

Effet de sol

Adrien
Clément
1^{ere} S

I)	Qu'est-ce que c'est que l'effet de sol ?	1
1)	L'histoire de l'effet de sol	1
2)	Description et explication de l'effet de sol	3
3)	Pourquoi cette expérience ?.....	4
4)	Exploitation des résultats des expériences	4
A)	Le système Expérimental.....	4
B)	Critique du système expérimental	5
C)	Exploitation des résultats	6
II)	Les économies de carburant	6
1)	Les calculs.....	6
A)	Augmentation du coefficient de portance.....	6
B)	Diminution de la traînée	9
2)	En pratique	11
III)	Conclusion	11
1)	Conclusions	11
2)	Bibliographie et remerciements.....	12
3)	Liste des annexes.....	13

I) Qu'est-ce que c'est que l'effet de sol ?

1) L'histoire de l'effet de sol

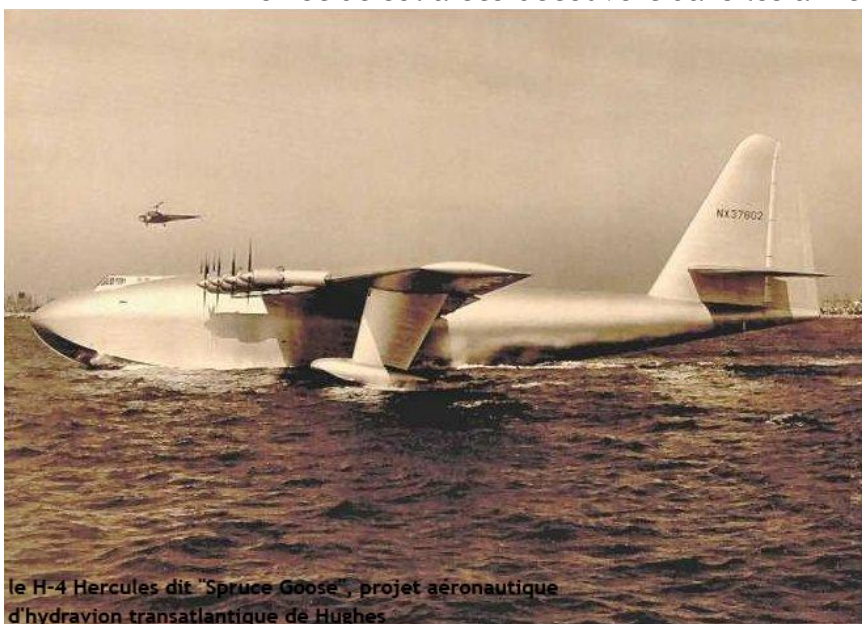
On peut penser que cela est absurde mais le premier utilisateur de l'effet de sol est la nature ! En effet, certains canards marins, tels la Macreuse noir mettent à profit l'effet de sol pour économiser de l'énergie quand ils volent à proximité de l'eau.

L'effet de sol a été découvert dans les années 1920, mais on suppose que le

premier avion des frères Wright, qui s'est révélé incapable de voler au delà de quelques mètres d'altitude, profitait de l'effet de sol. Un autre exemple est l'hydravion construit par le milliardaire américain Howard Hughes, le H4 Hercules, l'un des plus grand avion jamais construit, qui ne fut capable de dépasser 21 mètres d'altitude au dessus de la mer lors de son unique vole en 1947, et on suppose donc que c'est également l'effet de sol qui lui a permis ce court vol.

Durant la guerre, plusieurs aviateurs s'en servirent après la

perte d'un moteur ou de carburant, car ils savaient que cela permettait de



le H-4 Hercules dit "Spruce Goose", projet aéronautique d'hydravion transatlantique de Hughes



substantielles économies de carburant, ou de se maintenir en vole malgré une perte de puissance sur un ou plusieurs moteurs et l'effet de sol leur permis parfois de rentrer sain et sauf malgré une autonomie ou une puissance moteur très réduite !

L'effet de sol fut ensuite exploité par les Russes durant la guerre froide. Il permet en effet un transport de matériels lourds tout en étant plus économique que l'avion (portance égale à vitesse plus faible, comme nous le verront plus bas)



et plus rapide que le bateau (les frottement aérodynamiques étant moins important que les frottement hydrodynamique). Les avions à effet de sol créés par les Russes, couramment dénommés "ékranoplanes" (notez qu'on trouve également le nom WIG, pour « Wing In Ground-effect » utilisé plutôt de l'autre coté de l'atlantique, mais également par fois chez nous) étaient des avions gigantesques. Le plus grand,

terminé par les Russes en 1966, et nommé par les américains Le Monstre de la Caspienne était gigantesque, 100 mètres de long pour 550 tonnes (pour comparaison l'A380 mesure "à peine" 73 mètres de long pour 560 tonnes). Les Russes ont construit cet avion car ils disposaient de grandes étendues d'eau (lacs et océans). En effet, ces avions pour décoller, malgré la présence de l'effet de sol, doivent atteindre une vitesse de quelques centaines de km/h (classiquement, de 200 à 300 km/h), et il leur faut donc des étendues suffisamment grandes et planes pour voler en toute sécurité. Les avions à effet de sol Russes avaient par contre un gros désavantage : il n'étaient pas fait pour voler au delà de quelques mètres de la mer, car au delà de cette altitude, l'effet de sol disparaît brutalement et l'avion "décroche" (il n'y a plus assez de portance pour compenser la masse de l'avion, et l'avion se met réellement à tomber). Sur un avion classique, on remet les gaz lors d'un décrochage afin de reprendre de la vitesse puis de l'altitude. Hors, ce défaut causa la perte de cet avion gigantesque, car il fut un jour déséquilibré par une vague et le pilote peu expérimenté sur ce type d'appareil remis les gaz, l'avion pris de l'altitude, décrocha soudainement et fut engloutis par les flots de la mer rouge sur laquelle il se déplaçait. Cette impossibilité de voler en altitude contraignait donc les Russes à voler uniquement par mer calme. Le règne des ékranoplanes pris fin avec celui de l'Union Soviétique, car l'économie de l'armée Russe, ruinée par les recherches pour montrer sa



supériorité face aux américains ne put bientôt plus assumer de nouvelles recherches sur les écranoplans.

Aujourd'hui, après une longue période de désintérêt pour cette technologie, les avions à effet de sol ont à nouveau la côte. En effet, avec l'épuisement de nos ressources naturelles, et plus encore avec l'augmentation du prix du pétrole qui y est lié, nous avons besoins de développer des moyens de transports rapides mais économiques et surtout écologiques. L'avion à effet de sol peut s'inscrire dans cet objectif, comme nous le verrons dans les parties suivantes. Aujourd'hui des grandes firmes comme Boeing relancent des projets ayant pour but de développer des avions exploitant l'effet de sol, avec par exemple le projet Pélican lancé en 2003, ayant pour objectif la conception d'un avion qui mesurerait 200 mètres de longueur, 150 m d'envergure pour 1400 tonnes. D'autres projets à taille plus humaine sont également en cours de développement de part le monde. Ces avions seraient capables également de combiner les avantages de l'effet de sol sans conserver son principal inconvénient, à savoir son incapacité à voler là où il n'y a plus d'effet de sol et loin d'étendues planes et calmes. L'avion Pélican pourrait en effet voler à plus de 6 000 mètres afin de rejoindre des contrées plus calmes en cas de mer trop grosse pour voler en toute sécurité, ou encore dans l'objectif de rejoindre des aérodromes plus enfoncés dans les terres. Bien sur, ces vols en altitude poseraient par contre le problème de consommer infiniment plus de carburant du fait de l'absence d'effet de sol (et ce phénomène serait d'autant plus accentué que l'avion ne serait pas « optimisé » pour ce type de vol). C'est pour cette raison que ce projet du Pélican met un peu de temps à démarrer, car il est important pour Boeing de bien étudier le marché potentiel pour ce type de transport avant-gardiste.

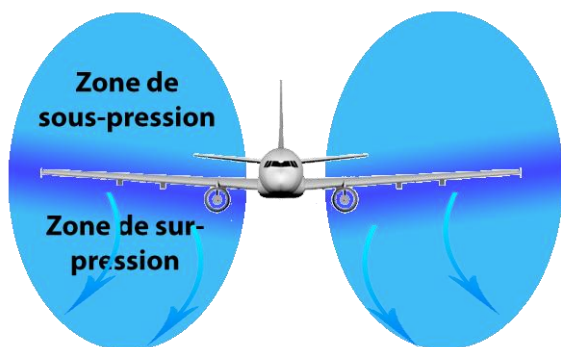
D'autres entreprises conçoivent et vendent également des avions à effet de sol à des particuliers... et certains particuliers se sont également lancés seuls dans l'aventure de la construction de ce type d'avion !

2) Description et explication de l'effet de sol

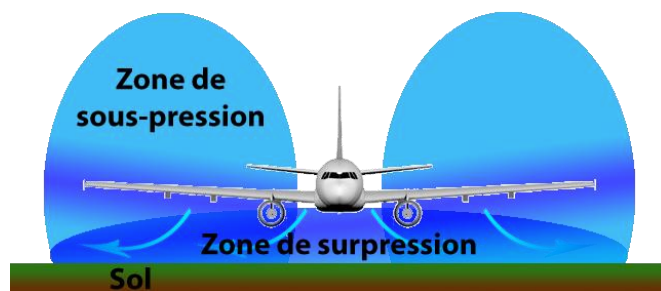
L'effet de sol est un phénomène qui s'observe sur la plupart des avions plus ou moins longtemps durant les phases d'atterrissage notamment. Il se traduit au pilote par le refus de l'avion de se poser, l'avion ayant tendance à refuser de descendre arrivé à quelques mètres du sol, alors que les commandes sont toujours en position "descente" et que l'avion conserve une assiette en piquée. Au contraire, l'effet de sol favorise le décollage car il diminue la vitesse à laquelle suffisamment de portance est créée pour soulever l'avion. L'effet de sol est d'autant plus ressenti que l'aile est proche du sol et sa surface importante.

Cela se produit en fait dès que l'aile se situe à une altitude égale à la moitié de la corde de profil de l'aile (on en déduit donc que sur certains avions, notamment ceux à ailes hautes, ce phénomène n'est pas perceptible). L'air est en fait pris entre l'aile et la piste d'atterrissage, ce qui crée un goulot d'étranglement et une surpression entre les 2 surfaces. L'effet de sol peut donc s'apparenter au coussin d'air d'un aéroglisseur à la différence que sur l'avion, l'air est comprimé entre l'aile et le sol au lieu d'être pris entre la jupe et le sol.





Avec effet de sol



Sans effet de sol

Avec ces illustrations, on constate que grâce à l'effet de sol la zone de surpression est beaucoup plus restreinte, ce qui permet une plus grande augmentation de la valeur de la surpression présente en vol sur l'intrados. D'autre part, cette zone de surpression s'étend sous tout l'avion et non plus seulement sous les ailes.

3) Pourquoi cette expérience ?

Le but de l'expérience est de trouver quel type de profils parmi ceux que nous avons sélectionné est le meilleur candidat pour générer de l'effet de sol. En effet ce phénomène est très difficilement prévisible et il n'existe pas de calculs pouvant donner de résultats fiables. De plus nous avons à notre disposition une mini soufflerie qui nous a facilité beaucoup la tâche.

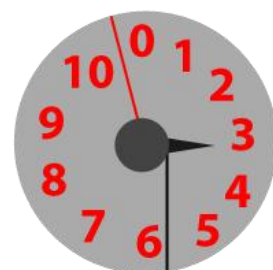
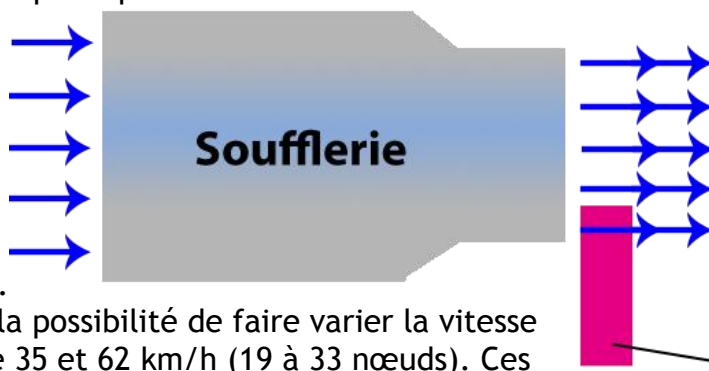
4) Exploitation des résultats des expériences

A) Le système Expérimental

Notre système expérimental est assez simple. Nous avons fixé nos différents profils à un dynamomètre gradué de 0 à 10 N. Le profil était fixé grâce à des fils face à la sortie de la veine de la soufflerie. Un anémomètre placé juste à la sortie de la veine nous permettait de relever la vitesse-air instantanée. Ensuite, nous relevions le poids indiqué par le dynamomètre à différentes vitesses, et avec et sans effet de sol. Le sol étant simulé par un planché mobile que nous amenions proximité de l'aile. Lors de nos expériences, nous avons définis une atmosphère standard, qui était, le jour de l'expérience de 18° C avec une pression atmosphérique de 1028 hPa. Les

profils ont tous été testés avec une incidence de 4° par rapport à l'horizontale.

Nous avons la possibilité de faire varier la vitesse de l'air entre 35 et 62 km/h (19 à 33 nœuds). Ces



à



Anémomètre



vitesses constituent donc notre domaine d'étude.

Chaque « ailes » était constituée de deux profils en bois entoilés grâce à du papier cartonné.

Pour nos tests, nous avons choisis un ensemble de 4 profils que nous pensons représentatifs des profils existants dans le sens où nous avons testé un profil des 4 principaux types, à savoir (consulter Annexe 1.4.1 pour visualiser les différences fondamentales entre ces profils) :

- un profil dit « plat » (CLARK Y)
- un profil dit « biconvexe asymétrique » (NACA 2415)
- un profil dit « symétrique » (EPPLER 168)
- un profil dit « creux » (Selig 4083)

Ces profils ne sont pas inventés. Ils sont ou ont été utilisés sur certains avions.

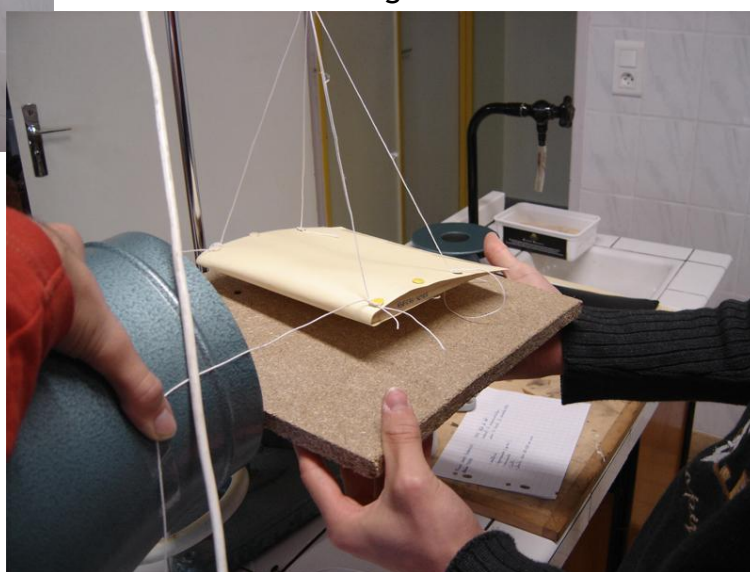
B) Critique du système expérimental

Nous avons opté pour des expérimentations avec une méthode dite du "plancher fixe", par opposition avec les méthodes dites du "tapis roulant" ou de "l'image".



Ce choix est dû à nos moyens limités pour réaliser nos expériences. La méthode du plancher fixe ne permet de faire que des approximations car comme le plancher est fixe, l'air en mouvement crée des tourbillons proches du sol qui peuvent perturber l'effet de sol (à contrario de la méthode dite du tapis roulant, qui grâce à la présence d'un sol qui "avance" à la même vitesse que l'air limite les tourbillons gênants).

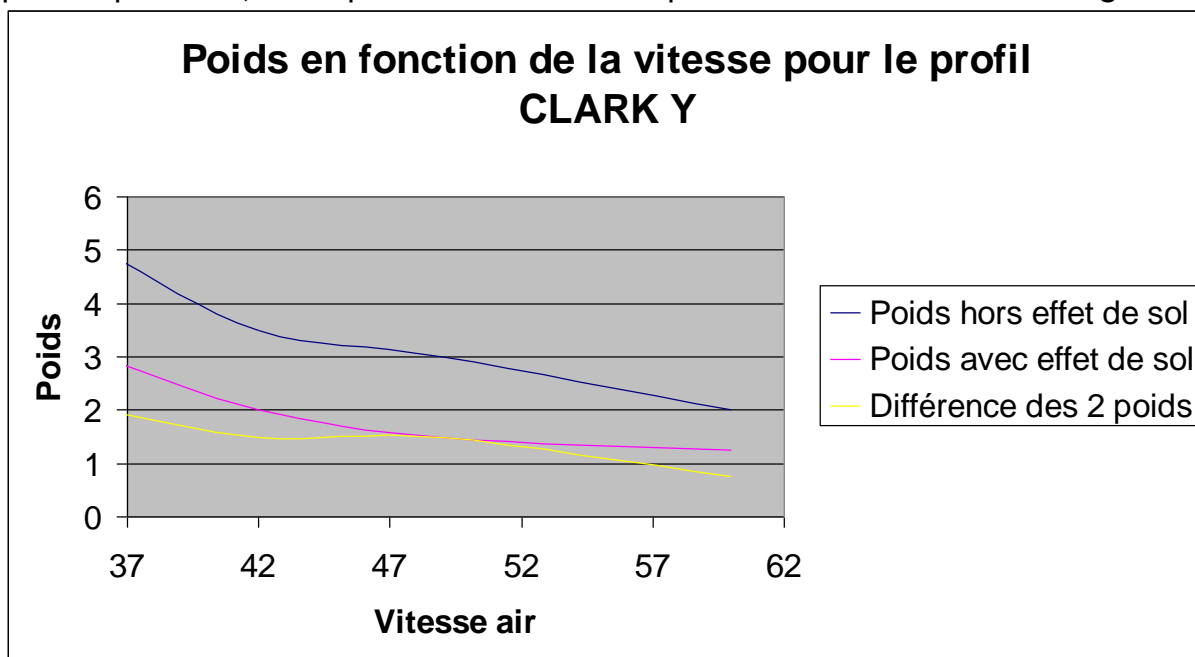
Il y a également d'autres éléments perturbateurs, comme les fils de soutien, susceptibles aussi de créer des turbulences potentiellement destructrices de portance. De plus les profils n'étaient pas complètement dans la sortie de la veine de la soufflerie ce qui faussait un peu les résultats mais de toute façon si les résultats n'étaient pas tout à fait juste ça ne changeait pas considérablement notre conclusion.



Nous avons aussi eu des problèmes avec certains profils qui devenaient instables au delà d'une certaine vitesse. Cela était dû à notre système de fixation qui laissait les profils très libres. De plus, les autres systèmes de fixation qui nous auraient permis de rendre les profils plus stables ne nous auraient pas permis de modifier facilement l'angle d'incidence de nos ailes et donc nous aurais compliqué énormément les réglages. Sans compter que les fils de maintien auraient traversés l'aile, ce qui aurais non seulement augmenté les tourbillons autour de ceux-ci mais en plus aurait réduit la surface que nous aurions pus présenter en effet de sol.

C) Exploitation des résultats

D'après nos expériences, le profil Clark Y serait le meilleur candidat parmi les profils testés pour produire un effet de sol. Ce profils avec effet de sol, nous a fait constaté que nous pouvions diminuer la vitesse de 50% pour obtenir une portance équivalente à celle obtenue sans effet de sol (Pour plus de détails, veuillez consulter l'Annexe 1.4.2 : Analyse des résultats et 1.4.2bis : Fiche récapitulative des résultats joint à ce document). Hors, on sais que si on génère plus de portance, c'est qu'un élément dans l'équation de sustentation a changé.



Graphique 1 : Variation de la masse de l'aile en fonction de la vitesse air en km.h⁻¹

II) Les économies de carburant

Dans cette partie, nous allons aborder la seconde partie de notre problématique, à savoir la partie Economie de carburant. Nous avons décidé d'y répondre sans expérimentation, en vous présentant uniquement des résultats théoriques obtenus par calculs. Cette partie faisant appel à des notions d'aérodynamique que nous connaissions avant ces TPE, nous avons fait une annexe afin que vous puissiez vous y référer en cas de besoin (a savoir Annexe 1.0.0 : Notions de base d'aérodynamique).

1) Les calculs

A) Augmentation du coefficient de portance

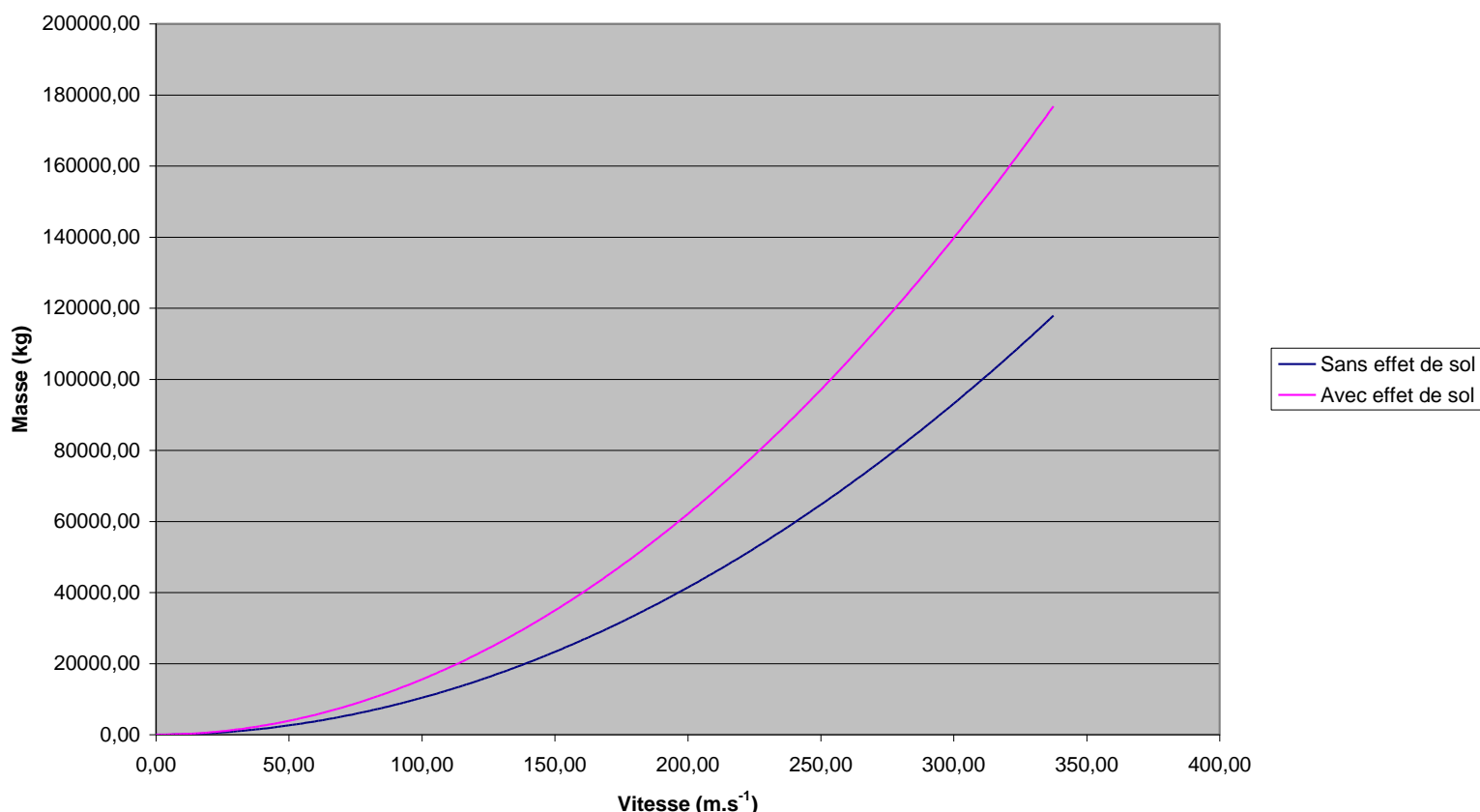


Nous avons essayé de déterminer les économies de carburant possibles grâce à l'effet de sol. Pour cela, nous sommes partis du fait que grâce à l'effet de sol, nous obtenions une portance égale à celle obtenue hors effet de sol à seulement 50% de la vitesse sans effet de sol.

C'est donc que si l'on transporte une masse x à 200 km/h, avec l'effet de sol, on pourra transporter une masse de $2x$ sans augmenter la vitesse, on encore de diviser par deux la vitesse nécessaire pour soulever cette même masse. Dans cette partie, nous allons donc essayer de chiffrer les économies de carburant possibles.

On sait que l'équation de sustentation est donnée par $mg = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z$ hors pendant nos essais, nous n'avons modifiés ni la surface de l'aile, ni la densité de l'air, ni la vitesse, on en déduit donc que l'effet de sol modifie le C_z , coefficient de portance, en l'augmentant. On en déduit que pour soulever une même masse, comme le C_z a augmenté, une vitesse moindre est nécessaire. Dans nos expériences, nous avons constaté une augmentation de la sustentation de l'ordre de 1,5. Le profil le plus efficace en effet de sol, le Clark Y a un C_z à 4° d'environ 0,7. On a donc multiplié ce C_z par 1,5, le nouveau C_z avec effet de sol est donc de 1,05.

Vitesse nécessaire en fonction de la masse à décoller



Graphique 2 : Vitesse minimum de décollage en fonction de la masse de l'aéronef (pour ce graphique, nous avons fixé la masse et les paramètres C_z , ρ et la surface de l'aile).

Grâce à ces courbes, nous pouvons constater que pour soulever une même masse, nous pouvons diviser la vitesse par environ 1,25 (en fait, on la divise



L'intégralité des documents présents sur ce site (sauf mentions contraires) sont mis à disposition sous un [contrat Creative Commons](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Vous pouvez retrouver le document original à l'adresse suivante : <http://dreamofflying.wordpress.com>
Vous pouvez contacter le créateur de ce document via le site indiqué.

exactement par car dans le calcul de la portance, on a la vitesse au carré. Dans le calcul, le paramètre C_z intervient donc en racine par rapport à la vitesse)

L'augmentation du C_z dans ce cas n'est pas associée à l'augmentation de traînée, le C_x , qui reste donc stable, que l'on soit avec ou sans effet de sol (mais en fait ce paramètre varie, comme nous le verrons plus bas).

On en déduit donc que pour soulever une même masse, avec de l'effet de sol il faudra une vitesse moindre que sans effet de sol. Voyons maintenant comment cela va permettre des économies de carburant.

La consommation d'un aéronef, voir plus généralement d'un mobile quelconque, est relative à l'énergie nécessaire pour vaincre les forces de frottements entre le mobile en question et les différents fluides et solides avec lequel il est en contact. Dans le cas d'un avion, celui-ci est uniquement en contact avec l'air une fois décollé. La seule force qu'il sera nécessaire de vaincre pour avancer est donc une force opposée au mouvement et due aux frottements de l'appareil avec l'air : la traînée.

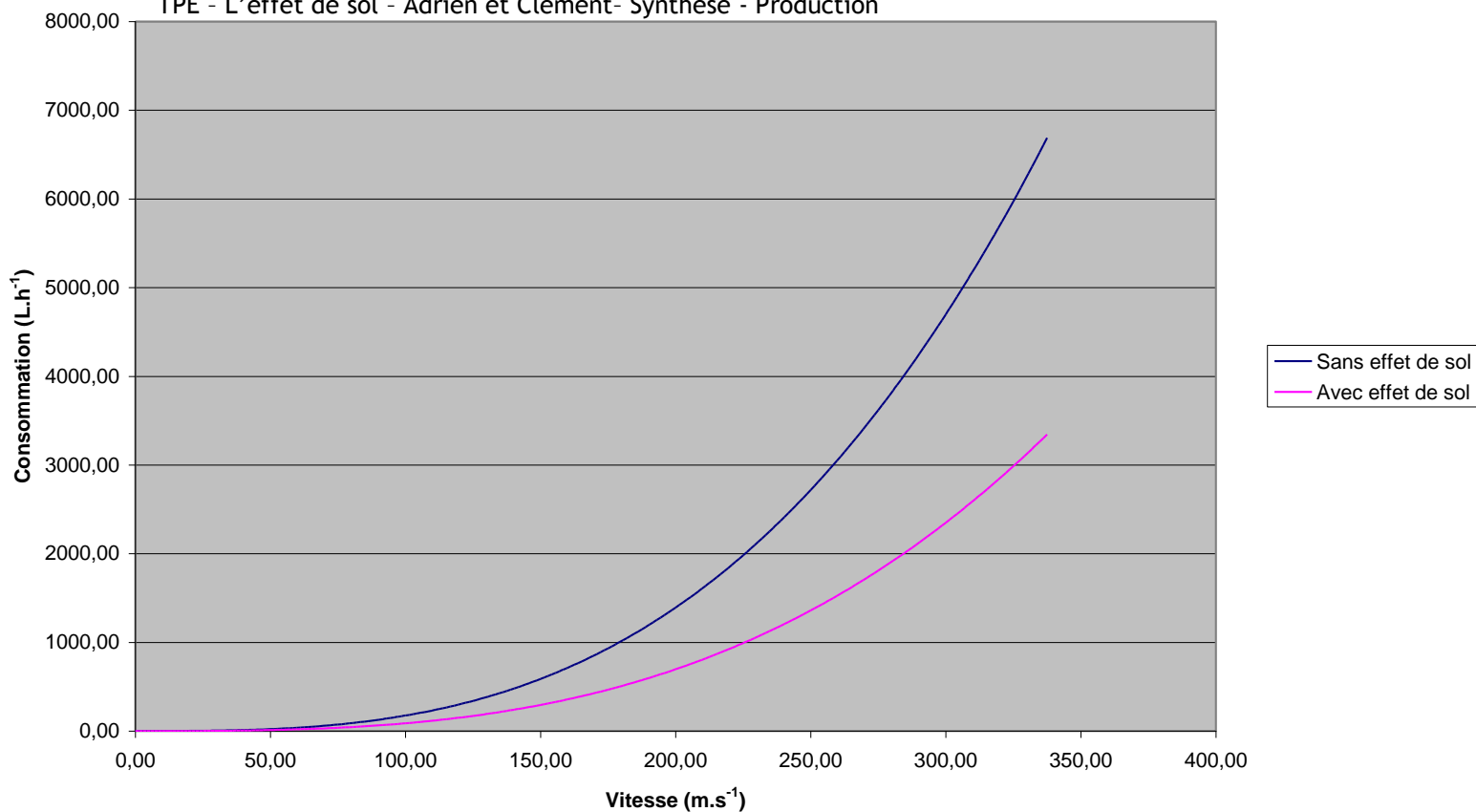
On sait que cette dernière est donnée par l'équation $T = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x$. Cette valeur, en N donne juste la valeur de la résistance à l'avancement. Pour connaître l'énergie nécessaire pour vaincre cette traînée, il faut la multiplier par la vitesse. On a donc la consommation qui est égale à : $P = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_x$. Comme toute puissance, ce paramètre est exprimé en Watts (W).

On considérera dans ce TPE que la puissance délivrée par un moteur, qu'il soit à explosion ou à réaction, est directement proportionnelle à sa consommation de carburant. On en déduit donc le graphique suivant :



Consommation en fonction de la vitesse

TPE - L'effet de sol - Adrien et Clément- Synthèse - Production



Graphique 3 : Consommation de carburant en fonction de la vitesse

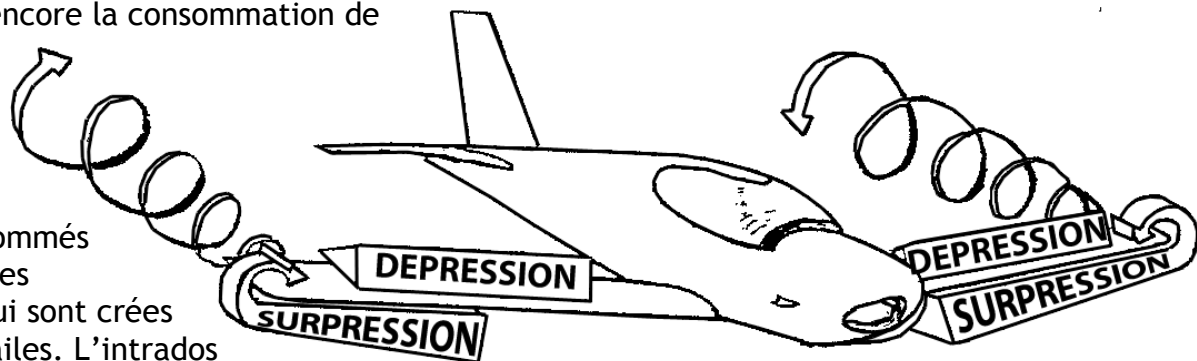
B) Diminution de la traînée

Nous n'avons pas pu démontrer expérimentalement ce fait, mais l'effet de sol est accompagné d'une réduction de la traînée (tourbillons marginaux), qui réduit donc encore la consommation de carburant

En effet, les tourbillons marginaux, également nommés vortex sont des tourbillons qui sont créés au bout des ailes. L'intrados

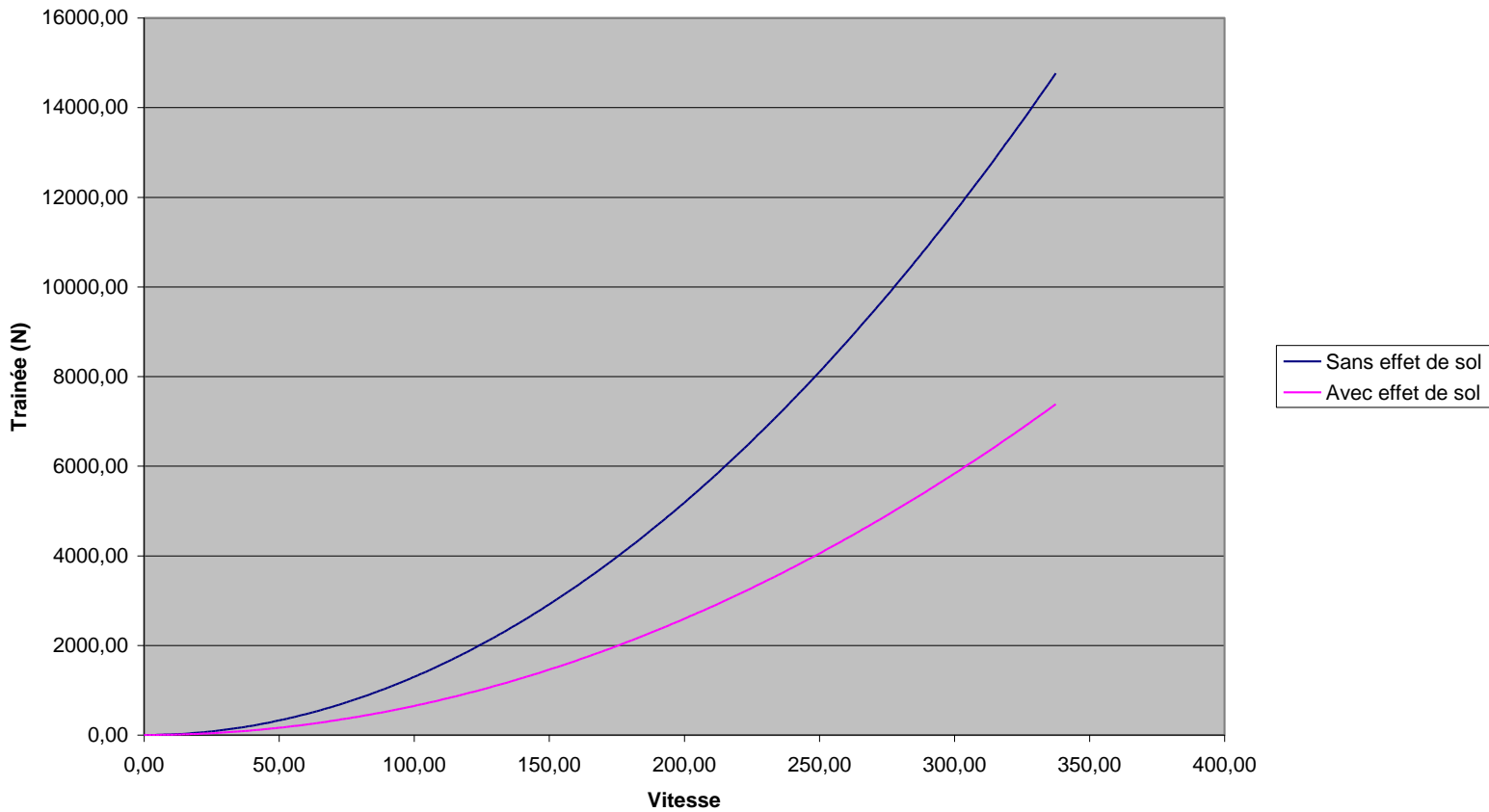
est le siège d'une surpression tandis que l'extrados est le siège d'une dépression, hors, l'air en bout d'aile a tendance à être aspiré de l'intrados vers l'extrados (car l'air va toujours des zones de hautes pressions vers celles de basses pressions), ce qui crée les vortex, qui sont des tourbillons qui sont situés en bout d'aile et qui tournent sur eux mêmes. Hors, à la proximité du sol, ces tourbillons n'ont pas la place de se créer, ce qui réduit la traînée et réduit encore la consommation. Hors, ces tourbillons sont responsables de 50% de la traînée totale d'une aile !

Nous avons donc cherché à calculer les économies de carburant réalisés sans ces tourbillons. Nous avons mené deux séries de calculs, à savoir une avec une traînée deux fois supérieure celle à la seconde série (C_x de 0,108 pour la première et 0,0054 pour la seconde).



Nous en avons déduit ce graphique :

Trainée en fonction de la vitesse

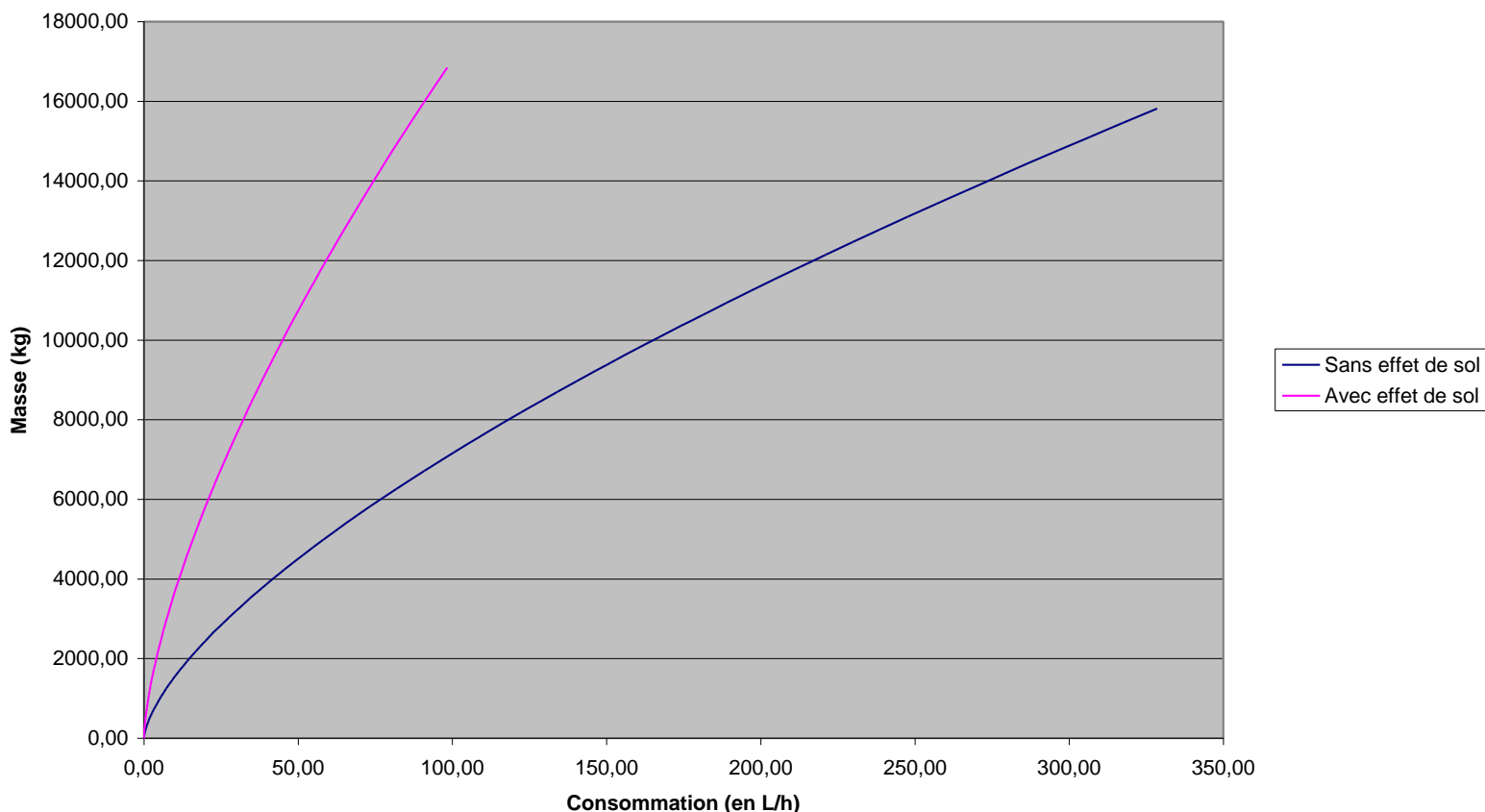


Graphique 4 : Evolution de la force de traînée en fonction de la vitesse

Les effets des deux précédents points s'ajoutent, on peut donc en déduire ce graphique :



Consommation en fonction de la masse a décoller



Graphique 5 : Consommation au décollage d'un aéronef en fonction de sa masse, avec et sans effet de sol

2) En pratique

Grâce à ces calculs, nous pouvons constater que l'effet de sol réduit considérablement la consommation de carburant. Selon nos calculs, l'effet de sol permet de réduire la consommation dans un facteur d'environ 2,5. Dans la pratique, si un avion consomme 2700 L/h de carburant hors effet de sol (consommation horaire d'un A320), alors le même avion exploitant l'effet de sol ne consommerait plus que 1100 L/h environ pour soulever la même masse.

III) Conclusion

1) Conclusions

L'effet de sol est donc une technologie qui est capable de faire diminuer énormément la quantité de carburant consommée par un avion. De plus il permet de transporter de lourdes charges tout en réduisant la pollution. Aussi, l'effet de sol permettrait de conjuguer les avantages du bateau tout en se défaisant de ses inconvénients, à savoir, permettre le transport de lourdes charges à grande vitesse, tout en restant beaucoup plus abordable que le transport par avion.



Selon nos calculs, on peut donc emporter une charge double à une même vitesse tout en consommant 2 à 3 fois moins de carburant grâce à l'effet de sol.

Un des freins au développement de cette technologie est selon nous le fait que ces appareils ne sont exploitables que sur des surfaces très planes tels les océans et à faible altitude (le projet Pélican de Boeing parle d'exploiter ces avions à une altitude de 20 à 50 pieds, soit environ 7 à 20 m), mais que leur vitesse d'exploitation les rends incompatible avec la navigation maritime, parfois plusieurs dizaines de fois plus lente. Si cette technologie était amenée à se développer, nous devrions donc probablement mettre en place un système de couloirs aérien de basse altitude réservés aux "écranoplans". De plus l'avion à effet de sol est beaucoup plus sensible aux conditions climatiques que n'importe quel autre moyen de transport. D'autre part, si la plupart des grands ports seraient à même d'accueillir des appareils gigantesque de type Pélican, il n'en est pas de même pour les aéroports, ou la présence d'un A380, appareil plus de deux fois plus petit se révèle déjà parfois problématique.

2) Bibliographie et remerciements

Nous avons découvert le phénomène d'effet de sol dans le **Science & Vie Junior** n° 161 de février 2003: « **L'avion Géant qui vole au ras des flots** »

Nous remercions l'ONERA (...) pour sa grande aide tout au long de ces TPE. Cet organisme a été notre principale source d'information grâce aux nombreux documents publiés sur son site Web ou gracieusement envoyés par la Poste. Ils nous ont notamment fait parvenir les documents suivants :

Etude en soufflerie de l'effet de sol de Alexandre de SIEVERS 1965

Détermination de l'effet de sol sur les caractéristiques de l'avion A 320 1988

La plupart de ces documents sont certes anciens, mais les connaissances sur l'effet de sol ayant peu évolués dans les dernières décennies, cela ne représente pas un gros désavantage !

Initiation a l'aéronautique 4° édition, Thierry du Puy de Goynne, Yves Plays, Patrick Lepourry, Jacques Besse, édition Cépadués, 2005, ISBN 2.85428.640.4

Nous avons également tirés librement des informations des sites Web suivants :

<http://www.mit.jyu.fi/mweber/consommation/> : Informations sur la consommation en fonction de la vitesse

http://foxxaero.homestead.com/indrad_043.html : Principale source d'informations sur le projet Pélican

<http://membres.lycos.fr/dracken/Ekranoplan/Ekranoplan.html> : Le site de référence sur les écranoplans

<http://www.se-technology.com/wig> : Autre site en anglais mais très intéressant car il a quasiment tout ce qui concerne l'effet de sol.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89kranoplane> : La page dédiée aux écranoplans sur Wikipédia



Nous remercions **Monsieur LEMARCHAND**, professeur de mathématiques au Lycée Xavier Marmier pour son aide et les précieux conseils qu'il a pu nous donner.

Nous remercions également les membres de la Liste de Diffusion sur Internet « **PilotList** » pour l'aide qu'ils nous ont fournie notamment pour la confirmation des différentes informations que nous avons trouvées.

3) Liste des annexes

Annexe 1.0.0 : Notions de base d'aérodynamique, ce document permet de mieux comprendre comment vole un avion

Annexe 1.4.1 : Les différents type de profils

Annexe 1.4.2 : Analyse des résultats expérimentaux

Annexe 1.4.2bis : Résultats obtenus expérimentalement

Vous trouverez également joint à ce dossier les 2 synthèses personnelles et un CD contenant des photos de nos expérimentations et les principaux documents qui nous ont servi dans la réalisation de ce TPE, à savoir :

- Tous les documents de ce dossier (synthèse et annexes) au format PDF
- Un diaporama PowerPoint : L'effet de sol, qui présente synthétiquement le phénomène d'effet de sol et nos conclusions. Ce document servira à présenter le TPE à l'oral.

- un fichiers Excel : Calculs, qui présente tous nos calculs et courbes.

- un second fichier Excel : Profils, présentant toutes les données expérimentales, les paramètres connus des profils testés et les courbes que nous en avons tirées

