



Par **Michel Barry**,
pilote professionnel,
ingénieur aéronautique.

Les dangers de l'effet de sol

ATTERRISSAGE TROP LONG, DÉCOLLAGE LABORIEUX, VOUS ÊTES PEUT-ÊTRE EN EFFET DE SOL.
ÉTUDE DES DANGERS DU PHÉNOMÈNE ET CONSEILS POUR ÉVITER D'EN ÊTRE VICTIME.



L'effet de sol peut parfois être intentionnel...

Vous avez tous assisté à des manifestations du phénomène « effet de sol ». Soit comme pilote, quand une arrivée un peu rapide vous faisait flotter au-dessus de la piste bien plus longuement que vous ne l'auriez voulu. Soit aussi quand votre appareil peu motorisé, arraché prématurément du sol, se complaisait au ras de la piste sans se décider à monter. Soit enfin quand vous avez assisté à la longue glissade au ras de la piste d'un planeur qui semblait pouvoir voler indéfiniment sur plus d'un kilomètre, puis conserver assez d'énergie pour s'élever de nouveau et refaire un circuit de piste. Dans les trois cas, des avis bien informés ont évoqué l'effet de sol.

Tout comme d'ailleurs les spécialistes de compétition automobile quand ils s'étonnent de l'aptitude des voitures de course à rester collées au sol grâce au dessin de leur carrosserie.

Pour les avions, l'effet de sol a plutôt tendance à aider l'appareil à se maintenir en l'air; dans l'autre cas, il « colle » la voiture au sol. S'agit-il du même phénomène ?

Une analyse des écoulements autour d'une surface portante au voisinage du sol nous montre la complexité des interactions qui se produisent entre l'air, le sol et la surface portante. Et surtout, comment au fur et à mesure que le sol et la surface portante se rapprochent, les forces de pression engendrées par l'air se modifient jusqu'à changer de signe.

Dans un premier temps, nous évoquerons les dangers dus à l'effet de

sol en analysant des accidents dans lesquels il a joué un rôle certain. Dans un deuxième temps, après avoir sélectionné les éléments de physique nécessaires à la bonne compréhension du phénomène d'effet de sol, nous donnerons les principales recommandations utiles pour éviter à nos amis pilotes d'appareils légers d'en être victimes.

A. Six accidents dans lesquels l'effet de sol a joué un rôle

1. Accident d'un Piper PA-28 Cherokee aux Saintes (971), le 21/05/03
Voir lien #1 sur notre site.

Sur le difficile aéroport des Saintes (971), un pilote expérimenté (3 232 h de vol), connaissant bien le site (500 atterrissages), se présente en finale pour la piste 09, face à la mer. Un léger vent arrière rend l'atterrissage plus long que prévu et après une perception « d'effet de sol », il ne parvient pas à « plaquer » l'avion sur la piste, conformément à la technique bien particulière qui consiste à rentrer les volets au moment du toucher des roues. À aucun moment, il n'envisage la remise de gaz. Il sort de la piste et s'immobilise sur la plage une cinquantaine de mètres plus loin. L'aile basse et le train plutôt court du Cherokee ont probablement favorisé le phénomène d'effet de sol sur une piste déjà courte (580 m) et sur laquelle il est difficile de toucher aux peignes. Le moindre vent arrière complique la situation.

SÉCURITÉ

	DATE	APPAREIL	LIEU	PHASE DE VOL	CONSÉQUENCES
1	21/05/03	PA-28	Les Saintes (971)	Effet de sol à l'atterrissage, sortie de piste	Avion endommagé
2	17/02/11	MCR01	Sarlat (24)	Flottement à l'atterrissage, sortie de piste	Appareil fortement endommagé
3	14/06/12	PA-28	Bordeaux (33)	L'avion reste dans l'effet de sol au décollage, sortie de piste	Avion fortement endommagé
4	20/09/12	PA-28	Nîmes (30)	150 m de flottement à l'atterrissage, sortie de piste	Avion fortement endommagé
5	12/07/13	Gaz'aille	Sabonnères (31)	L'avion reste dans l'effet de sol au décollage, sortie de piste	Avion fortement endommagé
6	16/02/14	DR400	Lognes (77)	Sortie brutale de l'effet de sol à l'atterrissage, décrochage, sortie de piste	Avion fortement endommagé

2. Accident d'un Dyn'Aero MCR01 sur l'aérodrome de Sarlat-Domme (24), le 17/02/11

Voir lien #2 sur notre site.

Un pilote expérimenté (14 000 h de vol), propriétaire d'un petit biplace, est perturbé par le déclenchement intempestif de l'alarme de décrochage alors qu'il est stabilisé à 1500 pieds à proximité de l'aérodrome. Il décide de revenir sur l'aérodrome. Il majore par précaution (85 mph au lieu des 70 préconisés) sa vitesse en finale et se présente trop long sur la piste. Il ne parvient pas à résorber sa vitesse en effet de sol « sentant flotter » l'appareil, dont la vitesse ne diminue pas autant qu'il le voudrait. Il finit par toucher le sol près de la fin de piste (longueur totale 745 m) mais ne peut s'arrêter avant la fin. L'avion sort longitudinalement et bascule sur le dos dans un champ labouré. Le pilote aurait dû logiquement remettre les gaz mais, préoccupé par le bruit de l'alarme et sous-estimant l'influence de l'effet de sol, il a préféré poursuivre l'atterrissage malgré une distance restante trop courte pour s'arrêter.

3. Accident d'un Piper PA-28 sur l'aérodrome de Bordeaux-Mérignac (33), le 14/06/12

Voir lien #3 sur notre site.

Lors d'un décollage, le pilote (88 h de vol) décide tout de même de décoller malgré un régime du moteur insuffisant (2 500 t/min au lieu des 2 700 t/min attendus). À très basse vitesse, il réussit cependant à s'envoler mais reste en effet de sol sans comprendre pourquoi l'avion vole, mais ni n'accélère, ni ne monte. Quand il décide enfin d'interrompre le décollage, il est trop tard pour s'arrêter dans de bonnes conditions. L'avion sort de la piste. L'effet de sol a joué un rôle important dans la décision de poursuivre le décollage. En effet de sol, l'appareil pouvait voler malgré sa puissance réduite mais dès qu'il en est sorti elle s'est révélée insuffisante pour lui permettre de s'élever. D'où le piège pour un pilote peu expérimenté.

4. Accident d'un Piper PA-28 sur l'aérodrome de Nîmes-Courbessac (30), le 20/09/12

Voir lien #4 sur notre site.

Un pilote (380 h de vol) se fait surprendre pendant l'arrondi par une rafale de vent provenant de l'arrière. Il ressent que l'avion flotte au-dessus de la piste pendant 4 à 5 secondes. Ce qui retarde son point de toucher d'environ 150 mètres et fait sortir l'appareil de la piste. Il est notoire qu'en effet de sol, un vent arrière qui « dévente » quelques

instants l'appareil, donc diminue sa vitesse propre, n'a pas le même effet qu'à une hauteur en dehors de l'effet de sol. La même rafale de vent arrière qui en finale ferait plutôt creuser le plan ne produit pas la même perte de portance en effet de sol. Et la plupart du temps elle provoque, selon des lois aérodynamiques complexes, l'effet de flottement décrit par le pilote.

5. Accident d'un avion Gaz'aille (construction amateur) sur l'aérodrome privé de Sabonnères (31), le 12/07/13

Voir lien #5 sur notre site.

Un pilote - constructeur de l'avion (170 h de vol) - et son instructeur (2 200 h de vol, mais aucune expérience sur l'appareil) tentent de décoller sur une piste plutôt limitative compte tenu de la faible puissance de l'appareil (53 ch). Il parcourt la piste en effet de sol et termine sa course en dehors du terrain. Sur les appareils faiblement motorisés, le risque de décoller à une vitesse faible (ici 55 kt) puis de rester en effet de sol sans pouvoir ni monter ni accélérer est grand. Il vaut mieux dans ce cas attendre, en roulant sur la piste, une vitesse de rotation (60 kt par exemple) plus confortable. Ainsi, à faible incidence, l'aile traîne moins qu'à 55 kt en vol où l'avion va se retrouver inmanquablement au second régime et prêt à décrocher. Ici, le phénomène d'effet de sol (comme dans l'accident n° 3) en accroissant la performance de l'aile (moins de traînée, davantage de portance) est un piège : l'avion semble pouvoir voler mais il ne peut ni monter ni accélérer vers sa vitesse optimale de montée.

6. Accident d'un Robin DR400 sur l'aérodrome de Lognes-Émerainville (77), le 16/02/14

Voir lien #6 sur notre site.

Le pilote (172 h de vol) conduit une finale un peu plus rapide que d'habitude afin de ne pas gêner un appareil. Il ne réussit pas à bien stabiliser la courte finale et se présente avec un excédent de vitesse. Alors qu'il est en effet de sol, il tire le manche dans l'intention d'arrondir. Mais sans doute à cause de l'excédent de vitesse dans l'effet de sol, l'appareil au lieu d'atterrir reprend de la hauteur et, près du décrochage, devient incontrôlable en roulis et retombe durement sur la piste. L'exemple est choisi pour montrer toutes les précautions à prendre dès qu'un appareil, surtout avec aile basse et volets sortis, vole très près du sol. Telle action à cabrer bien calibrée pour provoquer l'arrondi peut devenir beaucoup trop efficace en effet de sol avec un léger excédent de vitesse.

B. L'effet de sol : une série de modifications complexes de l'écoulement autour de l'aile de l'avion, dont l'influence sur la portance et la traînée, est d'autant plus grande que l'aile est près du sol

1. Un phénomène lié à la cinématique de l'écoulement de l'air autour de l'aile, aspect qualitatif

L'écoulement de l'air autour d'un profil d'aile engendre des forces de pression, dont la résultante R peut se décomposer en sa composante utile – la portance R_z – et sa composante nuisible – la traînée R_x (voir figure 2 sur notre site).

Pour chaque incidence usuelle (entre 0 et 5 degrés pour la plupart des profils), la portance de l'aile est de 10 à 40 fois supérieure à la traînée lorsque l'avion vole loin du sol. S'il s'en rapproche, et dès que sa hauteur est de l'ordre de son envergure (une dizaine de mètres pour nos petits avions) ou moins, les deux composantes – portance et traînée – subissent progressivement, en se rapprochant du sol, des modifications qui obéissent aux deux règles suivantes :

- la portance R_z augmente ;
- la traînée R_x diminue.

On parle « d'effet de sol ».

Plus l'aile se rapproche du sol, plus l'effet est sensible. Les avions à aile basse (figure 1) sont donc plus sensibles que les avions à aile haute.



PIPER PA-28



DYN'AERO MCR01



GAZ'AILE



ROBIN DR400

Figure 1. Les quatre types d'avions victimes d'effet de sol ont des ailes basses. Le phénomène bien qu'existant sur des appareils à aile haute est en général moins sensible.

2. Aspect dynamique du phénomène d'effet de sol : modification de R_z et de R_x

(pour la suite, on raisonnera avec une corde de 1 mètre et une hauteur minimale de l'aile au-dessus du sol de 1 mètre également, déterminée par le train d'atterrissage)

Trainée et portance dépendent essentiellement des paramètres suivants :

- de la vitesse de l'air autour de l'avion, sa vitesse propre V_p ;
- de l'incidence de l'aile i ;
- de sa corde (1 mètre), de son allongement dont dépend la traînée induite ;
- de son profil, de la position des dispositifs hypersustentateurs ;
- de la hauteur entre l'aile et le sol h ;
- de la nature du sol (piste en dur, en herbe, surface d'eau avec ou sans vagues...).

Afin de circonscrire l'étude de R_z et de R_x aux éléments principaux, notamment ceux en général responsables des accidents, nous la limitons grâce aux hypothèses suivantes :

- incidence et vitesse en effet de sol constants (dans un premier temps) ;
- sol lisse ;
- seule la hauteur h varie.

2.1. Cas de la portance R_z

La portance (ou la « déportance ») en effet de sol est connue dans d'autres domaines. On parle de véhicules à effet de sol (sustentés par l'effet de sol), de pseudos avions à effet de sol (ekranoplans) et aussi de l'application de l'effet de sol aux autos de compétitions. Dans ce dernier cas, il est exploité dans le but de produire une force d'appui, dirigée de haut en bas sur les roues, afin de leur donner davantage d'adhérence. Ainsi en quelques centimètres de variation de la hauteur h par rapport au sol, la portance peut changer de signe, (voir figure 2 sur notre site).

Quant à l'effet de sol qui nous préoccupe pour nos avions, il concerne une tranche de hauteur comprise entre la valeur de l'envergure et la hauteur de l'aile quand l'avion est posé sur ses roues. Dans cette tranche de hauteur, il est d'autant plus intense que l'aile est plus basse.

2.2. Cas de la traînée R_x

En effet de sol stabilisé, on a l'impression que l'appareil ne ralentit plus, un peu comme si la traînée diminuait. Sensation très semblable à la rentrée des aérofreins sur un planeur. Deux phénomènes expliquent cette sensation qui s'avère être aussi une réalité :

- une diminution significative de la traînée induite (de 20 à 30 % de la traînée totale) à proximité du sol, très sensible sur les appareils à faible allongement, ceux dont la traînée induite est initialement plus grande ;
- une tendance instinctive pour le pilote à pousser le manche vers l'avant afin de combattre la tendance à monter due à l'augmentation de la portance. Diminuant ainsi inconsciemment l'incidence afin de conserver la portance constante, il diminue aussi la traînée de profil.

Sur la plupart de nos appareils monomoteurs d'allongement moyen (entre 6 et 9), on relève des diminutions de la traînée induite très significatives.

Hauteur au-dessus du sol h	Réduction de traînée induite
Hauteur = à l'envergure	2%
Hauteur = 80% de l'envergure	3%
Hauteur = 50% de l'envergure	8%
Hauteur = 20% de l'envergure	30%
Hauteur = 10% de l'envergure	50%

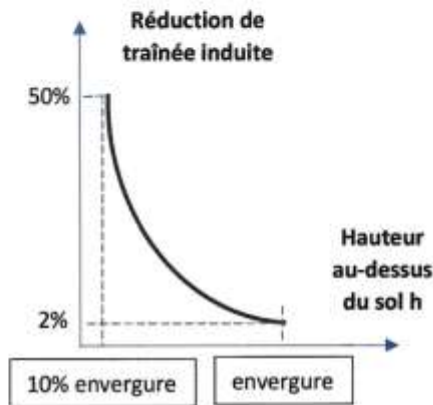


Figure 3. Valeurs moyennes de réduction de la traînée, qui est induite par la portance, pour diverses hauteurs au-dessus du sol, comprises entre l'envergure et 10 % de l'envergure.

2.3. Conséquences pratiques :

2.3.1 À l'atterrissage : la résultante aérodynamique R à portance identique ($R_z = mg$, poids de l'avion) et à vitesse constante. Conséquence pour la finesse f.

Figure 4 sur notre site.

En résumé : à l'atterrissage et au passage en effet de sol, la portance aurait tendance à augmenter. Afin de la maintenir constante (condition du vol en palier horizontal), le pilote doit diminuer l'incidence. Il s'ensuit une réduction significative de la traînée donnant l'impression que l'avion ne veut plus ralentir et « flotte » au-dessus de la piste comme propulsé par une poussée invisible...

La résultante aérodynamique R est moins inclinée vers l'arrière révélant ainsi une augmentation temporaire et, pour une fois, peu souhaitable de la finesse, $f = R_z/R_x$ lors de l'atterrissage.

2.3.2 Au décollage : un besoin de puissance réduit en effet de sol.

La modification de la finesse explique le comportement de l'appareil en effet de sol à l'atterrissage. Pour le décollage la même augmentation de la finesse en effet de sol se traduit par la réduction de la puissance Pn nécessaire au vol et, par le décalage vers le bas et vers la gauche des courbes de puissance, nécessaire en fonction de la vitesse (figure 5).

Ainsi, un appareil disposant de puissance utile Pu, comprise entre Pn2 et Pn1, pourra décoller à la puissance Pn2 mais ne pourra pas sortir de l'effet de sol si plus haut, hors effet de sol, la puissance minimale nécessaire au vol était Pn1. C'est la raison pour laquelle, hors effet de sol, des appareils sous-motorisés ont du mal à prendre de la hauteur (accidents n°3 et n°5). Voir le vol en effet de sol des appareils ekranoplans, conçus pour voler seulement en effet de sol.

<https://www.youtube.com/watch?v=UVOCzplJN2A>

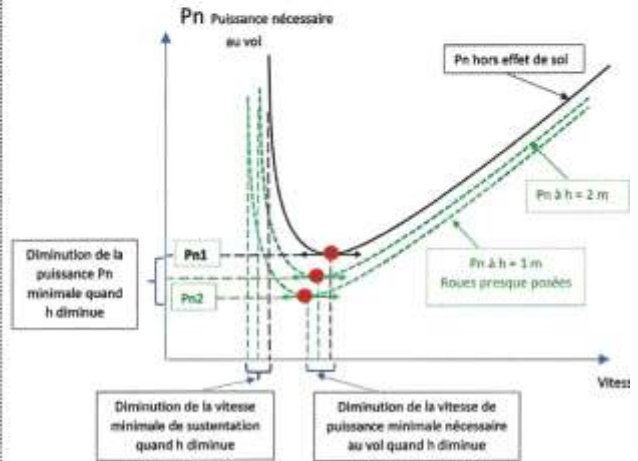


Figure 5. Diminution de la puissance nécessaire au vol en effet de sol et diminution des vitesses associées. La disposition des points rouges montre une quasi-linéarité de la diminution de la puissance minimale nécessaire au vol au fur et à mesure que la hauteur h en effet de sol diminue.

C. Conseils, recommandations : le respect des vitesses préconisées, à l'atterrissage et au décollage, est votre seule protection face au risque toujours présent (même pour un pilote très expérimenté, accident n°2) de vous faire piéger par l'effet de sol

I. À l'atterrissage : figure 6

- quand on respecte les consignes du constructeur (volets, puissance, vitesse) pour atterrir, l'effet de sol existe, mais il est de courte durée et l'allongement qu'il produit sur DA (distance d'atterrissage après passage des 15 mètres) est compris dans la performance nominale du manuel de vol. Il passe alors inaperçu ;
- si on majore volontairement ou involontairement la vitesse d'approche, notamment en courte finale, on risque de rester longtemps en effet de sol, bien davantage que ne le laisserait supposer un petit excédent de 5 kt par exemple ;
- le vol en effet de sol est quasi régulé en hauteur, d'où la difficulté d'en sortir ;
- la régulation dure tant que l'excédent de vitesse n'est pas résorbé. Toute tentative de rejoindre le sol avec excédent de vitesse se traduit par un rebond à faible assiette qui peut occasionner la rupture du train avant ;
- si la piste est assez longue et le pilote patient, il attendra que la vitesse régresse afin de pouvoir terminer par l'arrondi habituel, à la vitesse recommandée ;

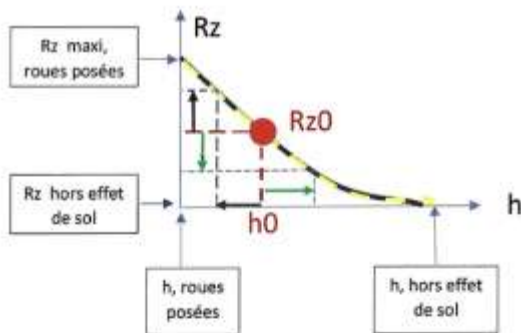


Figure 6. Principe de la « régulation-piège » de la hauteur h en effet de sol, à l'atterrissage, gaz réduits :

- en suivant la courbe de portance extraite de la figure 2, on constate que toute diminution de hauteur en effet de sol (flèche noire) entraîne une augmentation de la portance (flèche noire) qui tend à faire remonter l'avion ;
- inversement toute augmentation de hauteur (flèche verte) provoque une diminution de portance (flèche verte) qui fait redescendre l'avion ;
- la hauteur est ainsi naturellement régulée autour de h_0 tant que la vitesse ne régresse pas.

- si la piste est trop courte on préférera une **remise de gaz** pour une nouvelle présentation à la vitesse recommandée ;
- la stratégie à appliquer lors de toute approche, notamment sur terrain court, devrait contenir l'item « Effet de sol » de façon que la mémoire immédiate, réactivée au cours du briefing « Atterrissage », fasse gagner les précieuses secondes qui ont manqué aux pilotes des cas n°1, 2, 4, et 6, pour lesquels la remise de gaz semblait la seule bonne stratégie ;
- bien se souvenir qu'en effet de sol l'appareil vole avec une réserve de vitesse importante, par rapport à sa vitesse minimale de sustentation hors effet de sol, qui a diminué (voir figure 4 sur notre site). Toute action à cabrer se révélera plus efficace que prévu et pourra propulser l'appareil à une hauteur hors effet de sol à laquelle la vitesse minimale de sustentation est plus élevée. D'où le risque de décrochage hors effet de sol (cas n° 6).

2. Au décollage : figure 7

- quand on respecte les consignes pour le décollage, notamment la vitesse de rotation V_r en général supérieure à la vitesse de puissance nécessaire minimale hors effet de sol, on décolle en étant certain de disposer d'un excédent de puissance suffisant. Il doit permettre d'abord de voler hors effet de sol et ensuite d'accélérer en palier hors effet de sol afin d'atteindre la vitesse de montée optimale (appareils faiblement motorisés ou chargés) ;
- pour les avions confortablement motorisés, la vitesse de rotation V_r permet d'afficher la pente de montée dès que l'avion sort de l'effet de sol ;
- une tentative prématurée de décollage peut conduire à un vol au second régime en effet de sol. Malgré la pleine puissance appliquée, l'appareil ni n'accélère, ni ne monte, conformément au schéma décrit figure 6. La puissance est suffisante en effet de sol car la puissance nécessaire au vol y est moindre, mais insuffisante pour sortir de l'effet de sol ;
- une baisse de puissance au décollage (accident n°3) peut permettre le décollage en effet de sol mais pas d'en sortir ;
- une difficulté à s'élever après la rotation, surtout si la vitesse est inférieure à la vitesse recommandée, est une très probable indication d'un décollage prématuré et d'un vol en effet de sol. **L'interruption immédiate du décollage** est la seule issue possible avant de risquer plus gravement une sortie de l'effet de sol au second régime et un début de montée très dangereux. Voire pas de sortie de l'effet de sol et un vol au ras de la piste qui se termine par une sortie de piste (cas n°3 et 5).

DEUX CONSIGNES VITALES APRÈS UN DIAGNOSTIC DE VOL DANGEREUX EN EFFET DE SOL :

1. Je suis piégé en effet de sol à l'atterrissage, je procède aussitôt à une remise de gaz.
 2. Je suis piégé en effet de sol au décollage, j'interromps aussitôt le décollage.
- La piste est assez longue pour m'arrêter puisque j'ai calculé la distance Accélération/Arrêt lors de ma préparation car la piste me semblait limitative.

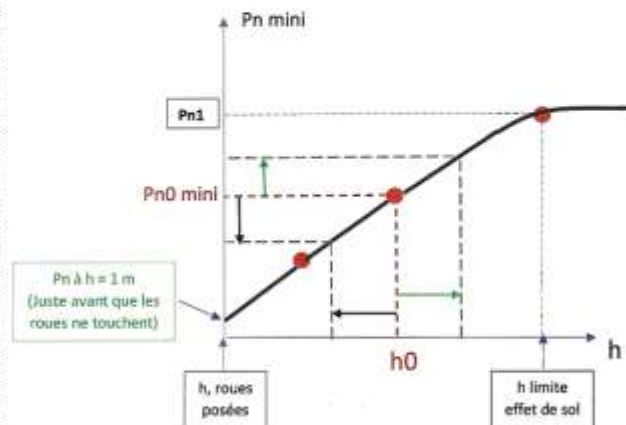


Figure 7. Principe de la « régulation-piège » de hauteur h en effet de sol, au décollage, en fonction de la puissance nécessaire au vol (points issus de la figure 4). Puissance utile P_u appliquée supposée constante :

- supposons le bilan des puissances au vol (Puissance nécessaire, Puissance utile) équilibré en effet de sol à la hauteur h_0 ;
- toute diminution de la hauteur diminue la nécessité de puissance (flèche noire). Puissance nécessaire supérieure à puissance utile, l'appareil remonte ;
- toute augmentation de la hauteur accroît la nécessité de puissance (flèche verte). Puissance nécessaire inférieure à puissance utile, l'appareil descend ;
- la hauteur se stabilise donc autour de h_0 , quasi régulée, empêchant ainsi l'appareil de pouvoir sortir de l'effet de sol et littéralement prisonnier au second régime en effet de sol.