, le dessus de l'aile se trouve dans « l'ombre » de l'aile par rapport au flux d'air, la pression y est donc plus basse.

Nous avons vu que la surpression sous l'avion serait responsable d'environ 1/4 de la portance et donc la dépression au dessus de l'avion serait responsable des 3/4 de la portance.

Loi de Newton

Comme nous avons pu le montrer en filmant un avion traversant un nuage de fumée (Figure 2), il dévie une masse d'air lors de son vol. Cette déviation s'explique de deux manières. Les molécules arrivant en dessous de l'avion se heurtent à l'aile selon son angle d'attaque et sont donc déviées vers le bas. De plus, une dépression étant créée au-dessus de l'aile, la masse d'air située au-dessus de l'avion se retrouve « aspirée » vers le bas. Les lignes de flux entourant l'avion sont donc globalement déviées en direction du sol.



Figure 2: tourbillons formés après le passage d'un avion en papier

La première loi de Newton nous dit que si un objet change de trajectoire, c'est qu'une force s'est exercée dessus. Le seul objet à proximité de l'air étant l'avion, on en déduit que l'avion exerce une force sur l'air et le dévie.

Par ailleurs, la troisième loi de Newton nous dit que, si un objet exerce une force sur un autre objet, alors celui-ci applique aussi une force sur le premier : le principe « d'action-réaction ». Donc l'air exerce une force sur l'avion, force contraire à celle exercée par l'avion sur l'air. Cette force se décompose en portance (la composante perpendiculaire au vol de l'avion) et traînée (force opposée au vol de l'avion).

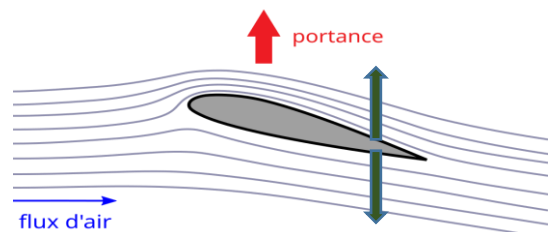


Figure 3 : Déformation de l'air après passage d'un avion en papier

IV. Nos hypothèses

Le modèle de Bernoulli montre qu'une surpression se forme sous l'aile de l'avion. Cette surpression se propage selon une onde se déplaçant à la vitesse du son sous l'avion. Cela nous conduit donc à faire l'hypothèse que ce que nous mesurons au sol correspond à cette onde sphérique. Le modèle de Newton montre qu'un flux d'air se propage vers le bas à l'arrière de l'avion. Cela nous conduit donc à faire l'hypothèse que ce que nous mesurons au sol correspond à un flux d'air descendant, créant un champ de pression au sol. Il faut également signaler que le vol de l'avion crée des tourbillons autour de l'avion, qui sont responsables en partie de la traînée, une force qui ralentit l'avion. Ces tourbillons sont des mouvements turbulents circulaires de l'air, et s'ils impactent le sol, ils contribuent à créer du « bruit » dans les mesures, rendant difficiles leur interprétation.

Pour expliquer la transmission du poids de l'avion jusqu'au sol, nous avons donc pensé et trouvé deux hypothèses, déduites de la théorie du vol de l'avion (Bernoulli et Newton).

Hypothèse 1 : propagation de l'onde de surpression

Comme nous avons dit précédemment, une surpression se crée sous l'avion. C'est à dire que le nombre de molécules d'air par unité de volume augmente. Celle-ci se propage alors sous forme d'onde de surpression, et donc en tant qu'onde (comparable à une onde sonore), à une vitesse de 340 m/s. Contrairement au son, elle prend la forme d'une seule onde et non pas d'une suite périodique d'ondes, les unes à la suite des autres. Celle-ci arrive ensuite au sol et appuie donc sur la balance, proportionnellement à sa surface, plus précisément à sa surface projetée sur une sphère. La force pressante exercée est alors mesurée par la cellule de pesée.

Nous chercherons à valider une autre hypothèse concernant la surpression : la surpression sous l'avion et sa propagation serait responsable de seulement 1/4 de la portance.

Hypothèse 2 : propagation du courant d'air

Lorsque l'avion passe au-dessus des balances, il dévie le flux d'air vers le bas créant ainsi un courant d'air dirigé vers le sol. Cette hypothèse amènerait à la conclusion que le poids mesuré est dû aux molécules d'air tapant sur la balance, après avoir gagné une vitesse verticale.

V. Protocole et montage

Montage

Suite à un échange avec notre professeur, M.Crozatier, nous avons pensé à démonter des balances et récupérer les cellules de pesée. Cela nous permettrait d'avoir des résultats plus précis : dans une balance, la limite de précision vient de la carte électronique et non de la résolution de la cellule de pesée. Nous avons donc démonté une balance usagée et fait un premier montage.



Figure 4 : Photo du premier prototype

Il n'était pas optimal du tout : la cellule n'était pas fixe et était difficilement reliable à un Arduino. De plus, nous voulions faire plusieurs montages afin de pouvoir observer et analyser comment se répartissait le poids de l'avion au sol. Cependant Thierry, l'aide de laboratoire, n'était pas très enjoué à l'idée de démonter 10 autres de ses balances. Nous avons donc commandé 9 cellules de pesée sur un site spécialisé afin de pouvoir réaliser de meilleurs montages. En attendant leur arrivée nous avons réfléchi à comment arranger ces cellules afin de nous permettre de peser le maximum du poids de l'avion, tout en ayant plusieurs plaques amovibles afin que l'on puisse tester plusieurs configurations. Nous avons donc, après réflexion, créé le montage ci-contre. L'ensemble des pièces au-dessus de la cellule fait aux alentours de 50g, soit la moitié de la masse théorique maximale qu'elle peut supporter.



Figure 5 : Photo du montage final

Pour toutes les relier, nous avons dû souder de longs fils — beaucoup (ce qui a nécessité deux jours de travail...). Il y en avait besoin de 4 par cellule : deux pour l'alimentation, un pour les données récupérées et un pour communiquer le temps. Le montage final était fastidieux car il y avait donc une grande quantité

de fils, qui s'entremêlaient, et laissaient place à de possibles mauvais branchements sur la carte Arduino. Il fallait de plus empêcher des courts circuits qui pourraient casser les cellules si jamais deux fils nus se touchaient.

Fonctionnement des cellules de pesée et programmes informatiques

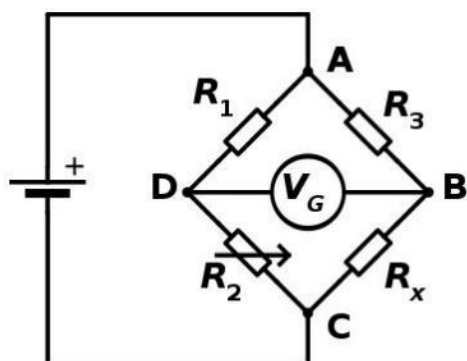


Figure 4 : pont de wheatstone

Tout d'abord, les capteurs se présentent sous la forme de barres en métal, déformables, en leur centre. Deux fils conducteurs, des jauges de contrainte, sont situés en haut et en bas du capteur, et se déforment en même temps que le capteur. Cette variation de longueur se traduit donc par une variation de résistance qui, à l'aide d'un pont de Wheatstone, provoque un courant électrique faible qui peut être mesuré en un point du circuit. La cellule de pesée est ensuite reliée à un module HX711 dont la fonction est d'amplifier le signal et de le convertir en signal numérique, qui peut ensuite être lu par la carte Arduino.

```
Sortie Moniteur série X
Message (Enter to send message to 'Arduino Mega or Mega 2560' on 'COM3')
12:54:11.559 -> 4032 0 0.01
12:54:11.559 -> 4038 5 -0.00
12:54:11.559 -> 4043 3 0.01
12:54:11.559 -> 4053 2 0.00
12:54:11.559 -> 4085 4 0.01
12:54:11.559 -> 4101 1 -0.02
12:54:11.593 -> 4124 0 0.01
12:54:11.593 -> 4126 5 -0.00
12:54:11.593 -> 4131 3 0.01
```

Figure 5 : moniteur série de l'IDE Arduino

L'acquisition des données se fait ensuite à l'aide de 2 programmes. Nous avons repris des programmes déjà existants mais avons dû les modifier afin qu'ils soient adaptés à ce que nous voulions faire. Nous avons donc contacté le chercheur Pierre-François Dutot spécialisé en informatique afin qu'il nous aide a réalisé ces deux programmes.

Le premier programme codé en C qui est exécuté sur la carte Arduino, elle-même reliée aux cellules de pesée, permet d'envoyer les données mesurées par les balances à l'ordinateur. L'autre, écrit en langage Python, permet de lire les données arrivant sur le port série de l'ordinateur puis de, dans un premier temps, tracer en temps réel le poids mesuré par une des « balances » et, dans un second temps, générer un fichier texte contenant les valeurs mesurées par chaque balance. Un autre programme, exécutable sur la carte Arduino permet de calibrer les balances. Pour cela, nous plaçons un objet de poids connu et nous le renseignons. Cela nous donne un « coefficient de proportionnalité » propre à chaque capteur. La tare, elle, est faite par la carte Arduino à chaque fois que nous téléversons le programme puis à nouveau au début de chaque acquisition par le programme Python.

Comme nous l'a expliqué Pierre-François Dutot sur la carte Arduino, une boucle s'exécute en continu : elle vérifie pour chaque balance si cette dernière est prête à envoyer des données (les balances fonctionnant chacune à une fréquence théorique de 10 Hz) et le cas échéant, le programme envoie la date d'acquisition suivie du numéro de la balance donc enfin du poids lu par la balance. Sur le moniteur série de l'IDE Arduino, nous pouvons donc lire les données.

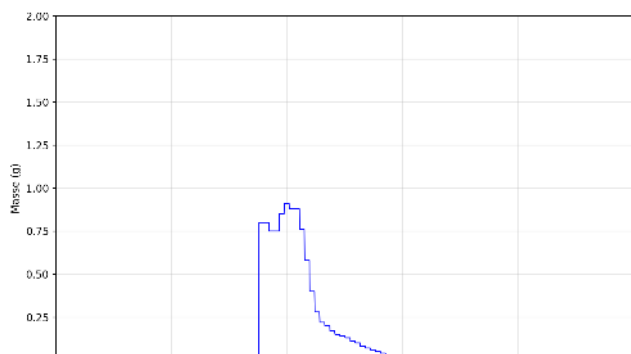


Figure 6 : réalisé en temps réel par une fonction Matplotlib.

Le programme Python, exécuté sur l'ordinateur à chaque fois qu'une mesure est souhaitée, lit ligne par ligne ce qui est envoyé sur le port série. A chaque nouvelle ligne envoyée sur le port série, on ajoute un nouvel élément à une liste dont chaque élément contient des poids pour chaque balance ainsi que le temps renvoyé sur la ligne du port série. Ce nouvel élément est composé à chaque fois de la nouvelle mesure (qui ne concerne qu'une

balance) et toutes les autres valeurs de masse correspondant aux autres balances sont simplement copiées du dernier élément de la liste. En même temps, une fonction *Matplotlib* trace en direct un graphique du poids mesuré en fonction du temps pour une seule balance (cf. Figure 6).

L'échelle de ce graphique ainsi que la durée de l'acquisition peut être modifiée à sa guise. Enfin, un fichier texte est écrit par le programme Python à la fin de chaque acquisition. Chaque ligne de ce document correspond à un élément de la liste stockant toutes les valeurs de poids et toutes les dates. La première colonne contient toutes les dates, les autres colonnes correspondent chacune à une balance. Nous pouvons donc ensuite tracer pour chaque balance, la masse mesurée en fonction du temps grâce au logiciel LatisPro.

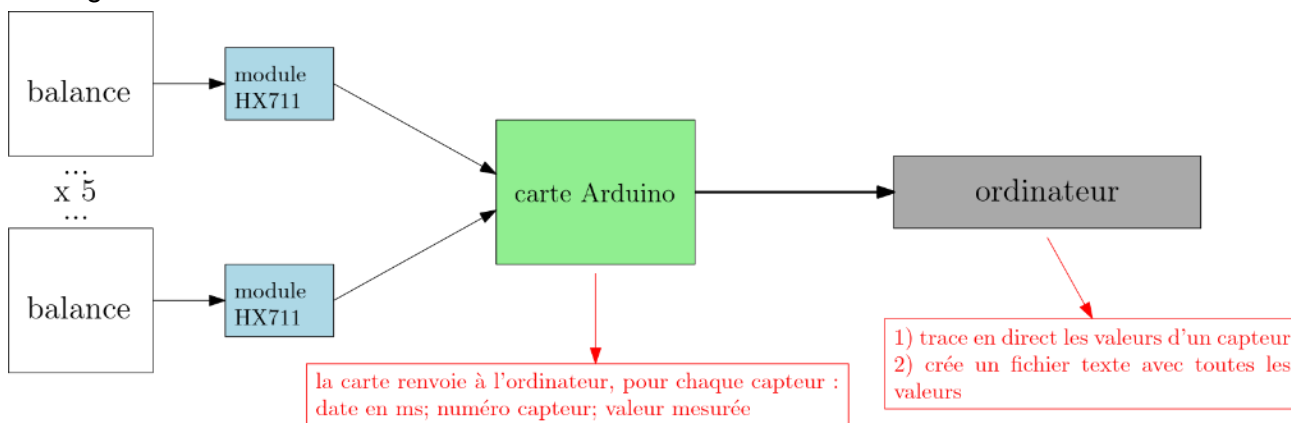
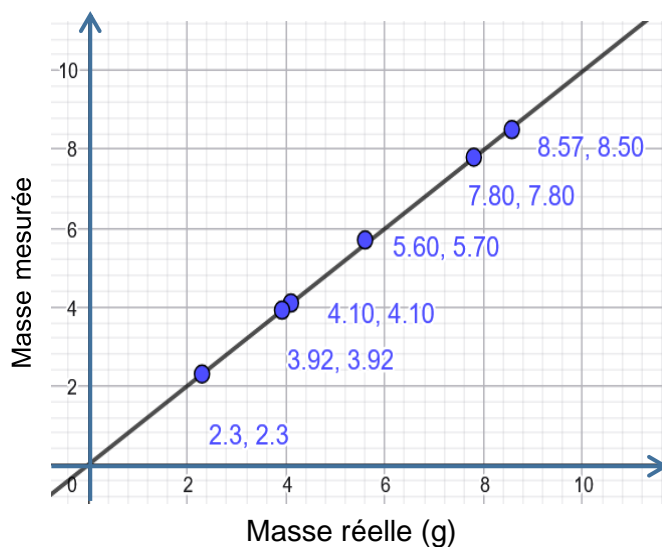


Figure 7: récapitulatif de l'électronique du montage expérimental

Preuve du fonctionnement de nos balances

Preuve du bon étalonnage de nos balances

Nous faisons l'étalonnage avec seulement 2 mesures : une la balance vide et une avec un objet de masse réelle connue. Cependant nous avons réalisés, grâce aux questions de différents chercheurs rencontrés, que nous devons vérifier que cet étalonnage reste juste pour des masses s'éloignant des masses utilisées pour l'étalonnage de nos capteurs. Pour cela nous avons tracé un graphique de la masse renvoyée par la balance en fonction de la masse réelle de notre objet ; celle-ci étant connue car nous avons utilisé des pièces de monnaie dont la masse est extrêmement précise.



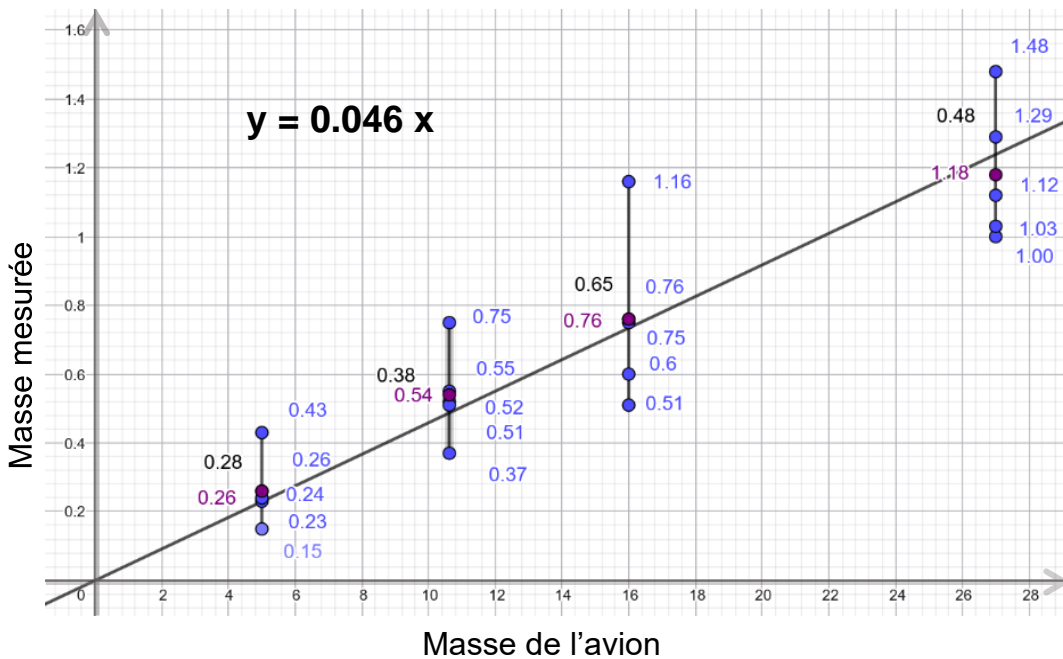
L'incertitude étant de 0.02 nous pouvons conclure que nos balances sont bien étalonnées.

Validation du fonctionnement de notre dispositif

Pour vérifier que nos capteurs sont fiables et que nos expériences sont reproductibles nous avons conçu une expérience. L'objectif était de montrer qu'il y avait proportionnalité entre la masse mesurée par les capteurs et la masse réelle de l'avion lancé.

Nous avons donc lancé quatre avions de masse 5.61g, 10.6g, 16,0g et 27,0g, et nous avons tracé un graphique représentant la masse mesurée par un capteur en fonction de la masse réelle de l'avion.

Ainsi, nous observons bien une proportionnalité entre la masse de l'avion, et la masse que l'on mesure avec notre balance, pour un lancer toujours équivalent. Nous pouvons donc affirmer que les valeurs mesurées par nos balances sont correctes.



Choix de l'avion

Comme expliqué en détail dans la partie présentant le modèle théorique du vol de l'avion, pour pouvoir considérer que le poids de notre avion est entièrement transmis par l'air, nous avons cherché à obtenir l'avion perdant le moins d'altitude possible lors de la phase de survol des balances.

Cependant l'avion doit aussi planer le plus doucement possible afin que les cellules de pesée aient le temps de prendre le plus de mesures possible lors du survol de l'avion. La meilleure résolution temporelle est d'en effet 8 à 10 mesures par seconde pour chaque capteur et la largeur des plaques est de 30cm. Avec un avion classique volant à environ 5m/s (ce que nous avons pu mesurer à l'aide d'une vidéo et en réalisant un pointage vidéo sur LatisPro), l'avion reste donc au-dessus d'une balance pendant environ 0,06s, ce qui est bien inférieur à la durée moyenne entre 2 acquisitions, d'environ 0,12s. Un avion volant plus lentement est donc souhaitable.

Pour cela nous avons testé différents avions :

- Nous avons testé différents modèles d'avion en papier, et après plusieurs lancers, nous avons gardé celui qui, à vu d'œil, planait le mieux ;
- Nous avons fait la comparaison de différents types de papier, entre du papier simple (90 g/m²) et du papier « Canson » (225g/m²). Après quelques mesures, nous avons remarqué que la masse mesurée avec un avion en papier simple était trop proche de la sensibilité des cellules (0,1g mesuré pour une sensibilité de 0,02g), et la proportion de poids retrouvée par rapport au poids de l'avion était plus importante avec celui en papier Canson. C'est donc ce type de feuille que l'on a gardé.



Figure 8 : Avion choisi, nommé Cracoucass

Nous avons donc opté pour l'avion de la Figure 8.

Il plane lentement à une vitesse moyenne sur 3m de 4 m/s d'après un pointage vidéo.

Tentative de reproductibilité

Afin de pouvoir toujours effectuer le même lancer et minimiser le vent lors du lancer de l'avion (pour ne pas fausser nos valeurs), nous avons fabriqué un lance-avion.

Il y a différents clous et élastiques, ce qui permet de lancer l'avion avec différentes forces et donc des vitesses initiales différentes, et donc de s'adapter aux différents avions (ils nécessitent une vitesse initiale différente pour planer en ligne droite horizontalement).



Figure 9 : Lance avion

Protocole

En premier lieu il faut calibrer les cellules de pesée. Pour cela nous avons pesé au préalable un objet avec une précision au centième de gramme, que l'on met ensuite sur la cellule de pesée, puis on entre le poids dans le programme Arduino. Cela nous donne un coefficient de proportionnalité que nous pouvons ensuite conserver pour la totalité des expériences. Nous avons vérifié que les cellules de pesée sont restées calibrées durant la totalité de nos expériences.

Pour chaque mesure, nous avons établi un protocole reproductible comme nous l'avait conseillé les chercheuses Isabelle Sivignon et Marie - Caroline Croset. Notre protocole établissait que l'un filme, un autre lance l'avion et que le troisième lance le programme puis tape légèrement une jauge de pression. Cela permet de synchroniser la vidéo avec les mesures. Et en comparant la vidéo et les mesures, nous pouvons savoir à quel moment l'avion passe au-dessus des balances, et donc si nos mesures sont dues au passage de l'avion ou à un courant d'air involontaire.

Nous avons ensuite reproduit à de nombreuses reprises cette expérience, en changeant différents facteurs, dont essentiellement la disposition des balances.

Par ailleurs, tout au long de notre projet, nous avons supposé que l'avion vole horizontalement et à vitesse constante sur la distance occupée par nos capteurs (environ 2m). Cela nous permet donc de supposer que la traînée de l'avion est nulle et donc que la portance est l'opposé du poids de l'avion.

VI. Mesures et analyse

Hypothèse du courant d'air

Pour tester la validité de cette hypothèse, nous avons filmé le passage de l'avion dans un nuage de fumée pour visualiser les mouvements de l'air engendrés par le vol de l'avion. Les films mettent en évidence la projection d'air vers le bas et la présence de tourbillons latéraux. Ceux-ci peuvent s'expliquer par le fait que lorsque l'avion vole, la différence de pression entre le dessous et le dessus de l'aile provoque une circulation de l'air autour de l'aile, qui initie ces tourbillons. Ces tourbillons sont eux aussi accélérés vers le bas (explication du vol de l'avion par Newton) et donc se propagent jusqu'au sol.

Pour vérifier si nos résultats expérimentaux peuvent s'expliquer par ces tourbillons, nous devons estimer la vitesse de ces turbulences à l'aide de nos films.



Figure 10 : des tourbillons perpendiculaires au vol de l'avion (symbolisé par l'ellipse bleue)

En filmant perpendiculairement au vol de l'avion, on constate que les tourbillons sont parfois parfaitement formés, avec une largeur d'environ 46cm. Pour certains lancers, les tourbillons sont parfois plus petits et plus nombreux. Grâce à un pointage vidéo nous avons calculé que la colonne d'air descend à une vitesse verticale de 0,18m/s.

En filmant parallèlement au passage de l'avion nous avons pu observer que de l'air était aussi projeté dans la direction du vol de l'avion. Par principe d'action-réaction, ceci cause une force de traînée.



Figure 11 : tourbillons parallèles au vol de l'avion (symbolisé par la flèche bleue)

Cependant, en supposant que l'avion vole à vitesse constante horizontalement, nous avons été conduits à négliger les forces de traînée. Nos capteurs mesurent seulement la composante verticale du mouvement de l'air et des tourbillons.

Expériences liées à l'hypothèse de l'onde de surpression et mesures avec nos capteurs

Nous avons expérimenté plusieurs dispositifs.

Expériences avec 7 cellules de pesée alignées perpendiculairement au vol de l'avion (ligne)

Nous avons commencé par une première expérience très simple afin d'avoir une première approximation de la masse mesurable par nos capteurs.



Figure 12 : capteurs organisés en ligne

Nous avons lancé l'avion perpendiculairement à la ligne des cellules de pesée (cf. Figure 12) puis tracé sur LatisPro les graphiques représentant la force mesurée par les balances (convertie en masse) en fonction du temps (cf. Figure 13).

On peut voir un pic important sur la balance sous l'avion (capteur C3 en vert sur la figure). Ce pic se dédouble aussi en 2 pics distincts, ce que nous expliquerons plus tard. La masse moyenne mesurée par cette balance est de 1.17g et la masse maximale est de 2.5g lorsque l'avion passe à 20cm au dessus de la balance.

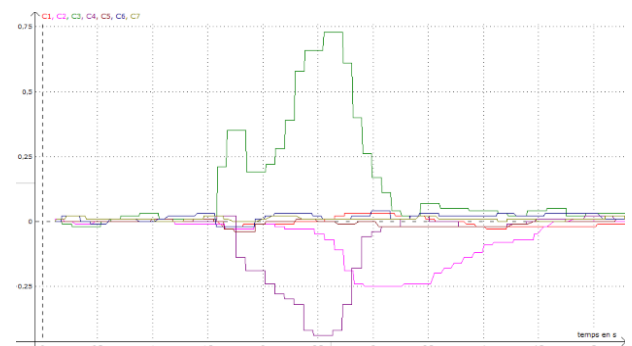


Figure 13 : masse mesurée par les capteurs en fonction du temps. Représentatif des résultats avec les capteurs

On peut également voir qu'il y a des pics négatifs sur les balances adjacentes, d'en moyenne à 0.50g.

Autres expériences

Nous avons aussi voulu tester d'autres configurations des capteurs pour tenter de comprendre la répartition et la transmission du poids de l'avion dans la couche d'air. Nous présentons les résultats de ces configurations dans le tableau ci-dessous. Ces résultats n'étant, à l'exception de ceux de la configuration précédente, pas suffisamment intéressants pour notre projet, nous avons réservé leur analyse à l'annexe de ce mémoire.

Nous avons positionné les capteurs de différentes manières, intitulées : en "ligne" comme présenté ci-dessus, en "colonne" en "tableau de 2x3" et en "4 cellules".



Figure 16: cellules organisées en colonne

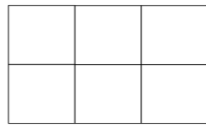


Figure 16 : cellules organisées en tableau 2x3

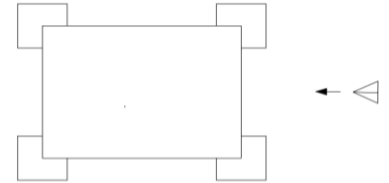


Figure 16 : 4 cellules avec une plaque

De plus nous avons parfois ajouté des rebords autour des capteurs pour empêcher l'air de passer sous le plateau et ainsi de le soulever (cf. Figure 18).



Figure 17 : exemple d'un rebord en carton

Nous avons essayé, pour la même raison, de mettre des feuilles pour faire la jonction entre les balances.

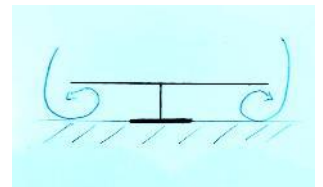


Figure 18 : ce que les bords permettent d'éviter

Voici nos résultats présentés sous

forme de tableau. Des graphiques typiques de nos résultats pour chaque expérience sont

présentés en « annexe » (cf. p 22 afin de ne pas alourdir ce document).

	colonne				ligne				
	rien	bord	feuille	feuille & bord		rien	bord	feuille	feuille et bord
masse max* (g)	4.7	2,5	4,3	4.5	masse max*	1,8	1,2	0,74	1.5
masse moyenne sur plusieurs lancers* (g)	2.8	2,4	2.8	4.0	masse moyenne sur plusieurs lancers* (g)	1,17g	1.14	0,72	1.0
largeur temporelle (s)*	1,4	1,5	1.4	0,89	largeur temporelle (s)*	0,96	1,7	1.3	0.9
présence d'un pic vers le bas**	NON	NON	NON	NON	présence d'un pic vers le bas**	OUI (-0.50)	OUI (-1,3)	OUI (-0,37)	OUI (-0.4)

**sur les balances adjacentes

*sur une cellule

EN BLEU : mesure trop peu répétée pour être prise en compte

	2x3	4 cellules
--	-----	------------

	plaque	feuille	plaque
Masse max (g) *	2,3	3,8	2,5
Masse moyenne sur plusieurs lancés (g) *	2.1	X	2.25
présence d'un pic vers le bas	OUI (-0.7)	NON	OUI (-1.8)

*somme sur toutes les balances

Après avoir analysé ces premiers résultats et afin de valider nos hypothèses nous avons réalisé deux autres expériences.

Expérience avec les cellules de pesée penchées

Pour comprendre comment se répartit le poids de l'avion dans la couche d'air et comment celui-ci se propage, nous avons pensé à mettre une cellule de pesée en hauteur pour voir si le poids est le même que celui de la cellule au sol (modèle de l'onde de surpression) ou beaucoup plus faible (modèle du courant d'air) ou bien nul.

Pour cela nous avons réalisé un support incliné (cf. Figure 21).

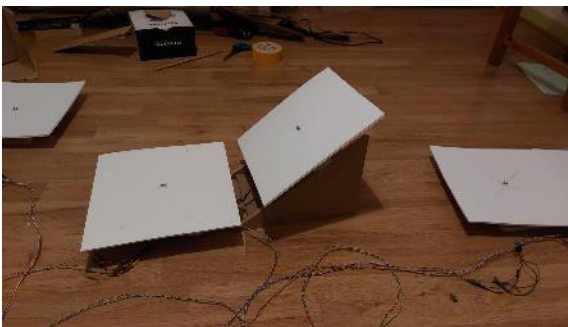


Figure 21 : construction permettant une certaine reproductibilité et de faire tenir un capteur incliné

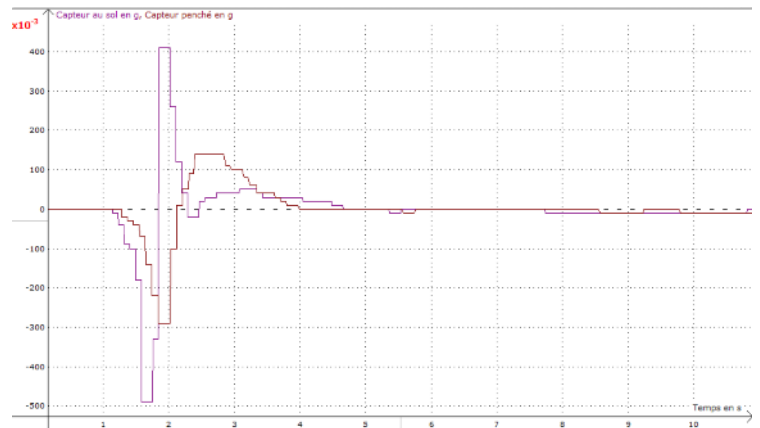


Figure 20 : masse mesurée par les capteurs en fonction du temps. Représentatif des résultats des expériences avec un capteur penché

Nous avons fait une première série de mesures dont les résultats sont difficilement exploitables. En effet nous avons mesuré des masses égales pour les deux balances. Celles-ci étant de 0,2g, se rapprochant de la zone d'incertitudes de nos capteurs.

Lors d'une deuxième série de mesures nous avons eu des résultats qui ne nous permettent ni de valider ni d'invalider aucune des 2 hypothèses, et que nous ne parvenons pas à expliquer. Nous avons soit une masse mesurée nulle, ce qui peut s'expliquer si l'avion passe à coté ou trop haut, soit des graphiques avec des pics et des creux pour les deux capteurs, difficile à expliquer.

Nous avons donc décidé de ne pas exploiter les résultats de cette expérience.

Expérience avec une cellule de pesée renversée

Nous avons réalisé que si l'onde de surpression se propageait, une onde de dépression devrait également elle-aussi se propager. Pour tester cette théorie, nous avons décidé de renverser un capteur afin de voir s'il mesure, lui aussi, une force.

Nous avons créé ce modèle (cf. Figure 21).

Nous avons eu de bons résultats (cf. Figure 22). La cellule du bas mesure une masse de 0.55g, ce qui est peu mais s'explique car l'avion est passé à 30 cm du plateau (contre 20 cm pour les autres expériences). Celle renversée mesure une masse négative de -1.8g. C'est donc environ trois fois plus important (surtout que l'avion est passé à 20 cm du capteurs renversé et à 30 cm de celle du bas). Cela tendrait à valider l'hypothèse que la surpression sous l'avion est responsable de 1/4 de la portance et la dépression au dessus de l'avion des 3/4.

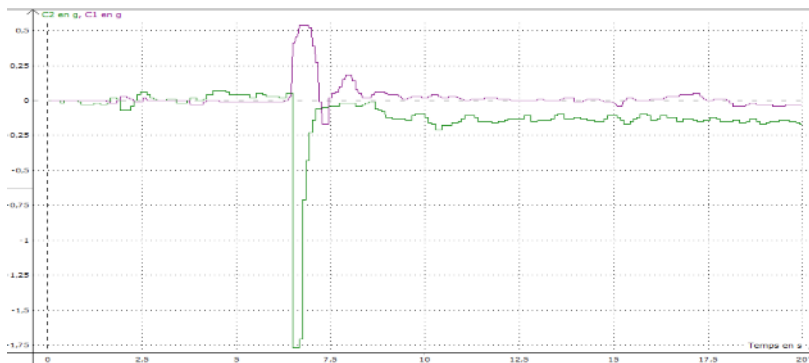


Figure 22 : masse renvoyée par nos capteurs en fonction du temps. Résultat représentatif des expériences avec le capteurs renversé

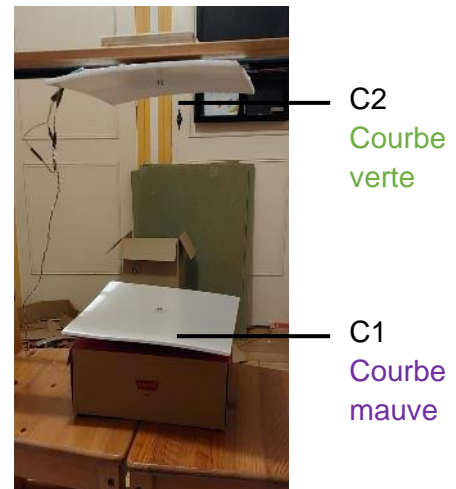


Figure 21 : montage qui permet de renverser un capteur

Interprétations des résultats

Voici donc l'analyse de nos résultats.

Double pics

Nous allons proposer une explication à la présence de double pics dans nos résultats. Le premier serait causé par l'onde de suppression, qui donc se déplacerait à 340m/s. Sur 20 cm de distance, on peut considérer que c'est instantané : dès que l'avion passe au-dessus du plateau nous mesurons une pression positive. Nous pouvons affirmer cette simultanéité car nous avons synchronisé une vidéo de l'avion et la mesure de la force reçu par nos capteurs au sol. Pour synchroniser la vidéo du vol de l'avion et les mesures renvoyées par les capteurs, nous avons appuyé sur l'un des capteurs, acte visible sur la vidéo et sur les données renvoyées. Nous avons ainsi le Δt correspondant au décalage temporel entre le début de acquisitions des capteurs et le début de la vidéo.

Le deuxième pic pourrait être causé par le courant d'air descendant, qui heurte un peu plus tard les balances. Comme le courant d'air va à une vitesse de 0,18 m/s il met 1,1s à parcourir 20cm. On peut voir que lors de nos acquisitions le Δt expérimental est de 0.8s en moyenne entre le début du premier pic (considéré comme début du passage de l'avion sur nos plateau) et le début du deuxième pic. On peut donc supposer que c'est bien le flux d'air descendant qui est responsable de ce deuxième pic.

Pics négatifs sur les balances adjacentes

Nous proposons ici une explication à la présence de pic négatif sur les balances adjacentes à la balance centrale. Une hypothèse est que ce soit dû aux tourbillons. Ceux-ci tournent du bas de l'avion vers le haut de l'avion (de la surpression à la dépression). En arrivant au sol ils tournent toujours dans le même sens. Nous avons mesuré grâce à des captations vidéos que l'écart entre les 2 axes de rotation de ces tourbillons est de 23cm, donc environ

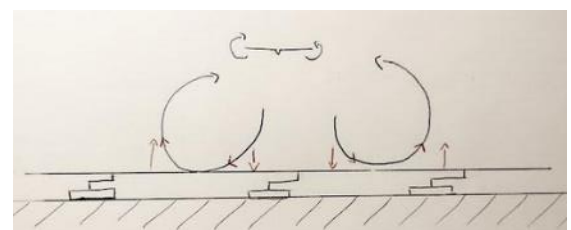


Figure 23 : action des tourbillons sur les balances

de même longueur que la largeur des balances. Les centres de ces tourbillons sont donc alignés avec les jointures entre les balances. Lorsque qu'ils arrivent au niveau des plateaux, ils appuient donc sur le plateau central, directement sous l'avion, et au contraire aspire les plateaux adjacents. Les tourbillons faisant 46cm de largeur (pointage vidéo) ils peuvent impacter les cellules de pesée avoisinantes et donc les « aspirer ». En tirant vers le haut les plateaux, les tourbillons exercent donc une force soulevant les plateaux. Celle-ci est retranscrite en masse négative par notre programme.

Une explication complémentaire serait qu'en étant bloqués par les plateaux, les tourbillons « s'étaleraient ». L'air qui précédemment tournait est maintenant poussé sur les coté. L'air situé au dessus des balances adjacentes à la balance centrale accélère donc, ce qui selon la loi de Bernoulli crée une dépression sur le dessus du plateau. Pour compenser cet écart de pression entre le dessous et le dessus du plateau, celui-ci est attiré vers le haut. Cette force est retranscrite en masse négative.

Ces deux explications semblent être validées car les mesures de dépression sur les balances adjacentes viennent approximativement en même temps que le deuxième pic sur la balance du milieu.

Une autre hypothèse est qu'un courant d'air provoqué par l'avion passe sous les plateaux et donc les soulève impliquant ainsi une mesure de pression négative. Cependant cette hypothèse semble être réfutée car la présence de bords et de feuilles entre les plaques ne modifient pas nos résultats (cf. Annexes).

Cellule renversée

Les résultats du montage de la cellule renversée nous permettent de supposer que la dépression au-dessus des ailes de l'avion se propage de la même manière que la surpression sous l'avion.

De plus nous pouvons observer que la dépression mesurée sur la cellule renversée est trois fois plus importante que la surpression mesurée sur la cellule au sol. Cela permet donc de valider expérimentalement notre hypothèse et de considérer que la surpression est bien responsable de seulement 1/4 de la portance.

Vitesse de l'avion

La vitesse de l'avion a aussi un impact sur les résultats obtenus. En effet, la fréquence d'acquisition de nos cellules, le temps entre deux valeurs, est de 95 ms en moyenne d'après une observation sur de nombreux tableaux de valeur récupérés. Par ailleurs, nous avons réalisé un pointage vidéo de plusieurs lancers de notre avion avec le lance-avion, afin de calculer sa vitesse. Ainsi, nous avons trouvé une vitesse moyenne de 3,65 m/s, avec une écart-type de 0,25 m/s. La longueur des plateaux de nos balances étant de 30 cm, l'avion passe 82 ms au-dessus d'un plateau, soit une durée inférieure au temps d'acquisition. Ainsi, notre avion peut passer au-dessus d'une balance sans que celle-ci n'acquière de mesure, pouvant expliquer certaines incohérences dans nos résultats.

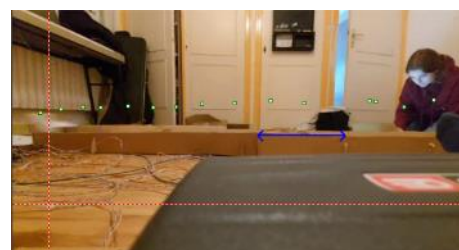


Figure 24 : pointage vidéo afin de déterminer la vitesse de l'avion

VII. Incertitudes

Nous avons décidé de contacter un chercheur spécialisé en incertitudes afin qu'il nous aide à comprendre quelles incertitudes faire pour notre projet. Nous avons donc contacté Cédric D'ham chercheur en sciences expérimentales de l'UGA de Grenoble et spécialisé dans les incertitudes.

Incertitude relative sur les masse mesurées

Nous réalisons une incertitude relative, ici avec les mesures réalisées avec les balances disposées en ligne, sans aucun autre paramètre :

lancer 1	lancer 2	lancer 3	lancer 4	lancer 5	lancer 6	lancer 7	lancer 8	lancer 9	Lancer 10	Lancer 11
1,027g	1,034g	0,72g	1,00	1,8g	1,03g	1,48g	1,12g	1,29g	1.49	1.03

nombre de valeur N	moyenne \bar{m}
11	1,18

incertitude relative sur les masses mesurees = 28%

Nous avons donc une incertitudes relative de 28% avec un intervalle de confiance de 67%. Cette incertitude est élevée ; cela peut s'expliquer par des lancers et donc la trajectoire de l'avion variant légèrement. Cela peut également s'expliquer par échantillonnage des balances (cf. Vitesse de l'avion) surtout que nous regardons seulement le maximum mesuré par le capteur qui varie en fonction de quand est prise la mesure. Les tourbillons formés par l'avion ajoute également une partie d'aléatoire.

Étant donné que nos lancers sont tous semblables, notamment grâce au lanceur d'avion, nous avons extrapolé cette incertitude à tous nos lancers.

Incertitudes de poids et de temps liés à nos capteurs

La cellule de pesée est précise à $2 \times 10^{-2} \text{g}$.

Comme détaillé précédemment, les capteurs ont une fréquence d'acquisition trop faible par rapport à la vitesse à laquelle l'avion survole nos balances.

Incertitudes des plaques

Du fait d'intempéries durant leur transport (de la grêle notamment), certaines plaques sont un peu ondulées, cela a pu modifier nos mesures.

Incertitudes dues aux montages

Lorsque nous avons voulu modifier les paramètres de chaque acquisition, la disposition des plaques des balances les unes par rapport aux autres, des feuilles recouvrant les trous et des rebords a pu ne pas être rigoureuse. Les feuilles ont aussi par exemple pu se déformer, faussant les mesures.

VIII. Modélisation de la pression au sol

Afin de vérifier nos 2 hypothèses de transmission du poids de l'avion nous avons établi différentes modélisations de la répartition des forces au sol. Dans la partie suivante, nous considérerons que tout le poids de l'avion reste à transmettre au sol, afin de valider ou invalider chaque modèle.

Modèle de l'ombre de pression au sol

Nous avons discuté avec le chercheur en mathématiques pure Christophe Champetier, agrégé en mathématiques des différents modèles qui permettent d'expliquer la propagation du poids de l'avion dans la masse d'air.

Nous avons fait l'hypothèse très simple d'une zone en surpression se propageant verticalement sous l'avion : tout le poids se propagerait verticalement jusqu'au sol, sur un cylindre dont la base serait égale à la forme de l'avion, telle une ombre. Ce modèle est peu réaliste mais c'est le plus simple et on peut le tester rapidement.

La base de ce cylindre aurait donc une surface égale à celle de l'avion, qui vaut $12 \times 18 + \frac{18 \times 10}{2} = 306 \text{ cm}^2$. En comparaison, les plaques de nos balances ont une surface de 900 cm^2 , donc elles devraient mesurer tout le poids de l'avion. Or lorsque l'avion passe exactement au-dessus d'une plaque, le poids le plus important que l'on ait pu mesurer est d'environ 1,8g. L'écart relatif entre le poids de l'avion et la valeur mesurée est de $\frac{(27-1.8)}{27} = 0.9 = 90\%$. Il n'y a donc pas accord entre la valeur théorique et celle expérimentale : ce modèle n'est pas réaliste.

Modèle gaussien

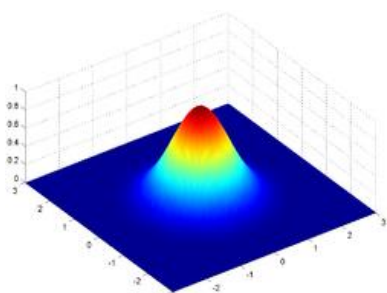


Figure 25 : gaussienne en trois dimensions

Approfondissant notre réflexion avec M. Champetier, nous avons abouti à une autre hypothèse : celle d'une répartition gaussienne de la pression au sol. Notons que c'est le modèle utilisé pour le vol d'un avion de ligne dans la vidéo (Alphaphoenix, Brian Hidet) citée précédemment, sans justification.

On peut expliquer la répartition gaussienne en imaginant le courant d'air se propageant jusqu'au sol. La théorie générale dit que la répartition du champ de pression horizontal devient gaussien si on est à une distance suffisamment grande de la source du courant d'air.

Le poids de l'avion se répartirait donc au sol suivant une courbe en cloche à deux dimensions, avec un pic de pression au milieu diminuant de façon exponentielle en s'éloignant du centre.

Pour expliquer cette répartition gaussienne, Christophe Champetier nous a proposé d'imaginer une circulation des molécules d'air comme sur une **planche de Galton**: dans cette expérience, chaque bille lâchée verticalement se décale aléatoirement soit à droite soit à gauche avec des probabilités 1/2. Au final après une certaine distance, les billes ont été mélangées et se répartissent suivant une gaussienne. Le problème est qu'il est compliqué de justifier l'écoulement à grande échelle de l'air selon le modèle de la planche de Galton. En effet, l'écoulement d'un fluide tel que l'air est turbulent et bien plus chaotique que les billes dans la planche. Mais les molécules dans le courant d'air sont entraînées aléatoirement par les tourbillons (en trois dimensions). Lorsque le courant d'air est devenu très turbulent, à distance assez grande de la source, il s'est formé des tourbillons de toute taille qui mélangent les molécules. La répartition horizontale de toutes les grandeurs, en particulier la pression, devient gaussienne.

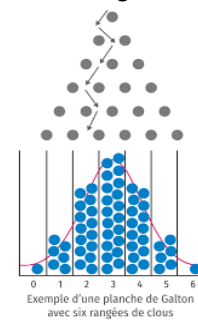


Figure 26 : Planche de Galton

Dans nos expériences, la répartition spatiale ou temporelle de la masse pesée par les capteurs a souvent la forme d'une courbe en cloche, qui peut ressembler à une gaussienne. Cela nous incite donc à penser que ce modèle pourrait se rapprocher de la réalité. Par exemple dans le graphique ci-contre donnant le poids mesuré en fonction du temps sur la balance centrale, l'évolution temporelle du poids mesuré pourrait correspondre à une répartition gaussienne. Mais la plupart des expériences donnent des valeurs négatives de pression sur les balances voisines de la balance centrale. Ces valeurs sont probablement causées par les tourbillons de grande taille autour du courant d'air descendant. Nos mesures invalident donc le modèle gaussien.

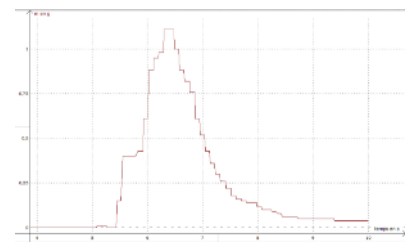


Figure 27 : masse mesurée en fonction du temps lorsque l'avion passe au dessus de la cellule de pesée

Modèle de l'onde sphérique/demi-sphérique

Nous avons ensuite contacté un autre chercheur, Olivier Michel, enseignant chercheur à l'UGA, agrégé de physique qui nous a proposé une autre modélisation. Ce deuxième modèle s'inspire d'une onde de surpression continue qui se déplace sous l'avion. L'avion en l'air « repose sur l'air » et avance : il provoque une perturbation de pression, qui comme toute perturbation de pression (et comme les ondes acoustiques), se propage à la vitesse du son, $c = 340\text{m/s}$ à 20°C . Une onde de surpression partirait du dessous de l'avion et se déplacerait ensuite dans les 3 dimensions à la même vitesse. Cependant, la surpression étant située sous l'avion lors de son vol, nous considérons ici que l'onde de surpression suit une propagation demi-sphérique, en direction du sol. Nous considérons également que la surpression se répartit uniformément sur la demi sphère.

Calcul approché de la force à l'aide d'une projection radiale

Pour le calcul suivant, visant à évaluer quelle part de la masse de l'avion devrait être mesurée par chaque balance sous l'avion, nous cherchons à calculer la surface du projeté de la balance sur une demi-sphère. En effet, nous avons fait l'hypothèse, suite au conseils d'Olivier Michel, que la surpression se propage de manière uniforme sur les demi-sphères. L'égalité suivante est donc vérifiée :

$$\frac{\text{Force exercée sur une balance}}{\text{Force totale}} = \frac{\text{Surface projetée de la balance sur la demi - sphère}}{\text{Surface de la demi - sphère}}$$

Selon ces schémas, nous pouvons donc intuitivement conclure que les balances plus éloignées de l'avion mesurent une force plus faible que celle centrale, le membre de droite de l'égalité ci-dessus diminuant lorsque la balance s'éloigne.

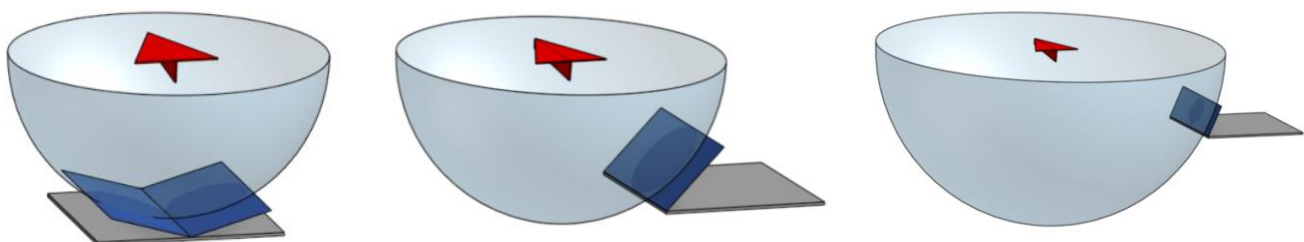


Figure 28 : Projeté de balances sur une demi sphère, pour la balance centrale ainsi que les 2 à sa droite

Afin de calculer l'aire du projeté de la balance sur la demi-sphère (ici en bleu foncé), nous faisons l'approximation suivante : le projeté est rectangulaire, de largeur L (à déterminer) et de longueur égale au coté de la balance. La largeur L varie donc en fonction de l'éloignement de la balance.

Les longueurs l, X et h sont connues. La longueur l vaut 30cm, c'est la largeur d'une balance, la longueur X dépend de la position de la balance, elle vaut par exemple 15cm pour la 2e balance en partant du centre. h est la hauteur de vol de l'avion, estimée par pointage vidéo. La différence entre l'angle α et l'angle β vaut 2γ . Par trigonométrie, nous trouvons les égalités suivantes :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{x+l}{h}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{x}{h} \quad \gamma = \frac{\alpha - \beta}{2}$$

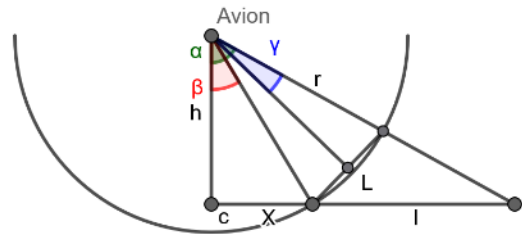


Figure 29 : Calcul géométrique de la largeur L

La longueur L s'exprime donc ainsi : $L = 2 \times r \times \sin \gamma$. La surface d'une demi sphère suit l'expression suivante : $2 \times \pi \times r^2$, avec r le rayon égal à $\sqrt{h^2 + X^2}$. Nous avons donc :

$$\frac{\text{Surface projetée de la balance sur la demi-sphère}}{\text{Surface de la demi-sphère}} = \frac{L \times l}{2 \times \pi \times r^2}$$

Comme calculée précédemment, la force transmise par les tourbillons correspond à seulement quelques grammes de la masse totale de l'avion. Comme mesuré et lu dans la littérature scientifique, la surpression sous l'avion est responsable de seulement $\frac{1}{4}$ de la portance. La masse renvoyée par chaque balance est donc la suivante : $m_{\text{théo}} = m \times \frac{1}{4} \times \frac{L \times l}{2 \times \pi \times r^2}$.

Pour la balance centrale, la démarche générale est la même mais une précision est nécessaire. L'intersection de la demi sphère et de la balance ne se faisant pas sur un coté de la balance (ce qui est une condition nécessaire à notre calcul géométrique), nous considérons 2 balances de largeur 15cm pour établir le projeté.

Nous pouvons donc à présent calculer la masse renvoyée par la balance centrale et celles adjacentes en fonction de la hauteur de vol à l'aide d'une fonction python. À noter qu'avec cette méthode de calcul, les approximations ne sont plus négligeables pour des hauteurs de vol trop petite, tel que 5cm ou 10cm. Ici la première masse renvoyée après chaque hauteur correspond à la balance centrale, puis les 2 suivantes aux 2 balances à sa droite ou à sa gauche.

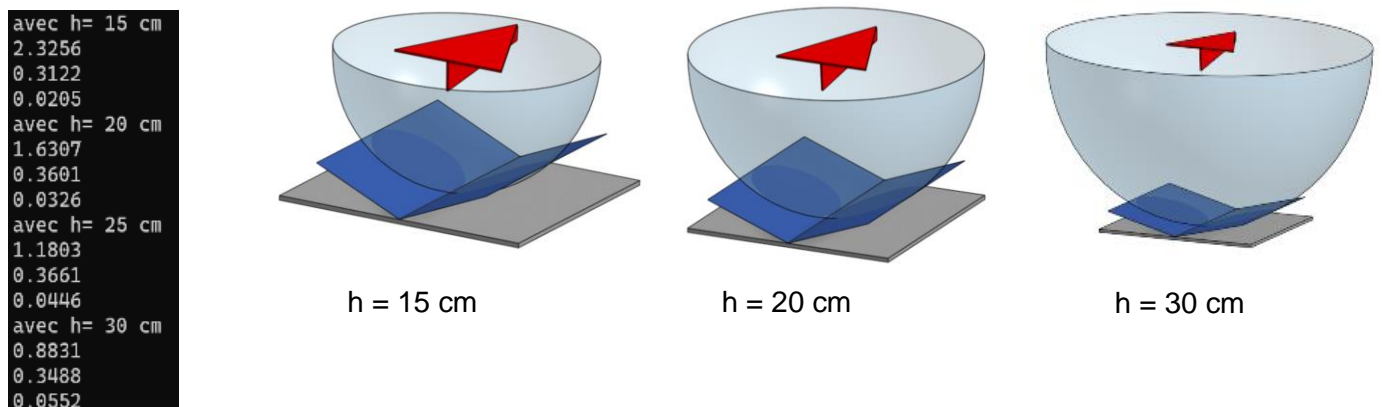


Figure 30 : capture d'écran de la fonction

Comme nous pouvons le voir ci-dessus, la masse mesurée par chaque balance diminue lorsque la hauteur de vol augmente. Ainsi nous pouvons comparer les masses théoriquement mesurées par la balance centrale à différentes hauteurs de vol de l'avion. Ci-dessous, les points verts représentent les masses que devrait théoriquement mesurer la balance centrale selon ce modèle, en fonction de la hauteur de survol de l'avion. Les valeurs réellement mesurées pour des vols à différentes altitudes (ce qui a été contrôlé par pointage vidéo) sont représentées en violet. Des barres d'incertitude, calculées à partir de l'incertitude relative déduite d'un calcul statistique permettent de représenter l'intervalle de confiance de nos mesures.

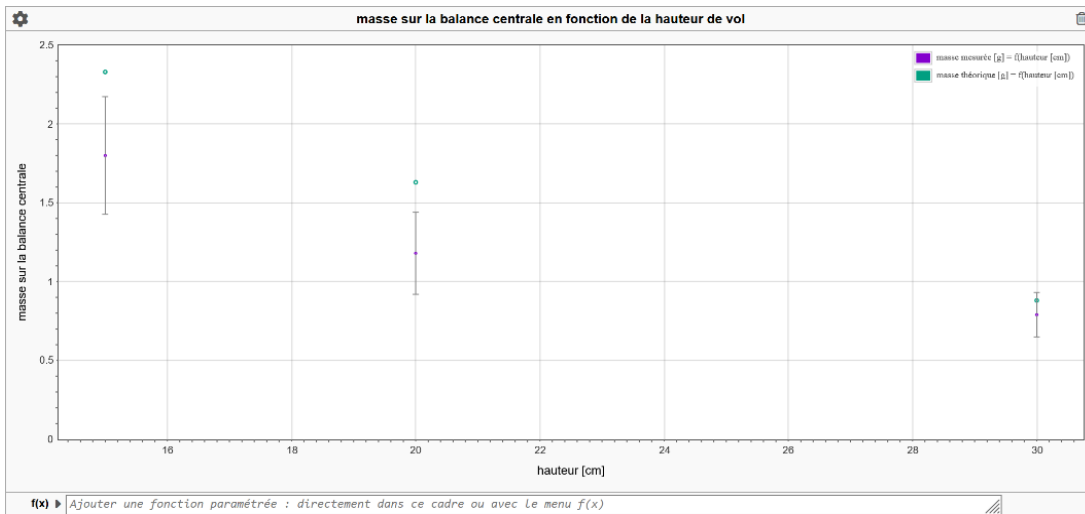


Figure 31 : graphique de la masse mesurée par la balance centrale en fonction de la hauteur de vol de l'avion

Nous pouvons donc observer que malgré le fait que les masses théoriques n'appartiennent pas à l'intervalle de confiance des mesures, l'écart relatif des mesures avec la théorie reste faible, il est de 26% en moyenne. Cet écart entre la masse qui devrait être théoriquement mesurée et celle

réellement mesurée pourrait s'expliquer par les tourbillons qui transmettraient déjà une part du poids de l'avion jusqu'au sol. De plus les valeurs théoriques et les valeurs mesurées semblent suivre la même tendance en fonction de la hauteur de vol. Cela nous permet de partiellement valider ce modèle de l'onde de surpression se déplace selon une demi-sphère.

IX. Conclusion

Au cours de nos expériences et de nos recherches, nous avons pu montrer, à l'aide d'un avion en papier, que le poids d'un avion en vol est retransmis au sol et que nous pouvons, de manière reproductible, en mesurer une partie à l'aide de cellules de pesée. Nous avons observé différents modes de transmission du poids dans le milieu séparant l'avion du sol : l'air. Les mesures obtenues ont pu être comparées à différents modèles théoriques, notamment celui de la propagation d'onde de pression dans l'air. Nous avons conclu que le vol de l'avion provoque à la fois une onde de pression, que nous mesurons en premier sur les balances, et un courant d'air descendant, bordé de tourbillons, que nous mesurons dans un second temps. Il est cependant difficile d'être affirmatif sur la nature réelle de la transmission du poids d'un avion de par les incertitudes sur les résultats obtenus.

Pour reprendre notre questionnement de départ, à propos de la mouche dans le bocal nous pouvons apporter une conclusion. La mouche, qu'elle vole dans le bocal ouvert ou fermé, déplace une masse d'air, qui exerce ensuite sur le fond du bocal. De plus, elle crée probablement une dépression au dessus, ce qui aspire le couvercle dans le cas où le bocal est fermé. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que nous pouvons peser entièrement la mouche dans le bocal fermé et mesurer une partie de la masse de la mouche quand le bocal est ouvert. La part de la masse mesurée décroît avec la hauteur de survol de la mouche.

X. Sens critique

Ce concours a été vraiment instructif. Nous avons appris plein de choses : programmer en C, en Python (même si nous sommes loin de savoir bien coder encore aujourd'hui), apprendre à se poser les bonnes questions, à modéliser, à développer une démarche scientifique afin de valider des modèles. Nous avons mieux compris l'écoulement de l'air autour d'un avion. Nous avons également découvert une partie du monde de la recherche grâce à nos discussions avec les chercheurs contactés. Cela nous a permis de réfléchir à un futur métier possible : celui de chercheur.

Nous pourrions approfondir ce projet de différentes manières. Tout d'abord, nous pourrions utiliser des cellules de pesée de meilleure résolution temporelle (80 Hz plutôt que 10Hz). Cela nous permettrait d'avoir des mesures plus précises et aussi d'avoir des mesures pour plusieurs balances avec un écart de temps plus proche. Nous pourrions aussi fabriquer des bords hermétiques autour des cellules. Cela permettrait qu'aucun courant d'air ne passe et de bloquer l'onde de surpression, ce que nos bords actuellement ne permettent pas. Des cellules de pesée de plus grande étendue de pesée nous permettrait de tester des avions plus lourds, de 20 à 40g, pour vérifier le caractère linéaire des mesures en fonction d'un poids plus élevé, et d'utiliser des plaques de plus grande dimension. Il serait en effet intéressant de tenter de « peser » l'avion en utilisant une grande plaque, non déformable fixée directement à la jauge de contrainte. Enfin, on pourrait tenter de peser un avion de ligne au décollage, comme dans la vidéo de AlphaPhoenix. Notre étude s'approche de différent domaine. Par exemple en aéronautique nous pourrions approfondir nos expériences avant de mieux comprendre les écoulements engendrés par l'avion. Les codes Python et en C que nous avons utilisés pourraient être utilisés à des fin éducatives lors de TP.

Bibliographie

Ce que disent les fluides, Guyon, Hulin, Petit, Belin Pour la Science 2011 (pour l'effet Venturi, la portance, le régime turbulent, les tourbillons)

Terminale Spé PC, Le livre scolaire, 2019 (Ch 14) (pour l'effet Bernoulli)

Science étonnante : *Comment les avions volent-ils ?* (pour le vol théorique de l'avion)

AlphaPhoenix, Brian Hidet : *J'ai pesé un avion... pendant qu'il volait !* (pour l'idée des capteurs)

Pilote Pro : *La portance : Bernoulli VS Newton* (pour le vol théorique de l'avion)

Khan Academy (pour des précisions sur la loi de Bernoulli)

Échanges avec Olivier Michel, enseignant chercheur à l'UGA, agrégé de physique et Cédric D'ham chercheur en sciences expérimentales de l'UGA de Grenoble

XI. Remerciements

Un grand merci à M. Crozatier qui a accepté de nous encadrer et nous a accompagné tout au long de notre projet. Merci également à Thierry Griffon qui nous a prêté tous ses outils : de la perceuse à la machine à fumée ! Merci aussi à M. Martinet qui, grâce à son expérience, nous a aidé à mener notre projet à bien. Merci également au lycée qui nous a soutenus dans ce projet. Un très grand merci à nos familles qui nous ont encouragés pendant ces derniers mois.

Une mention spéciale Axel Champetier qui nous a aidé à souder tard le soir et à dessiner les plans pour le lance-avion.

Merci à Pierre-François Dutot pour ses explications apportées sur la programmation en Python et Arduino.

Merci à Christophe Champetier pour son aide pour l'hypothèse de la répartition du champ de pression gaussien.

Merci à Isabelle Sivignon et Marie - Caroline Croset pour leur aide à notre compréhension de la démarche expérimentale.

Merci à Olivier Michel (professeur à l'UGA, agrégé de physique) d'avoir répondu à nos questions avec une grande rapidité. Merci également à Cédric D'ham (chercheur en sciences expérimentales de l'UGA de Grenoble) pour ses explications sur les incertitudes.

Annexe

Voici donc les résultats des différentes expériences.

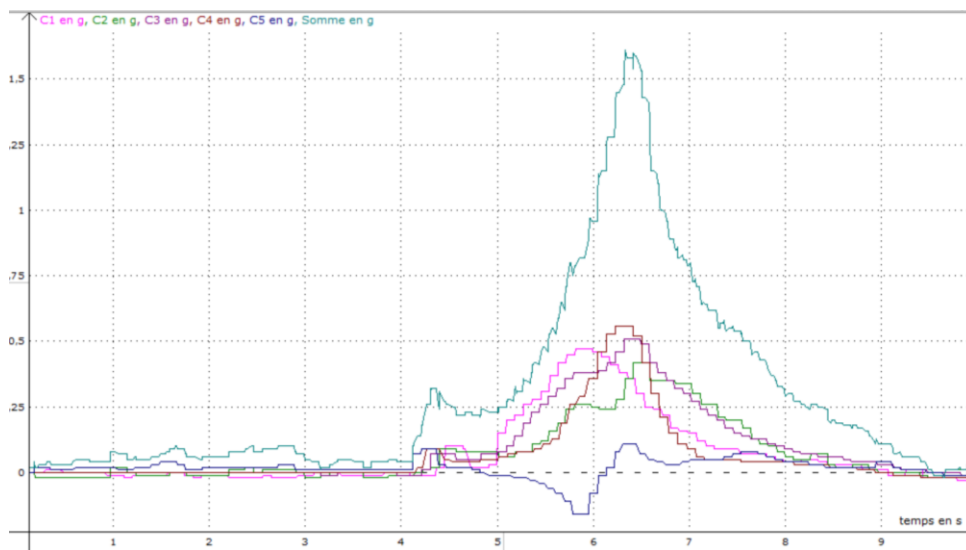
Colonne

Nous avons ensuite lancé l'avion en papier parallèlement aux balances.



Figure 32 : cellules organisées en colonne

On peut voir que plusieurs balances pèsent des poids positifs simultanément. Ceux-ci correspondent à ceux mesurés dans la position « ligne » par le capteur sous l'avion.



On peut voir que les Capteurs C1 C2 C3 C4 pèsent des poids positifs simultanément d'environ 0.5g. Le capteurs C5 mesure au contraire un poids négatif. Cela peut s'expliquer car le capteurs C5 est à plus de 1.5m du lanceur d'avion et l'avion a tendance à dévier de sa trajectoire rectiligne au bout d'une certaine distance. L'avion ne se trouvait donc plus exactement au-dessus

du capteur 5.

Tableau 2x3

Feuille

Nous avons réalisé une première expérience en mettant seulement des feuilles entre les plateaux.

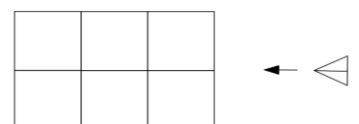
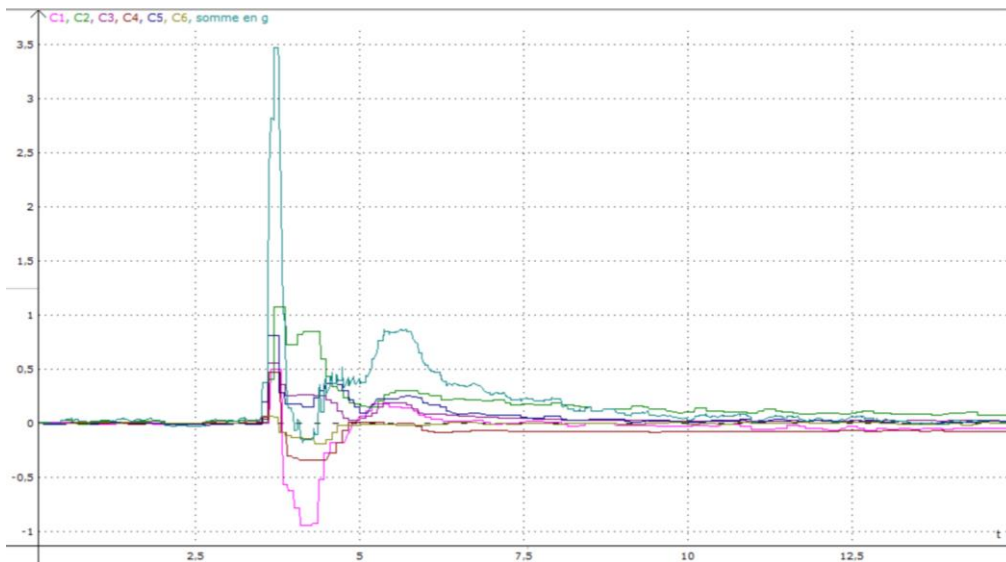


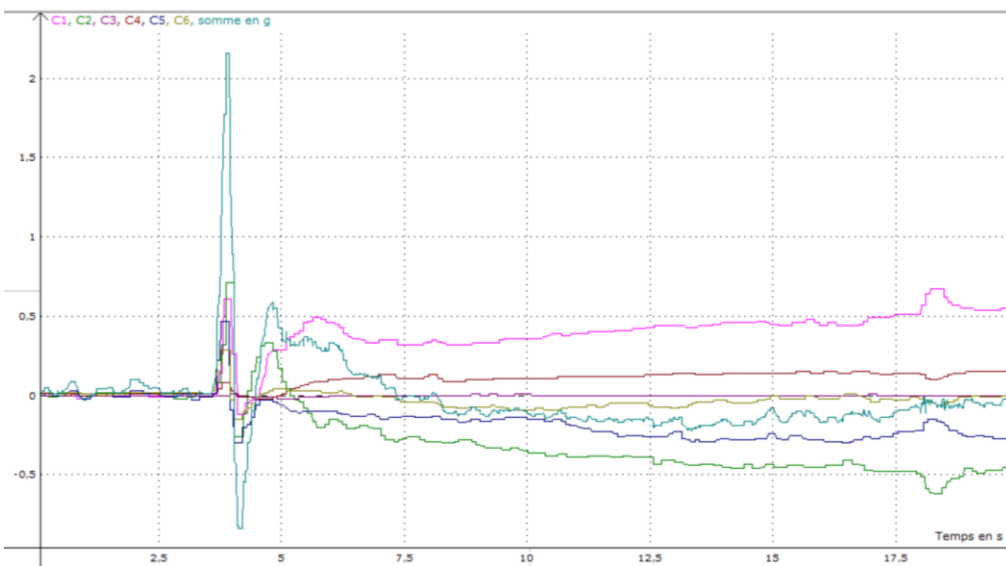
Figure 33 : cellules organisées en tableau 2x3



On peut voir une masse de 3.5g.

Plaque

Nous avons ensuite essayé de mettre un plateau sur les balances pour voir si l'on mesure plus de poids.



Nous avons de nouveau eu des graphiques avec des alternance de valeurs positives puis négatives. Cette alternance sera expliquée dans l'analyse des résultats avec 4 capteurs et une grande plaque (cf. 4 capteurs et une plaque).

4 capteurs et une plaque

Résultats

La plaque de carton plume pèse 507g. Normalement, nous ne pourrions pas mettre plus de 50g par cellule de pesée en plus du montage déjà fixé. Cependant, après nos résultats précédents avec le tableau de 2x3, nous voulions voir si en diminuant le nombre de balances et en en utilisant seulement 4, nous pouvions réduire la bascule.

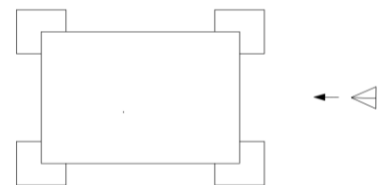


Figure 34 : 4 cellules avec une plaque

Nous pouvons voir qu'il y a toujours une alternance entre valeurs négatives et positives.

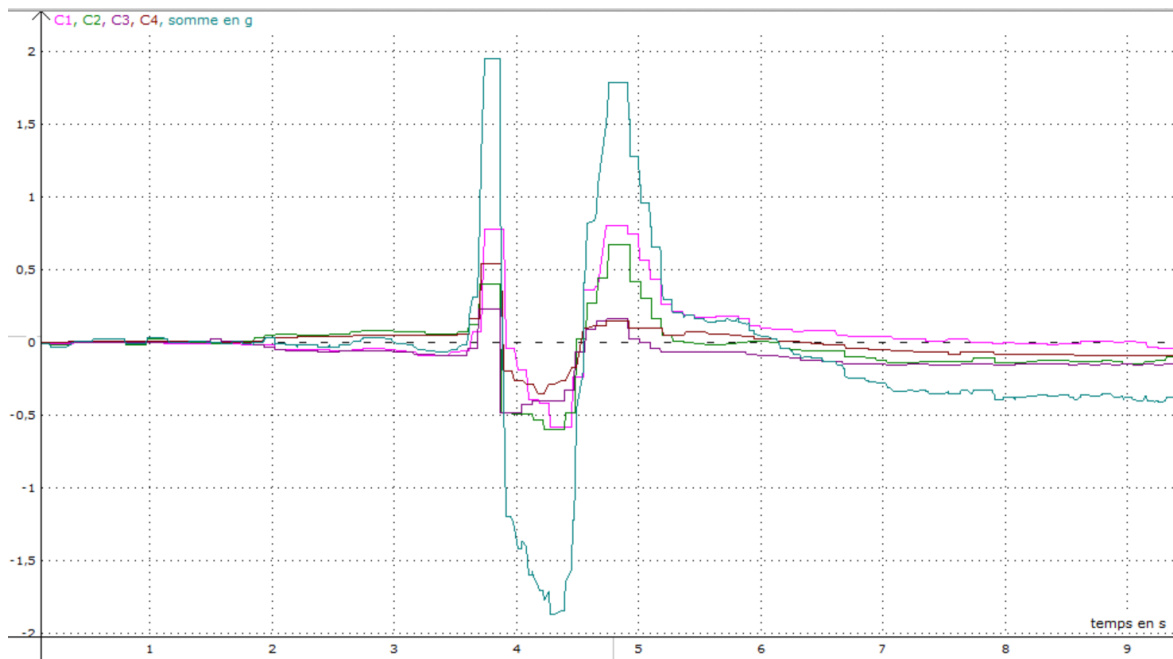


Figure 35 : graphique de mesures avec la grande plaque avec les pics les plus importants : 1,9g en positif puis en négatif

Analyse

Alternance de pic positif et négatif avec la grande plaque : cela peut venir de la bascule de la plaque. En effet, une plaque posée sur 6 capteurs a la possibilité de basculer sur les 2 du milieu, donc la plaque appuierait par intermittence sur les balances et comme les mesures ne sont pas prises en même temps pour toutes les cellules de pesée, la somme des masses mesurées en tout temps ne reflète pas la somme qui devrait être calculée avec une meilleure résolution. Cette explication est cependant peu convaincante car tous les capteurs suivent une même tendance, illustrant mal ce qui vient d'être expliqué.

Une autre explication serait que la plaque oscille et donc qu'elle appuie par intermittence sur les capteurs. On aurait donc des oscillations entre des masses élevées et basses. Cependant nous estimons que dans ce cas il y aurait plus d'alternances, à une fréquence plus élevée. (il y en a trois : deux positives et une négative).

Feuilles

Suite aux premiers résultats, nous avons réalisé que l'air pouvait passer entre les plaques et donc les soulever (ce qui donnerait une pression mesurée plus faible). Nous avons donc décidé de poser des feuilles entre les plaques pour les expériences avec les capteurs disposés en « ligne » et en « colonne ». Cependant nous n'avons observé aucune différence avec et sans feuille. La non modification de nos mesures malgré la présence de feuilles peut être expliquée par la surpression qui traverserait les feuilles (à la manière d'une onde sonore) et donc impacterait nos mesures de la même façon que sans celle-ci.

Bords

Après réflexion, nous avons réalisé que la cause des faibles mesures obtenues pouvait venir de l'onde de surpression ou de l'air, passant sur mais aussi sous le plateau, et qui donc le soulevait. Pour pallier ce problème, nous avons fabriqué des rebords qui entourent la balance afin d'empêcher la cause du poids de passer en dessous des plaques. Cependant encore une fois nos résultats n'ont pas vraiment été modifiés, au contraire les bords ont amené une certaine imprécision. Cette imprécision peut être expliquée : en fonction de comment ils appuient sur les capteurs cela peut modifier les valeurs renvoyées

(par exemple si pendant le vol de l'avion leur position est modifiée, ils peuvent appuyer plus sur les plateaux et donc la valeur renvoyée est plus élevée qu'elle ne devrait l'être si les bords n'avaient pas bougé). Si les résultats n'ont pas été modifiés cela peut être dû au bords qui n'étaient pas très solide et hermétiques : de l'air pouvait quand même passer entre les capteurs.

Bords et feuilles

Enfin nous avons mis les bords et les feuilles afin d'éviter tout courant d'air passant sous les capteurs ou entre les capteurs. Encore une fois nos résultats n'ont pas été modifiés.