

AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL

EFFET DE SOL



SOMMAIRE

1	RAPPEL : DEPLACEMENT DE L'AILE	3
1.1	CIRCULATION DE L'AIR	3
1.2	PROFILS DE VITESSE ET DE PRESSION.....	4
1.3	COEFFICIENT DE PRESSION	5
1.4	CONSEQUENCE DE LA CIRCULATION.....	6
1.5	ILLUSTRATIONS	7
2	DEPLACEMENT DE L'AILE EN PROXIMITE DE SOL	8
2.1	PHENOMENES	8
2.2	SIMULATION DE PROFIL D'AILE EN EFFET DE SOL / MODELES.....	10
2.3	IMPACT DE L'EFFET DE SOL	12
Annexe 1 Profils NACA 2412 et 4412.....		14
Annexe 2 Coefficient de pression.....		15

Références

- *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics by Barnes W. McCormick – 1994*
- *Numerical Investigation of Airfoil in Ground Proximity – Journal of Theoretical and Applied Mechanics – 2007*
- *Airfoil Aerodynamics in Ground Effect for Wide Range of Angles of Attack - AIAA Journal - 2015*

1 RAPPEL : DEPLACEMENT DE L'AILE

1.1 Circulation de l'air

Voir figure 1.

Lorsque l'aile se déplace dans une masse d'air avec une incidence, on constate les phénomènes suivants :

- Les particules d'air situées **sous l'aile** (en proximité immédiate de l'intrados), sont déplacées dans la même direction que celle-ci, avec une vitesse qui dépend de leur distance par rapport au bord d'attaque.

On constate même qu'à un point (Aa) situé légèrement sous le bord d'attaque, la particule d'air au passage de l'aile se déplace instantanément avec la même vitesse.

Cet entraînement de l'air par l'aile en déplacement est lié à la viscosité de ce milieu. Certains auteurs parlent de condition de « non glissement ». La mise en vitesse n'affecte pas uniquement les particules situées en proximité immédiate de la surface, mais également celles situées plus loin de l'intrados. L'influence cependant diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'aile

- **A l'avant de l'aile**, l'air est soulevé (c'est le *flux montant*) et les particules contournent le bord d'attaque pour être évacuées du côté de l'extrados vers le bord de fuite. Les particules d'air se déplacent donc dans une direction opposée à celle du déplacement de l'aile. Leur vitesse est maximum au niveau du bord d'attaque et décroît au fur et à mesure qu'elles se déplacent vers le bord de fuite.

Le fait que la vitesse des particules est maximum au bord d'attaque est dû au fait que l'air doit contourner cette partie de l'aile, la section apparente de passage étant diminuée. La *loi de conservation du débit massique* dans l'écoulement fait que la vitesse augmente quand la section de passage se restreint.

En se déplaçant, l'air évacue donc de l'air par le dessus de celle-ci. Ce dernier est rejeté vers l'arrière. C'est le *flux descendant*.

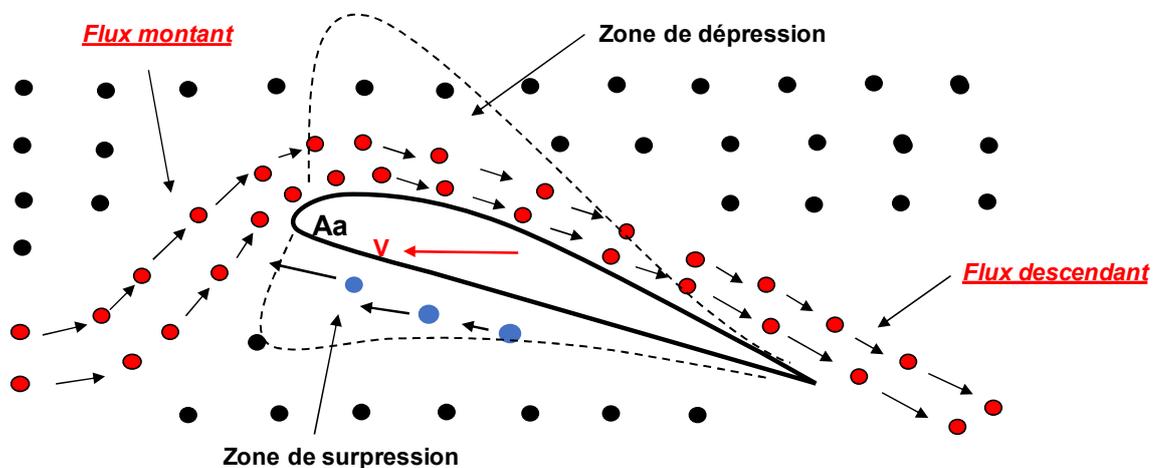


Figure 1

Comme pour l'intrados, de l'air circule non pas seulement en proximité immédiate de la surface, mais également loin de l'extrados. La vitesse des particules cependant diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'aile.

Ce mouvement des particules est assimilable à une **circulation**, ici dans le sens horaire, des particules d'air autour de l'aile. Ceci est schématisé par la figure 2

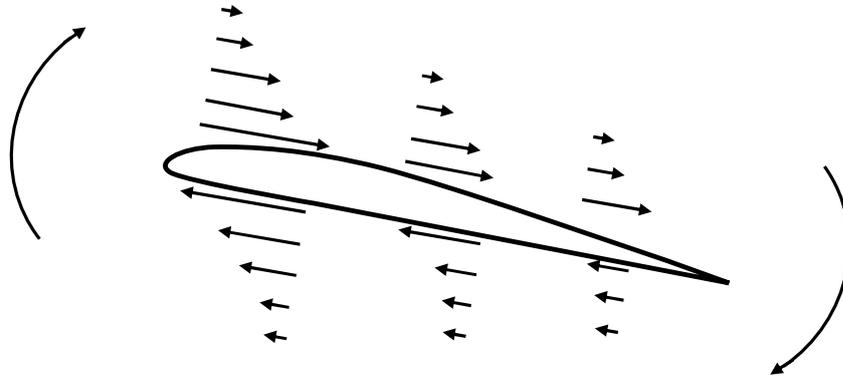


Figure 2

Il faut être conscient que ce n'est pas la même particule d'air qui tourne autour de l'aile, mais un transfert d'énergie d'une particule à une autre qui génère ce mouvement d'ensemble.

L'intensité de la circulation augmente avec l'incidence et la vitesse de déplacement de l'aile.

1.2 Profils de vitesse et de pression

Les figures 3 et 4 présentent les profils de vitesse et de pression, simulés en soufflerie (aile fixe au contact de l'air en mouvement) pour un profil NACA 2412 (ce profil équipe, entre autres, les Cessna 150/172). Les caractéristiques de ce profil sont présentées en annexe 1.

Les conditions sont les suivantes :

Incidence = 4° V_0 (vitesse de l'air loin de l'aile) = 100 kts,
 P_0 (pression de l'air loin de l'aile) = 1013 hPa $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

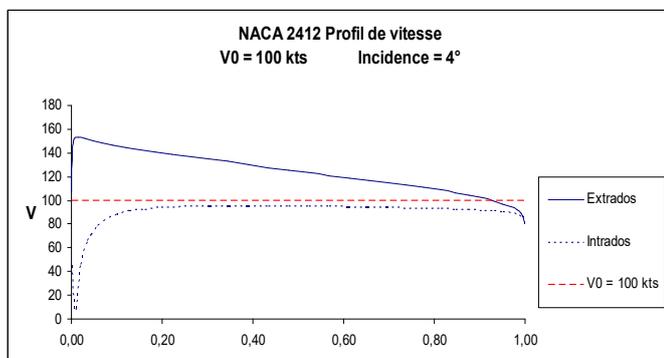


Figure 3

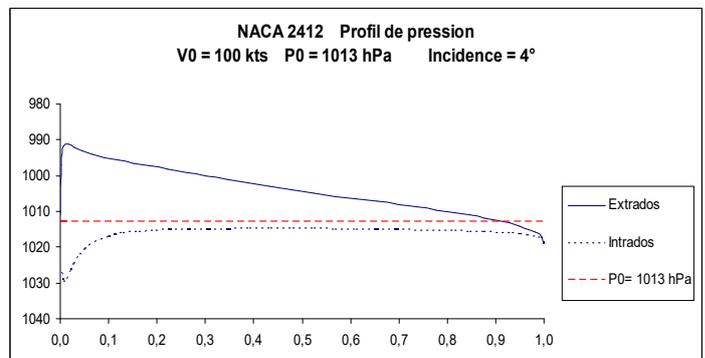


Figure 4

On constate que les zones à forte vitesse montrent des pressions faibles, et à l'inverse, les faibles vitesses sont associées à des pressions élevées. Ceci est une conséquence de la *loi de conservation de l'énergie*, que l'on peut, sous certaines hypothèses, représenter par sa version simplifiée, plus connue sous *loi (ou théorème ou principe) de Bernoulli*. Voir figure 5.

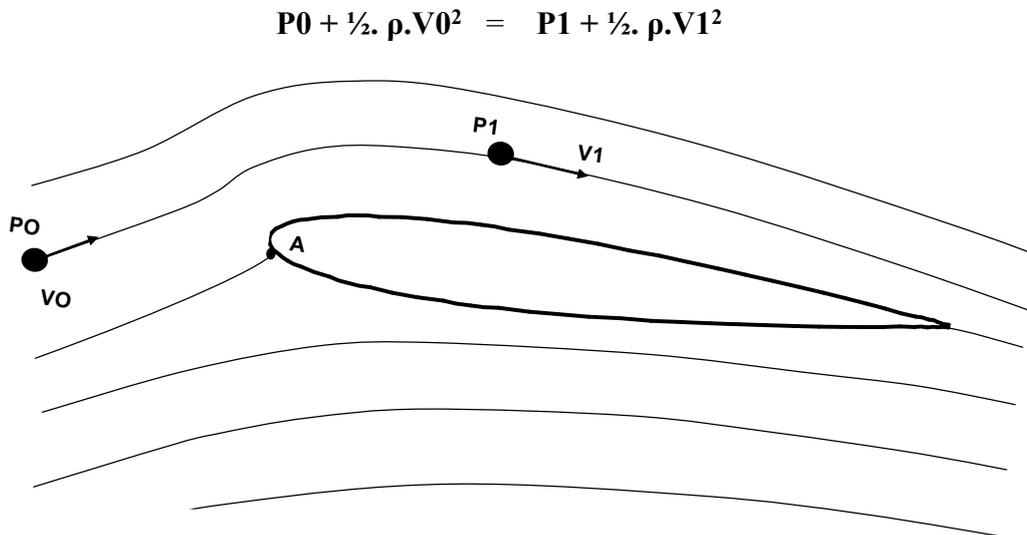


Figure 5

Précautions : cette relation entre pression et vitesse ne peut être appliquée qu'avec les réserves suivantes :

- Cela concerne une même particule circulant sur une *même ligne de courant*. Elle n'est pas valable pour des particules différentes situées sur des lignes de courants différentes.
- La viscosité est négligeable (pas de perte d'énergie par frottement).
- La variation d'énergie potentielle est négligeable, ce qui suppose que l'écoulement se fait à niveau constant et la variation de masse volumique est négligeable. Cette dernière approximation est valable dans le cas des vitesses faibles rencontrées en aviation légère, et malgré le fait que l'air est un fluide compressible. En d'autres termes, les changements de pressions sont faibles au regard de la pression totale.

1.3 Coefficient de pression

Il est usuel de caractériser un profil d'aile à partir du *coefficient de pression* (C_p). Ce coefficient, avec le coefficient de frottement (C_f) est relatif à un point particulier de l'aile.

L'annexe 2 précise la notion de coefficient de pression C_p .

La figure 6 présente le coefficient de pression pour le profil NACA 2412 à une incidence de 4° . La longueur de la corde de profil est ici normalisée à 1.

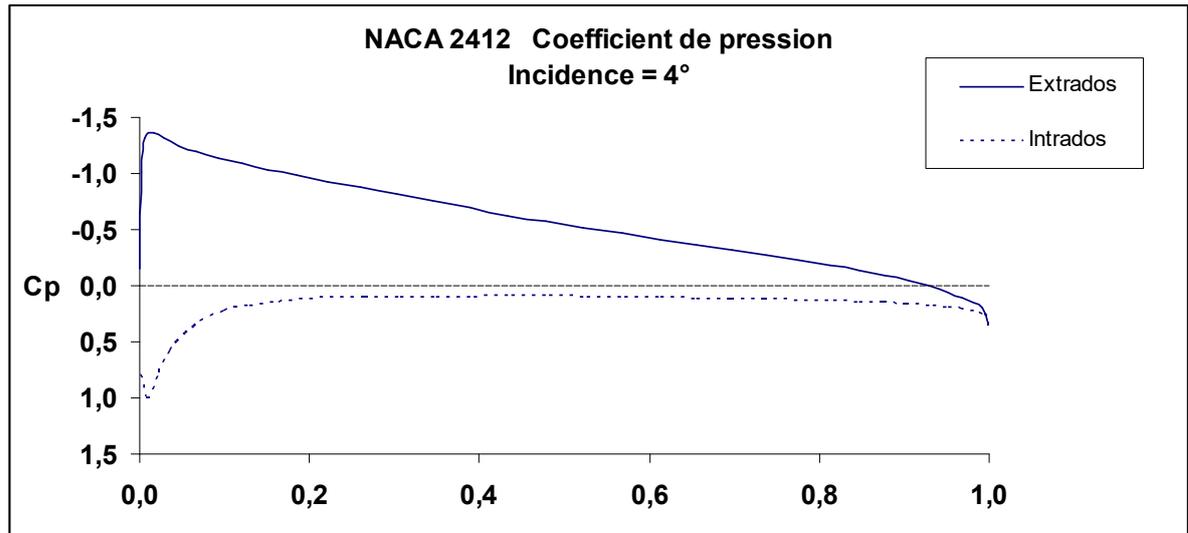


Figure 6

1.4 Conséquence de la circulation

La circulation d'air autour de l'aile peut être assimilée à un tourbillon (« vortex » chez les anglo-saxons) qui se déplace avec l'aile.

Aux extrémités de celle-ci, ce tourbillon se détache et se replie pour former une autre circulation de l'air telle que schématisée par la figure 7. L'aile « traîne » donc derrière elle deux tourbillons contrarotatifs qui délimitent l'air calme non perturbé du flux descendant.

Ces tourbillons marginaux génèrent la « turbulence de sillage », phénomène redoutable pour les appareils légers quand elle est provoquée par des appareils de plus grande taille.

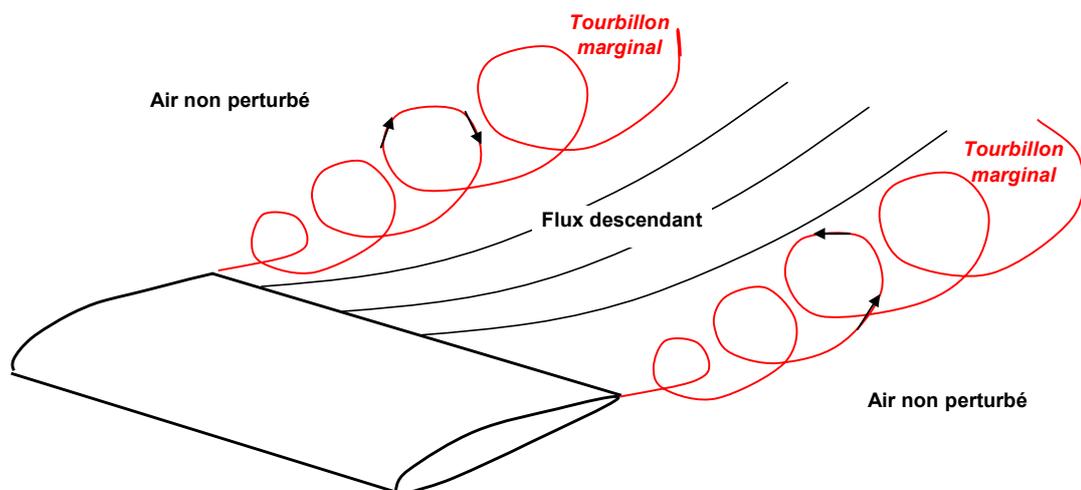


Figure 7

Une autre conséquence non négligeable de ces tourbillons marginaux est qu'ils sont à l'origine de la « traînée induite » qui vient se rajouter à la traînée de forme et la traînée de frottement et qui est prépondérante à faible vitesse.

L'intensité de ces tourbillons augmente avec la circulation autour de l'aile (donc l'incidence) et, pour une même incidence, diminue quand l'allongement de l'aile augmente. Cette énergie stockée dans les tourbillons est donc perdue et induit donc la nécessité d'une plus grande force de traction et donc de consommation de carburant.

1.5 Illustrations

Les photos suivantes (*source Airlines.net*) montrent la matérialisation par l'air ambiant (phénomènes de condensation, nuages) des tourbillons marginaux et du chenal de déflexion de l'air derrière l'aile.



2 DEPLACEMENT DE L'AILE EN PROXIMITE DE SOL

2.1 Phénomènes

« L'effet de sol » concerne deux phénomènes qui se produisent quand une aile se déplace en proximité du sol, à savoir une augmentation du coefficient de portance et une diminution du coefficient de traînée, les contributions respectives dépendant des caractéristiques de l'aile, en particulier son allongement. Le rapport de ces deux coefficients, à savoir la « finesse » augmente donc.

De façon générale, l'effet de sol est, en termes d'appellation :

- Soit « dominé par l'envergure » ; dans ce cas, c'est principalement la réduction de la traînée qui est l'impact principal. C'est le cas pour les ailes à fort allongement. C'est le rapport *distance par rapport au sol / envergure* qui est le principal paramètre.
- Soit « dominé par la corde de profil » ; c'est alors principalement une augmentation du coefficient de portance qui est constatée, qui affecte les ailes à faible allongement. C'est le rapport *distance par rapport au sol / longueur corde de profil* qui est le principal paramètre.

Ces phénomènes affectent plus les avions à ailes basses que ceux à ailes hautes.

2.1.1 Origine de la réduction de traînée

La traînée d'une aile est la somme de deux traînées principales :

- La traînée « parasite », qui combine la traînée de forme et de frottement
- La traînée « induite » qui, comme présenté plus haut, est la conséquence de l'augmentation d'incidence avec la création de tourbillons marginaux en extrémité d'aile

Quand l'aile est en proximité du sol, la circulation autour de l'aile est modifiée. Les angles de flux montant et du flux descendant sont diminués, les tourbillons marginaux ne peuvent se développer avec la même intensité, sont donc « moins consommateurs d'énergie », ce qui entraîne une baisse de la traînée induite, et donc de la traînée totale. C'est un peu comme si l'envergure augmentait.

Voir figures 8 et 9.

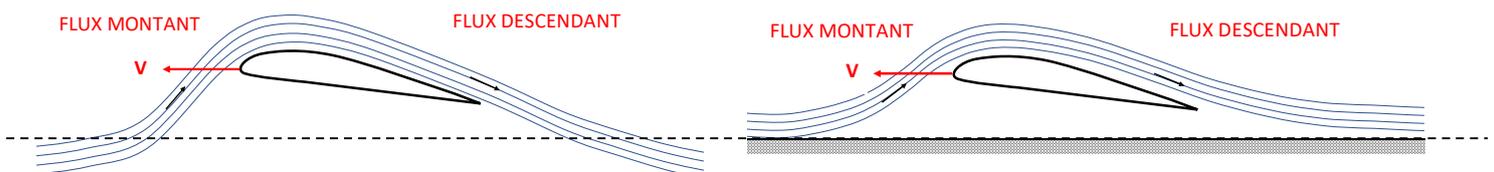


Figure 8.1. Ecoulement libre

Figure 8.2. Ecoulement en proximité de sol

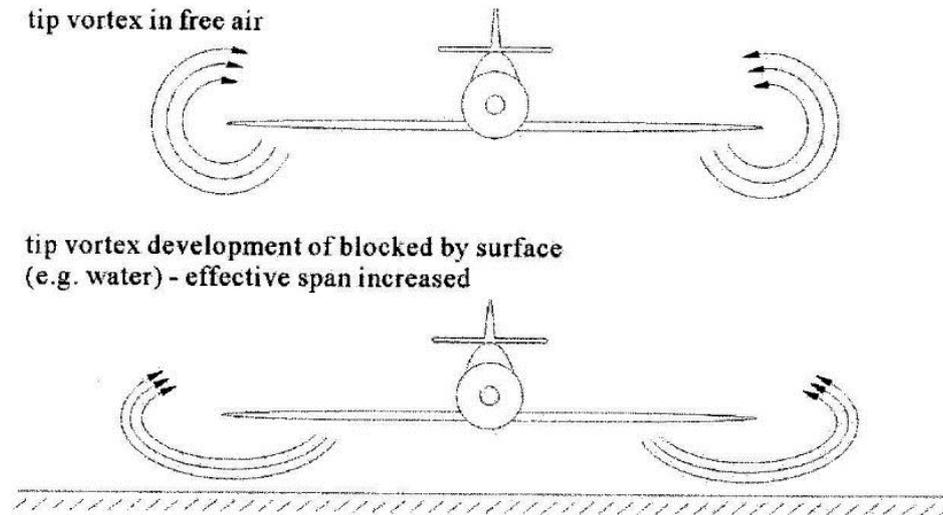


Figure 9. Impact sur les tourbillons marginaux

2.1.2 Origine de l'augmentation du coefficient de portance

Le C_z d'une aile peut être considéré comme la somme du C_z de l'intrados C_{zi} et de celui de l'extrados C_{ze}

$$C_z \text{ total} = C_{zi} + C_{ze}$$

Dans l'effet de sol, c'est la contribution de l'intrados qui augmente, l'extrados étant peu ou pas affecté, voire pouvant montrer une diminution de sa participation. Le régime de surpression d'intrados augmente, l'air ne pouvant être évacué de la même façon qu'en écoulement « libre », en raison de la proximité du sol. Voir figure 10.

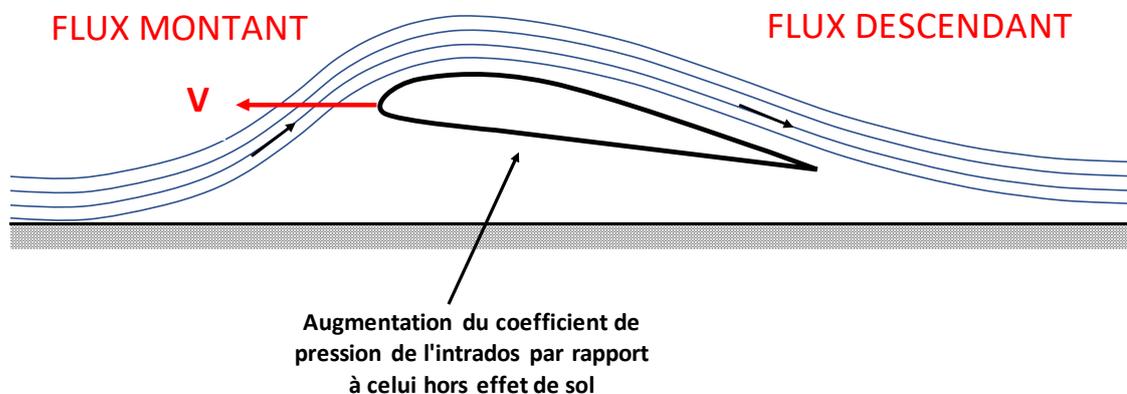


Figure 10

Note : suivant les profils, on peut cependant constater une diminution de la portance en proximité du sol. C'est le cas en particulier quand l'intrados est convexe et l'incidence faible. On génère alors un phénomène similaire à celui rencontré dans un venturi, conduisant à une dépression qui contribue à plaquer le système au sol. Cet autre aspect de l'effet de sol est utilisé en sport automobile, ou sur des véhicules très haut de gamme (supercars), pour augmenter la tenue de route à haute vitesse. Voir figure 11.

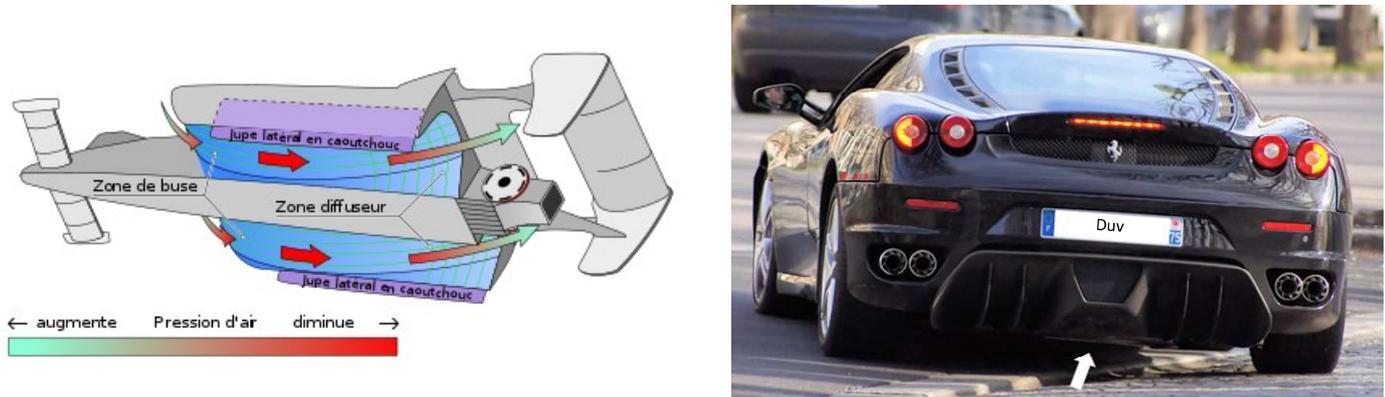


Figure 11. Jupes pour effet de sol – Lotus 79 / Ferrari

2.2 Simulation de profil d'aile en effet de sol / Modèles

2.2.1 Simulation du profil NACA 4412

On présente ici quelques résultats d'une étude de simulation d'un profil NACA 4412 (voir annexe 1) concernant l'impact sur les caractéristiques de portance (C_p , C_z) en fonction de la distance du bord de fuite de l'aile (h) par rapport au sol. Plus exactement, c'est le rapport h/c qui est la variable, c étant la longueur de la corde de profil.

Les conditions sont les suivantes :

- Longueur corde de profil $c = 1$ m
- Vitesse = 170 kts

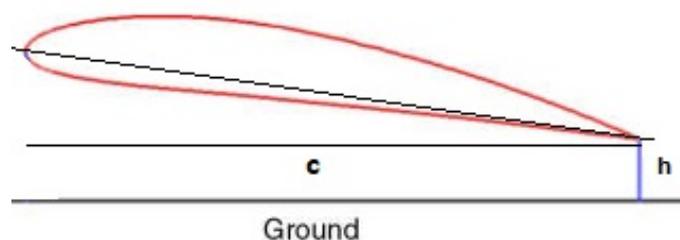


Figure 11

2.2.1.1 Variation du coefficient de pression C_p en fonction de h/c

Les graphiques en figure 12 présentent l'influence du rapport h/c sur le coefficient de pression, pour des incidences (α) de 4° et 8° .

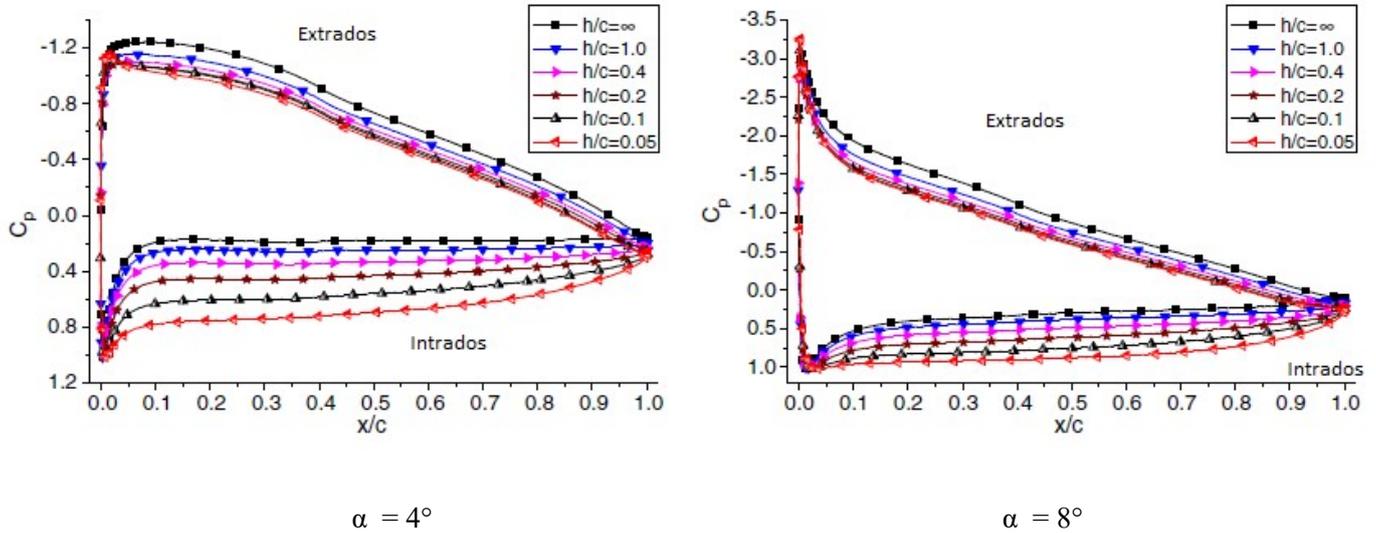


Figure 12

On constate :

- Une augmentation du C_p sur l'intrados par rapport à sa valeur en écoulement libre ($h/c = \infty$), d'autant plus forte que le rapport h/c diminue
- Un C_p sur l'extrados de moins en moins négatif quand h/c diminue. En d'autres termes, la dépression d'extrados est moindre en proximité du sol qu'en écoulement libre. La variation est cependant plus faible que pour l'intrados

2.2.1.1 Variation du coefficient de portance C_z en fonction de h/c

Comme conséquence, les coefficients de portance de l'intrados (C_{zi}) et de l'extrados (C_{ze}) sont modifiés, comme l'indiquent les graphiques en figure 13.

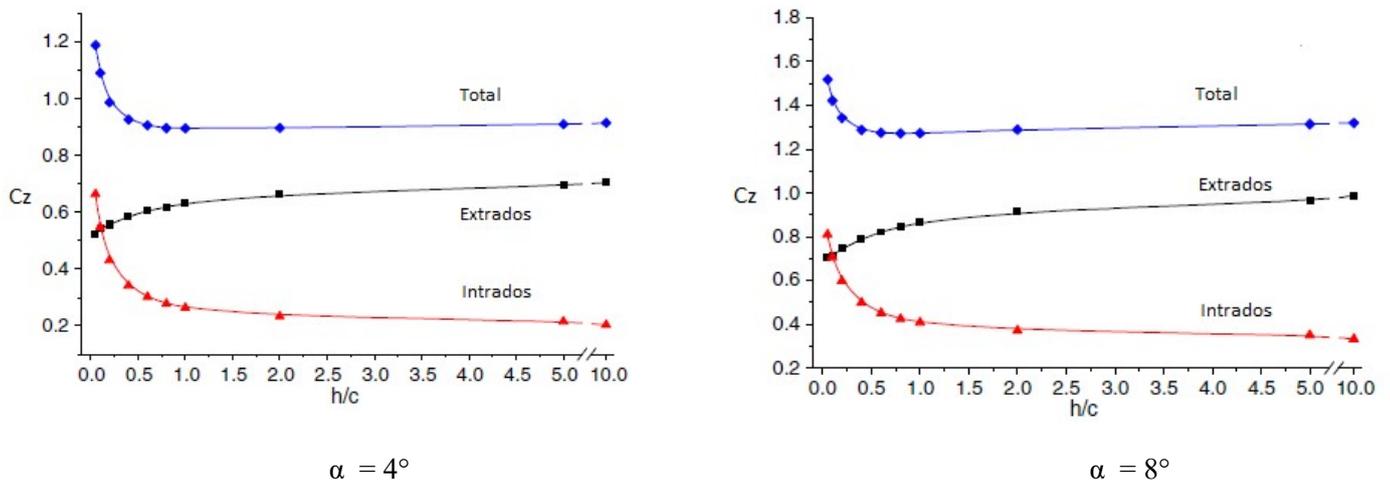


Figure 13

En écoulement libre (ici pour $h/c > 10$), le C_z de l'extrados est très supérieur à celui de l'intrados. C'est effectivement l'extrados d'une aile qui procure la majorité de la portance, de l'ordre de 75 à 85 % en fonction de l'incidence. Quand celle-ci augmente, la contribution de l'intrados s'accroît, cette augmentation dépendant de la forme plus ou moins convexe de celui-ci.

Quand l'aile se rapproche du sol, le C_z de l'intrados augmente, celui de l'extrados diminue, mais de façon moindre, ce qui fait qu'un accroissement du C_z total apparaît pour des valeurs de h/c , inférieures à 1 dans cette simulation.

2.2.2 Modèle McCormick

Ce modèle très simple présente les rapports C_z avec effet de sol / C_z hors effet de sol et C_{xi} avec effet de sol / C_{xi} hors effet de sol, en fonction du rapport $(b/2) / h$.

C_z : coefficient de portance total

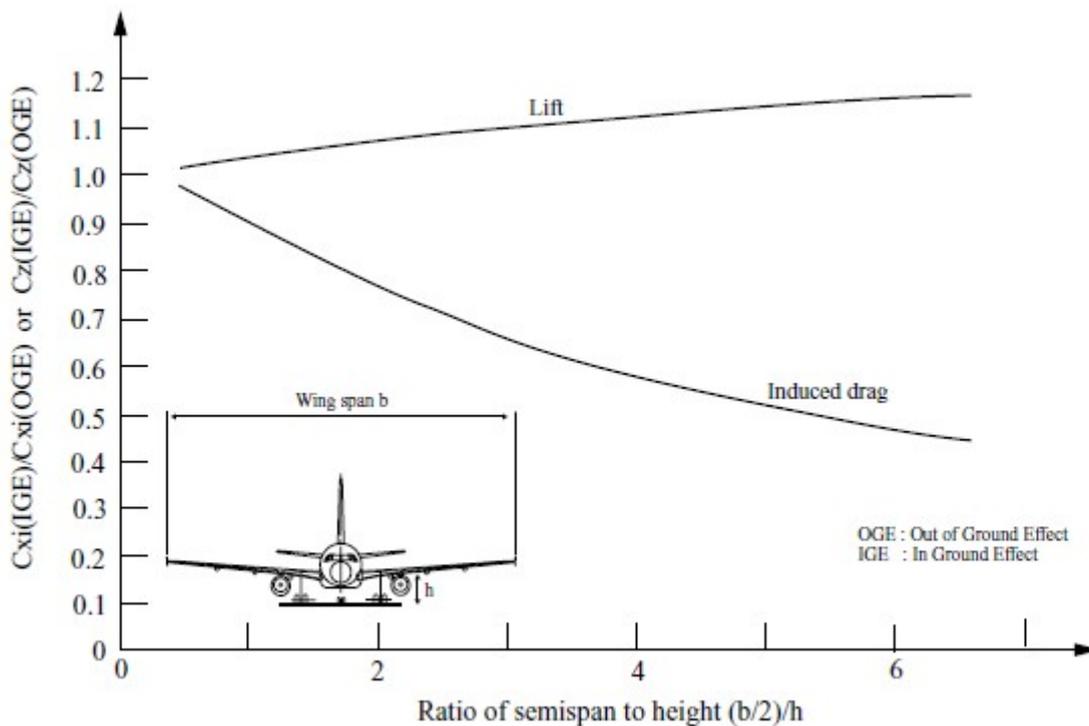
C_{xi} : coefficient de traînée induite

IGE : avec effet de sol

OGE : hors effet de sol

b : envergure

h : hauteur par rapport au sol



2.3 Impact de l'effet de sol

2.3.1 Phase d'atterrissage

L'augmentation du C_z en proximité de sol conduit instantanément à un angle d'incidence inférieur pour assurer la même portance. En parallèle, la diminution de la traînée fait qu'il faut moins de traction pour assurer le même avancement.

Mais à l'inverse des oiseaux qui gèrent par leurs muscles l'incidence et la puissance, et donc ressentent la nécessité, lors de survol d'étendues d'eau, de voler le plus près possible de la surface afin d'économiser leur réserve d'énergie, l'impact de l'effet de sol lors de l'atterrissage, qui de surcroît est effectué avec la puissance réduite au minimum, n'est pas perceptible par le pilote.

Il faudrait pour cela pouvoir effectuer un atterrissage d'une part sur le sol, et d'autre part... sans le sol ..., pour pouvoir séparer ces phénomènes d'effet de sol et les apprécier.

Ce qui n'a pas de sens.

Des accidents de type sortie de piste à l'atterrissage sont parfois attribués à l'effet de sol, mais à la base, il s'agit de vitesse en finale trop forte ou de composante de vent arrière notable qui font que les distances d'atterrissages indiquées dans le manuel de vol ne peuvent pas être respectées.

2.3.2 Phase de décollage

Le phénomène d'effet de sol peut se révéler ici sournois.

Dans la phase d'accélération sur la piste et juste immédiatement après la rotation, l'avion au décollage se trouve encore dans la zone d'effet de sol. Il effectue donc la rotation avec un coefficient de portance C_z qui, pour une incidence constante, va diminuer lorsque l'appareil va sortir de cette zone.

Si la rotation a été effectuée avec une vitesse trop faible, et donc une incidence forte, la baisse du C_z lors de la prise de hauteur peut conduire à une chute de la portance pouvant entraîner une dégradation de la trajectoire, qui va amener le pilote à corriger par réflexe le processus en augmentant encore plus l'incidence par action sur la profondeur. Cette augmentation d'incidence va nécessiter une *puissance nécessaire* au vol augmentée et qui peut se retrouver supérieure à celle que peut donner le moteur, à savoir la *puissance utile*, dans les conditions du moment.

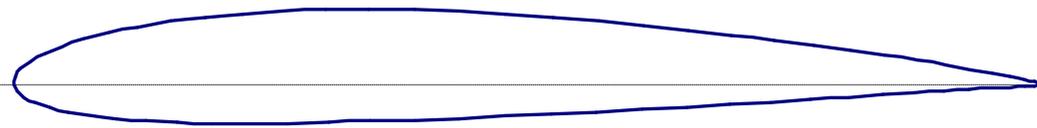
Le système va donc se retrouver à l'extrême gauche du domaine « second régime », sans aucune possibilité pour l'avion de poursuivre la montée, et dont la seule solution pour en sortir est de réduire l'incidence - ou avoir fait préalablement un palier d'accélération - afin de s'éloigner de cette zone critique d'instabilité par augmentation de la vitesse.

Cette sortie d'effet de sol avec une vitesse trop faible est d'autant plus critique que :

- Les conditions météo sont défavorables (température élevée)
- L'altitude du terrain est élevée
- La masse de l'appareil est élevée
- Le centrage de l'appareil est très arrière, ce qui peut entraîner une variation d'incidence trop importante lors de l'action sur le manche pour la rotation
- La position du compensateur est trop « à cabrer »

Des accidents graves lors de décollages ont hélas déjà vérifié ceci.

ANNEXE 1

Profil NACA 2412

2 signifie que le profil à une courbure relative de 2 %

4 indique que le point correspondant à la flèche maximale se trouve à 40 % du bord d'attaque.

12 représente l'épaisseur relative soit 12 %.

Profil NACA 4412

4 signifie que le profil à une courbure relative de 4 %

4 indique que le point correspondant à la flèche maximale se trouve à 40 % du bord d'attaque.

12 représente l'épaisseur relative soit 12 %.

Coefficient de pression

1. Définition du coefficient de pression C_p

Il a pour valeur :

$$C_p = (P - P_0) / q_0 \quad \text{avec :}$$

P = pression au point considéré

$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2$ qui est la pression dynamique

V_0 et P_0 = respectivement vitesse et pression de l'air loin de l'aile

Ce coefficient est donc le rapport de l'écart de pression (par rapport à la pression atmosphérique) en un point de l'aile sur la pression dynamique maximum que l'on peut rencontrer sur l'aile, à savoir le point d'arrêt situé au niveau du bord d'attaque.

La relation s'exprime aussi, en appliquant la loi de Bernoulli :

$$C_p = (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2) / \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2$$

V étant la vitesse de l'air au point considéré.

Ce qui donne finalement :

$$C_p = 1 - (V/V_0)^2 \tag{9}$$

C_p est un nombre sans dimension, caractéristique du profil.

2. Exemple : profil NACA 2412

La figure ci-dessous présente la variation de C_p en fonction de la distance (toujours avec la même normalisation $c = 1$) par rapport au bord d'attaque, pour une incidence de 4° , et $Re = 1000000$.

On présente l'axe des ordonnées en valeurs inversées et on remarque évidemment que l'allure des courbes est similaire à celles représentant le champ de pression.

Quand $V < V_0$, c'est-à-dire quand on est en présence d'une surpression, C_p est > 0 . C'est le cas ici de l'intrados.

Quand $V > V_0$, c'est-à-dire quand on est en présence d'une dépression, C_p est < 0 . C'est le cas ici de l'extrados.

Quand $V = 0$, c'est le point d'arrêt, alors $C_p = 1$

Quand $V = V_0$, on a $C_p = 0$

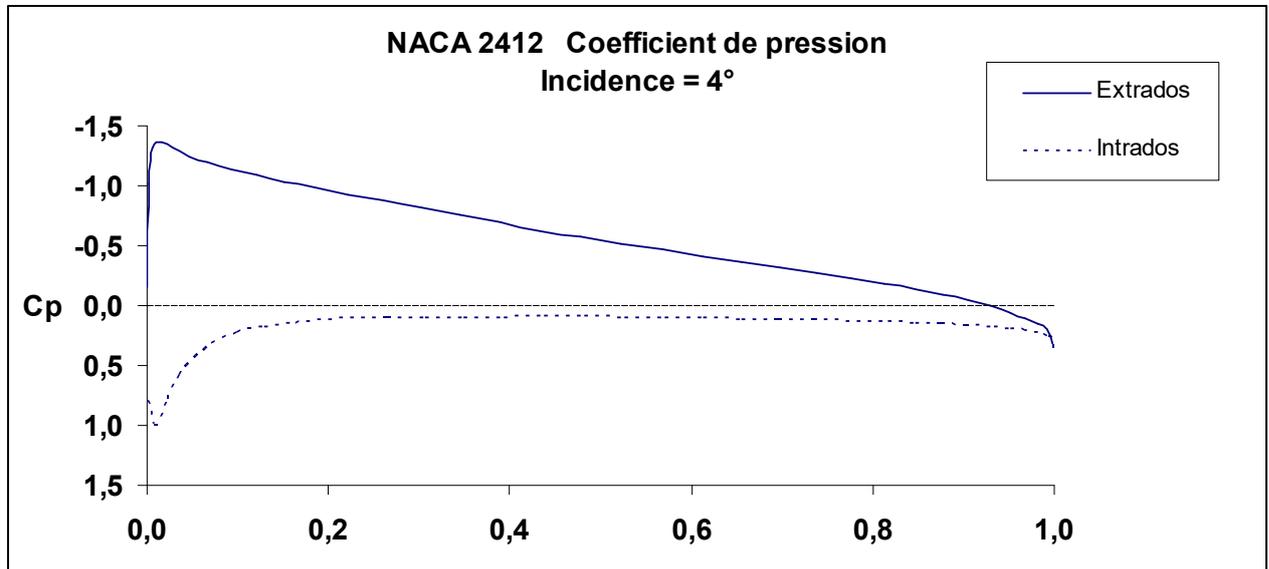


Figure 7.1

3. Relation entre C_p et C_z

On peut écrire :

$$C_z = C_{p_{mi}} - C_{p_{me}}$$

Avec :

C_z = coefficient de portance de l'aile

$C_{p_{mi}}$ = coefficient de pression moyen de l'intrados

$C_{p_{me}}$ = coefficient de pression moyen de l'extrados