BEA
Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

www.bea.aero

ETUDE DE SECURITE

Second régime de vol



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

BEA

TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction 3

2 Périmètre de l'étude 4

3 Le second régime de vol - théorie 5

3.1 Puissance nécessaire au vol ($\boldsymbol{Pn}$) 5

3.2 Puissance utile ($\boldsymbol{Pu}$) 5

3.3 Bilan propulsif 6

3.4 Régimes de vol 8

3.5 Symptômes associés au second régime 8

3.6 Sortie du second régime de vol 8

4 Scénario de passage ou maintien au second régime de vol 9

4.1 Vol de navigation en zone montagneuse 9

4.2 Maintien du second régime au décollage ou lors d'une interruption de l'atterrissage 11

5 Pistes de réflexion concernant la formation des pilotes 16

6 Synthèse - Passage au second régime lors d'un vol en région montagneuse 17

7 Synthèse – Maintien du second régime lors du décollage ou d'une remise de gaz 18

Bibliographie ..... - 19 -

BEA

1 INTRODUCTION

Parmi les accidents d'avions légers pour lesquels le BEA a ouvert une enquête entre 2019 et 2025, près d'une vingtaine sont attribués, de manière probable ou avérée, aux conséquences d'une évolution prolongée au second régime de vol. Cela représente 4 % des accidents d'avion de masse maximale au décollage inférieure à 2,25 t, en France, sur cette période. Ces accidents constituent toutefois 15 % des accidents mortels et contribuent à 21 % des victimes pour cette catégorie d'aéronef.

Ces accidents surviennent principalement dans deux contextes de vol :

- dans une phase normalement transitoire partant d'une faible vitesse (décollage ou interruption de l'approche ou de l'atterrissage) ;
- lors d'évolutions en région montagneuse.

Contrairement au décrochage, dont les manifestations sont généralement bien identifiées, le passage au second régime peut se faire de manière progressive. Le pilote conserve alors l'impression de maitriser son avion alors même que celui-ci évolue à une incidence élevée, avec un excédent de puissance devenu insuffisant pour accélérer et monter, avec parfois une faible réserve d'énergie.

Le second régime de vol est une notion abordée lors de la formation initiale des pilotes d'avion. Pourtant, les récentes enquêtes ont souvent mis en évidence des situations au cours desquelles les pilotes évoluaient au second régime sans en avoir conscience. Les témoignages recueillis auprès des pilotes montrent que plusieurs d'entre eux n'ont pas identifié qu'ils évoluaient au second régime de vol. Les difficultés rencontrées ont souvent été interprétées comme un manque de puissance moteur et une incapacité de l'avion à monter, sans que le lien avec l'évolution à forte incidence au second régime de vol ait été établi.

La présente étude a pour objectif de :

- rappeler les principales notions théoriques associées aux régimes de vol, les symptômes du second régime de vol et les actions nécessaires pour en sortir ;
- présenter les principaux contextes d'entrée au second régime de vol, les menaces et risques associés, ainsi que les facteurs contributifs les plus courants ;
- proposer des pistes de réflexion sur la formation des pilotes, en présentant les limites des méthodes pédagogiques actuelles au regard des situations réelles d'entrée au second régime de vol.

2 PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

L'étude s'intéresse aux accidents d'avions légers ayant fait l'objet d'une enquête de sécurité du BEA et durant lesquels l'avion évoluait au second régime de vol de façon probable, possible ou avérée.

Période	**2019-2025**
Catégories d'aéronefs	**Avions légers**
Catégorie d'événements	**Accidents**
Scénario	**Passage ou maintien au second régime de vol**
Autorité d'enquête	**BEA**

Au total, vingt accidents ont été recensés. Parmi ceux-ci :

- huit accidents sont survenus lors d'un vol en région montagneuse ;
- sept accidents sont survenus du décollage ou peu après ;
- cinq accidents sont survenus lors d'une interruption de l'approche ou de l'atterrissage.

Tous concernent des vols réalisés en aviation générale. Au total, douze d'entre eux ont eu une issue fatale.
Les témoignages des pilotes ayant survécu montrent que souvent, en raison notamment de connaissances insuffisantes, ils n'ont pas eu conscience que l'avion évoluait à forte incidence, au second régime de vol. Ils n'ont ainsi pas tenté de manœuvre de récupération. Les éléments recueillis au cours des enquêtes laissent supposer que ce constat est également valable pour les accidents mortels.

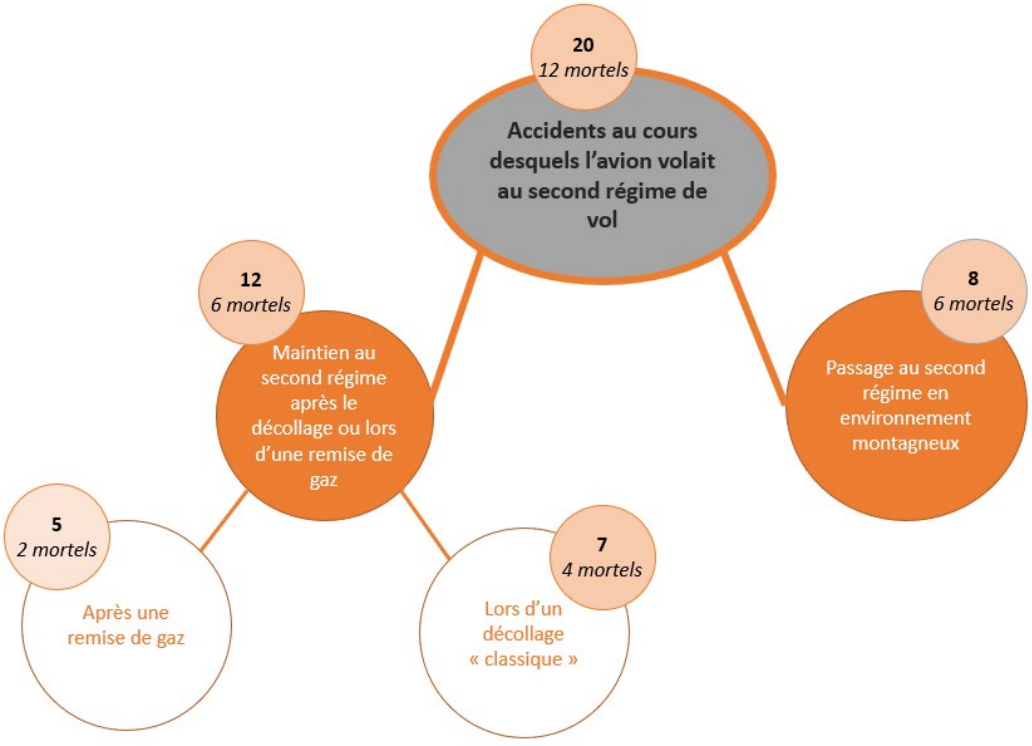


Figure 1 : accidentologie - second régime - 2019 – 2025

3 LE SECOND RÉGIME DE VOL - THÉORIE

Ce chapitre présente de manière synthétique la théorie du second régime. Les figures qui y sont présentées sont des représentations simplifiées à des fins pédagogiques. Les paragraphes 3.1, 3.2 et 3.3 reposent sur l'hypothèse que l'avion suit une **trajectoire rectiligne en palier**.

3.1 Puissance nécessaire au vol (P_n)

La **traînée d'un avion** (figure 2) est la somme de :

- **la traînée induite** qui résulte de la portance. Elle **augmente lorsque la vitesse diminue**, car le maintien du palier nécessite d'augmenter l'incidence ;
- **la traînée parasite** constituée de l'ensemble des forces de traînée qui ne sont pas liées à la portance. Elle augmente lorsque la vitesse augmente.

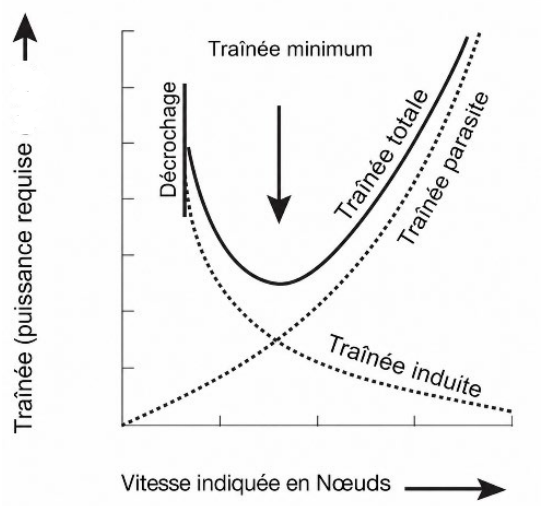


Figure 2 : évolution de la traînée en fonction de la vitesse air [1](source : ENAC)

Le **vol en palier stabilisé nécessite que la force de traînée soit compensée par la force produite par le groupe motopropulseur.** Ceci n'est possible que dans le domaine de vol où la **puissance nécessaire au vol (P_n) est inférieure ou égale à la puissance utile (P_u) maximale que le groupe motopropulseur peut délivrer**.
P_n est fonction de :

- la **densité de l'air**, donc de « l'**altitude-densité** » : l'altitude pression corrigée en fonction des variations de température et d'humidité par rapport à une atmosphère standard. L'altitude-densité augmente ou diminue de 120 ft pour 1 °C d'écart de température par rapport à une atmosphère standard. Plus l'altitude-densité est élevée, plus P_n augmente.
    - *Par exemple, un avion décollant d'un aérodrome au niveau de la mer (altitude de 0 ft), mais à une température de 35 °C, aura les performances associées à une altitude densité de 2 400 ft,*
- la **masse** de l'aéronef : plus la masse de l'avion est élevée, plus P_n augmente.

3.2 Puissance utile (P_u)

Le **groupe motopropulseur** est capable de **délivrer une puissance qui varie selon la vitesse de vol** et le régime du moteur :

[1] Dans l'ensemble des figures du document, la notion de vitesse est associée à la vitesse air.

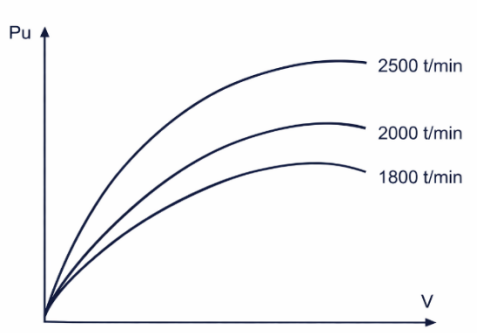


Figure 3 : courbe de puissance utile à différents régimes moteur avec une hélice à calage fixe

Pour un **moteur non équipé de système de suralimentation**, la **puissance utile diminue avec l'altitude-densité** :

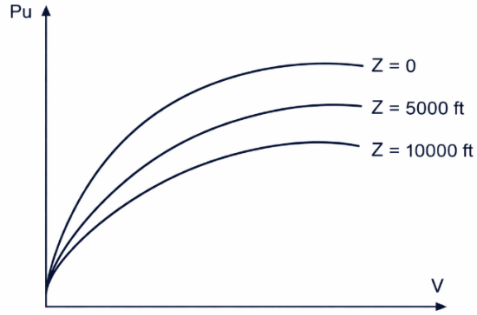


Figure 4 : courbe de puissance utile en fonction de l'altitude pression avec une hélice à calage fixe

3.3 Bilan propulsif

La superposition des courbes représentant $\boldsymbol{P_n}$ (courbe rouge) et $\boldsymbol{P_u}$ (courbe bleue) peut être représentée ainsi :

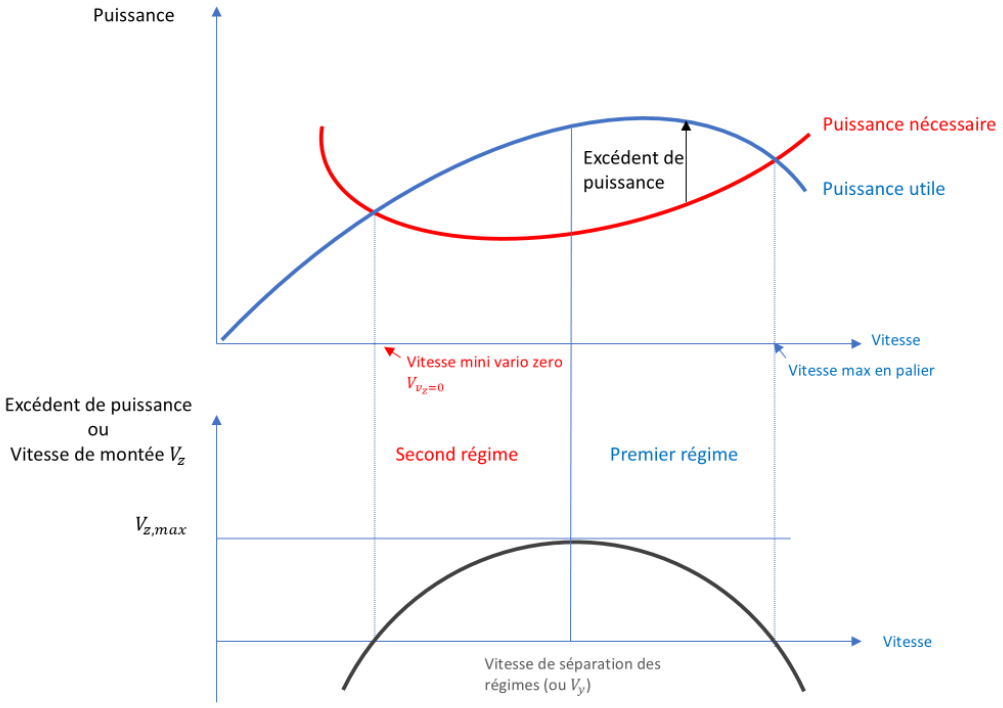


Figure 5 : régimes de vol d'un avion à une faible altitude densité (Source : BEA)

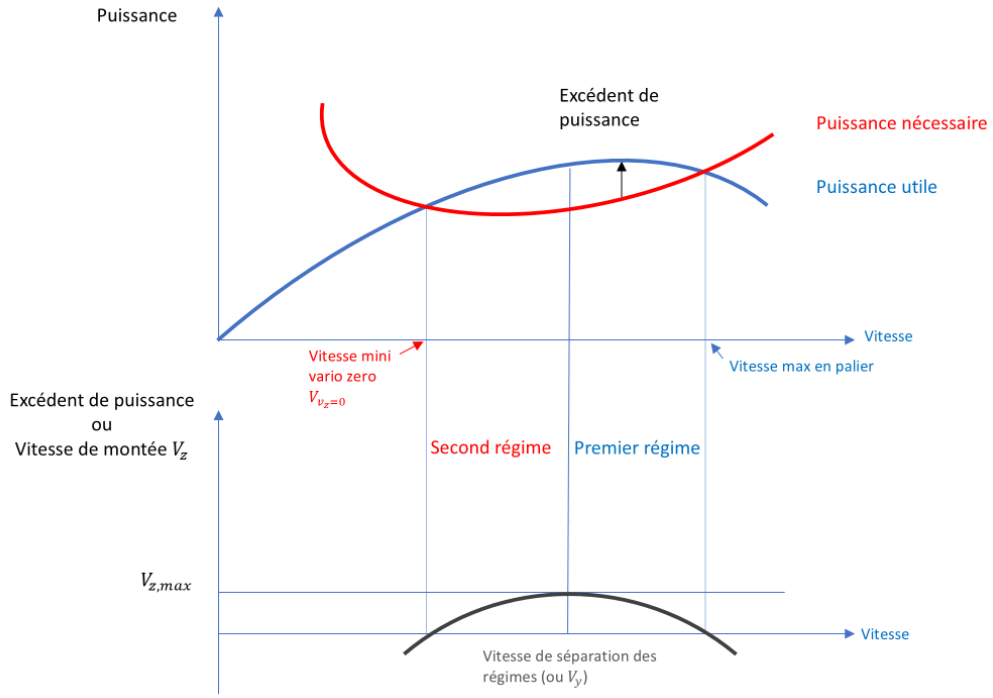


Figure 6 : régimes de vol d'un avion à altitude densité importante (Source : BEA)

La différence $\boldsymbol{\Delta P = P_u - P_n}$ est appelée **excédent de puissance.**
L'excédent $\boldsymbol{\Delta P}$ de puissance :

- diminue lorsque l'altitude-densité augmente ;
- diminue lorsque la masse de l'aéronef augmente ;

- dépend de la puissance maximale du moteur.

Le **taux de montée** (V_z) que l'on peut obtenir à une vitesse donnée est fonction de **l'excédent de puissance ΔP**.

3.4 Régimes de vol

Une des définitions possibles de la frontière entre le premier et le second régime de vol, pour un avion à moteur à piston, est le point d'excédent de puissance maximum.
La vitesse correspondant à l'excédent de puissance maximum équivaut à la vitesse de meilleur taux de montée (V_y).

Selon cette définition :

- **Dans le premier régime de vol** :

En palier, si la vitesse vient à diminuer, l'excédent de puissance ΔP augmente. L'avion a alors tendance à accélérer, ce qui réduit l'excédent de puissance. Si le palier est maintenu sans action du pilote sur la commande de puissance, l'avion reviendra à sa vitesse d'équilibre qui dépend de la position du compensateur de profondeur. On parle alors de stabilité en vitesse.
Également, en montée dans le premier régime de vol, une diminution de vitesse par une variation d'assiette à cabrer entraînera une augmentation de l'excédent de puissance et donc du taux de montée.

- **Dans le second régime de vol** :

Si la vitesse vient à diminuer, l'excédent de puissance ΔP diminue. Si le palier est maintenu sans action sur la commande de puissance, la vitesse continuera à diminuer. On parle alors d'instabilité en vitesse. Ainsi, le maintien d'une vitesse donnée nécessite une correction permanente de la part du pilote.
Si la vitesse passe en dessous de $V_{V_z=0}$, l'avion n'aura plus d'excédent de puissance disponible pour accélérer en vol horizontal.
En montée, dans le second régime de vol, une diminution de vitesse par une variation d'assiette à cabrer entraînera une diminution de l'excédent de puissance et donc du taux de montée.

3.5 Symptômes associés au second régime

Les « symptômes » du vol au second régime de vol sont :

- une **incidence élevée**, perceptible par le pilote à travers une assiette anormalement élevée par rapport aux préaffichages d'assiette usuels ;
- une **difficulté**, voire une **impossibilité, à monter ou maintenir le palier, malgré l'affichage d'une assiette et d'une puissance de montée ;**
- une **faible efficacité des gouvernes et de faibles efforts aux commandes** ;
- une **amplification des effets secondaires des gouvernes** ;
- une **amplification des effets moteurs** ;
- une **stabilité réduite autour des axes**.

Contrairement aux approches du décrochage, l'avion peut paraître stable et « glisser » sans vibrations, masquant l'urgence de la situation.

3.6 Sortie du second régime de vol

Pour sortir du second régime, il est nécessaire d'utiliser des transferts d'énergie :

- si une **réserve de puissance** est disponible, elle peut être utilisée pour **accélérer jusqu'à une vitesse dans le premier régime de vol** (conversion d'énergie chimique en énergie cinétique) ; *autrement dit, le pilote augmentera la puissance pour faire accélérer l'avion ;*
- si une **réserve de hauteur** est disponible, elle peut être partiellement utilisée **pour gagner de la vitesse et atteindre une vitesse dans le premier régime de vol** (conversion d'énergie potentielle en énergie cinétique) ; *autrement dit, le pilote diminuera l'assiette pour faire accélérer l'avion.*

Lorsque la puissance maximale est déjà affichée et que l'excédent de puissance est nul ou négatif, la seule solution pour sortir du second régime est de diminuer l'assiette pour accélérer.

4 SCÉNARIO DE PASSAGE OU MAINTIEN AU SECOND RÉGIME DE VOL

4.1 Vol de navigation en zone montagneuse

Au cours d'un vol, en dehors des phases de décollage et d'atterrissage, le passage au second régime de vol peut résulter d'une diminution progressive de la vitesse causée par une prise d'assiette excessive.
Huit accidents recensés par le BEA entre 2019 et 2025, dont six ont été fatals, se sont produits lors de vols en région montagneuse. Dans la totalité, les avions évoluaient en montée, entre les reliefs ou dans une vallée, les pilotes ayant l'intention de gagner de l'altitude pour franchir un col ou une ligne de crêtes.

Date	Immatriculation	Scénario
2025	Jodel D140 F-BMFV	Passage au second régime de vol, perte de contrôle, collision avec la surface d'un glacier, en montagne
2022	Jodel D140 F-HJLB	Passage au second régime, collision avec une haie d'arbres, incendie post-impact, lors d'un vol de découverte, en montagne
2021	DR400-140 F-GHYQ	Collision avec la cime des arbres au passage d'un col
2021	DR400-500 F-HMYY	Collision avec des arbres, incendie, lors d'un vol dans une vallée en zone montagneuse
2021	Flight Design CTLS-ELA F-HVAT	Tentative de demi-tour avant le passage d'un col, collision avec des arbres puis avec le sol, incendie, en instruction
2021	Cirrus SR20 D-EFCD et Cessna 172 D-EFTP	Collisions avec le relief dans une vallée, en montagne
2020	DR400-140 F-GSBS	Passage au second régime, collision avec le relief, feu post-impact, lors d'un vol BIA, en montagne
2019	Cessna 172 F-OKDV	Perte de contrôle en vol, collision avec le relief

Dans la plupart des accidents se produisant en montagne, le scénario est similaire. Le pilote s'approche du relief avec un avion ayant une pente de montée variant entre 5 et 10 %. La pente de la vallée survolée est souvent du même ordre ou supérieure. En extrémité de vallée, en approchant d'un col, d'un sommet ou d'une ligne de crête, la pente s'accentue fortement.
Le pilote, souvent non entraîné, se positionne naturellement au centre de la vallée, se privant ainsi de toute possibilité de faire demi-tour. Ce dernier devrait en effet être réalisé depuis un côté de la vallée afin de bénéficier de tout l'espace disponible, et se faire de manière anticipée à un moment où la hauteur et la réserve d'énergie sont encore suffisantes.

En l'absence d'horizon naturel, si le vol est poursuivi vers le col ou la ligne de crête, face à la pente montante du relief, le pilote aura tendance à augmenter progressivement l'assiette longitudinale de l'avion, de manière inconsciente. Ceci aura pour effet d'augmenter l'incidence de l'avion, et la traînée, et d'amener progressivement l'avion au second régime de vol (voir § 3).
À ce moment-là, il est possible que le pilote détecte une augmentation (très fugace) de la vitesse verticale. L'avion, au second régime de vol, évolue à une vitesse très faible et proche de la vitesse de décrochage. Le pilote sera alors confronté à toutes les contraintes liées au vol au second régime de vol, mais à basse hauteur, avec une faible réserve d'énergie. Les « portes de sortie » sont alors très limitées.
L'étude des accidents nous montre que, généralement, ce scénario se termine par une collision avec le relief à faible énergie ou par une perte de contrôle qui a souvent une issue fatale. Les accidents identifiés sont généralement survenus dans des conditions météorologiques et aérologiques favorables au vol.

4.1.1 Menaces du vol en montagne

Les menaces suivantes sont caractéristiques de ce type de vol :

- l'**absence d'horizon naturel**, référence principale de pilotage en vol à vue, limite les références visuelles extérieures pour estimer l'assiette ; le pilote doit adapter son circuit visuel pour continuer à veiller l'extérieur pour percevoir les obstacles et les trafics tout en contrôlant avec l'aide des instruments ses paramètres de vol ;
- **la variation des performances de l'avion selon l'altitude-densité :**
  Les calculs de performance au décollage et en montée doivent se faire à partir des données du constructeur et selon l'altitude-densité du jour. Pour rappel, l'altitude-densité augmente avec la température (voir § 3.1).
  Lorsque l'altitude-densité augmente (et donc que la densité de l'air diminue), les performances de l'aéronef diminuent. Les pilotes de montagne retiennent souvent qu'un moteur à pistons atmosphérique perd environ 10 % de sa puissance par 3 000 ft d'altitude. La perte de performances globale qui affecte le taux de montée est pour sa part bien supérieure et de l'ordre de 5 à 7 % par tranche de 1 000 ft.
  Le diagramme de Koch est également un outil empirique de sensibilisation qui permet d'estimer rapidement l'augmentation de la distance de roulage au décollage et la réduction du taux de montée selon les conditions de température et d'altitude par rapport aux valeurs standard.
  Par exemple, un avion en montée à une altitude de 3 000 ft, à une température de 34 °C, aura les performances associées à une altitude densité de 6 000 ft, soit un taux de montée de l'ordre de 50 % inférieur à celui obtenu au niveau de la mer à 15 °C.
  La FFA a publié une règle pratique permettant de détailler le calcul et l'impact sur les performances de décollage et d'atterrissage de l'altitude-pression et une règle pratique sur les performances de montée (et le vol en montagne) ;
- les **facteurs environnementaux** suivants peuvent altérer les perceptions visuelles et sensorielles :
  - la présence du relief autour de l'avion,
  - l'aérologie (vent, ascendances, descendances…),
  - la présence de neige, notamment lorsqu'elle recouvre le relief d'un manteau neigeux uniforme, qui prive également le pilote de références visuelles,
  - les conditions de luminosité et d'éclairement en fonction de l'heure ou de la position du Soleil.

4.1.2 Risques associés

La prise en compte insuffisante de ces paramètres ou facteurs peut conduire aux erreurs suivantes et ainsi augmenter le risque de passage au second régime de vol par une prise d'assiette excessive :

- une **surestimation des performances** de l'avion :

- sur la totalité des accidents enquêtés, l'altitude de l'avion en entrant dans la vallée ne permettait pas, avec la trajectoire choisie (souvent une route directe), de franchir le col avec une marge de sécurité suffisante compte tenu des performances de l'avion le jour de l'accident,
- quatre accidents sur huit se sont produits en été par de fortes chaleurs,

- des **erreurs de perception et d'estimation** concernant :
  - l'assiette de l'avion, pouvant conduire à une prise d'assiette excessive sans prise de conscience du pilote,
  - la pente de montée : les pilotes n'ont souvent pas conscience que la pente de montée de leur avion est faible au regard des pentes moyennes du relief. Ainsi, un avion montant avec une vitesse ascensionnelle de 500 ft/min à une vitesse sol de 80 kt suit une pente sol proche de 6 %. La pente moyenne d'une route de montagne qui épouse les lignes de niveau et qui souvent serpente est la plupart du temps supérieure à 12 %,
  - la vitesse air : la proximité du relief ainsi que le vent arrière peuvent donner une impression de « défilement rapide » et conduire à surestimer la vitesse air.

4.1.3 Autres facteurs contributifs

D'autres facteurs peuvent contribuer au passage au second régime lors d'un vol en montagne :

- une **gestion inadaptée de la trajectoire** ne permettant pas d'avoir à tout instant un dégagement possible ainsi qu'une « réserve d'énergie » ;
- une **surveillance inadéquate des paramètres de vol**. En effet, lors d'une formation montagne, l'instructeur s'attache à mettre en place des **circuits visuels spécifiques ;**
- une **préparation du vol insuffisante et une connaissance insuffisante du secteur de vol,** notamment de la topologie du relief (altitude, variations de pente), et des conditions météorologiques et aérologiques typiques du secteur (brise, direction du vent, etc.).

Six enquêtes sur les huit concernées ont mis en évidence des **connaissances insuffisantes** du pilote des techniques du vol en montagne, liée à une **expérience** globale ou récente du vol en montagne faible, voire inexistante.

4.1.4 Formation aux spécificités du vol en région montagneuse

Des fédérations (FFA, AFPM, FFPLUM via le Pôle national de vol montagne (PNVM)) ont édité des programmes de sensibilisation aux spécificités du vol en région montagneuse.

4.2 Maintien du second régime au décollage ou lors d'une interruption de l'atterrissage

Lors du décollage, un avion léger accélère jusqu'à la vitesse de rotation, vitesse à laquelle le pilote augmente l'assiette en tirant sur le manche. Cette vitesse de rotation se situe dans le second régime de vol. Immédiatement après le lever des roues, la disparition du frottement au sol et la persistance de l'effet de sol réduisent temporairement la traînée induite de l'avion. Au-dessus d'une hauteur équivalente à une envergure d'avion, l'effet de sol disparaît et l'incidence élevée engendre une traînée importante. Lors de la rotation, le pilote doit adopter une assiette permettant d'utiliser la puissance délivrée par le moteur pour accélérer jusqu'à la vitesse de montée choisie.

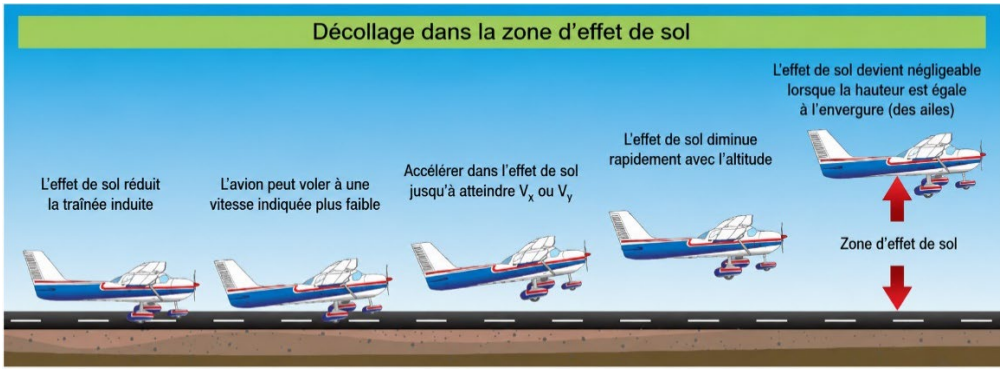


Figure 7 : décollage et effet de sol (Source : FAA, traduction BEA)

Douze accidents recensés par le BEA entre 2019 et 2025, dont six mortels, sont survenus à la suite d'un maintien au second régime de vol lors du décollage ou d'une interruption de l'atterrissage.

Date	Immatriculation	Scénario
2024	DR400-160 F-GLKL	Maintien du second régime de vol lors du décollage, collision avec le sol, incendie post-impact, lors d'un vol de découverte
2024	FFA AS 202 F-GSTL	Maintien probable au second régime de vol après le décollage, collision avec la végétation
2024	DR 400-160 F-GREP	Tentative de décollage, vibrations à la rotation, rebonds, sortie longitudinale de piste
2023	PA-28 F-HDYN	Interruption de l'atterrissage, vol au second régime, collision avec des obstacles situés après l'extrémité de piste, lors d'un vol local à titre onéreux
2023	Europa F-PHRC	Interruption de l'approche, perte de contrôle, collision avec le sol
2023	DR 400-140 F-GGJS	Arrondi manqué, interruption de l'atterrissage, perte de contrôle, collision avec une clôture
2022	DR 400-160 F-HACQ	Interruption de l'atterrissage, perte de contrôle, collision avec le sol, incendie
2022	DR 500 F-HSOO	Perte de contrôle après le décollage, collision avec des arbres, incendie
2022	DR 400-120 F-GXYZ	Décrochage en montée initiale, collision avec le sol, lors d'un vol à frais partagés
2020	P180S F-PYKT	Collision avec le sol en montée initiale, feu à l'impact
2020	DR 400-120 F-GIKZ	Décollage en dehors des limites de masse et centrage, maintien du second régime de vol lors de la montée initiale, perte de contrôle en vol, collision avec le sol, incendie
2019	Cessna 172 F-GEJD	Perte de contrôle en virage lors de la montée initiale effectuée dans la zone critique du second régime de vol, collision avec le sol, incendie

4.2.1 Menaces lors de phase de décollage ou lors d'une interruption de l'atterrissage

Les phases de décollage et d'interruption de l'atterrissage sont particulièrement sujettes aux menaces suivantes :

Menaces liées aux performances de décollage et de montée :

Les performances de décollage (distance de roulement et de décollage) et de montée (taux et pente de montée) peuvent être très différentes d'un avion à un autre, en fonction, en particulier, de l'aérodynamique de chaque aéronef, de sa masse, de sa motorisation, de ses équipements (volets, hélice à pas variable…).

Mais elles peuvent aussi fortement varier, pour un même aéronef, selon plusieurs paramètres dont :

- **l'altitude-densité** (voir §§ 3.1 et 4.1.1) ; il est souvent retenu qu'une augmentation de 1 000 ft d'altitude-pression implique une augmentation de 10 % de la distance de décollage. *Par exemple, un avion décollant d'un aérodrome au niveau de la mer, à une température de 35 °C, aura les performances associées à une altitude densité de 2 600 ft, soit une distance de décollage d'environ 26 % supérieure à celle au niveau de la mer à 15 °C ;*
- **la masse au décollage de l'aéronef ;** il convient de la calculer en fonction de la masse à vide et de la charge embarquée (carburant, occupants et bagages) et de déterminer les distances de roulement, de décollage et les pentes de montée à cette masse à partir de la documentation du constructeur ;
- **l'état de la piste de décollage** qui a également un impact sur le coefficient de frottement de l'avion au sol et donc sur ses performances de décollage. Les constructeurs donnent généralement des coefficients à appliquer sur le calcul des performances selon l'état de la piste dans le manuel de vol. Dans certains cas, l'état de la piste (boue, herbe haute et mouillée, neige…) ne permettra pas à l'avion de décoller ;
- **le vent et l'aérologie locale** qui peuvent avoir un impact positif ou négatif sur les performances au décollage et en montée. Les constructeurs donnent généralement aussi des coefficients à appliquer sur le calcul des performances selon le vent effectif ;
- **un éventuel freinage résiduel**

Lors de l'interruption de l'approche, **le temps nécessaire au passage d'une pente d'approche à une pente de montée** (constatée par l'augmentation de l'altitude indiquée) peut atteindre **plusieurs dizaines de secondes**. Cette durée dépendra des mêmes paramètres que pour le décollage et la montée, des caractéristiques de l'avion, mais aussi de la rapidité de reconfiguration de l'avion (réchauffage carburateur, pas d'hélice, rentrée des volets ou rentrée des trains).

On peut noter que pour les accidents identifiés :

- dans **dix des douze accidents cités, les performances de l'avion au décollage étaient dégradées par un ou plusieurs des paramètres évoqués ci-dessus et étaient plus faibles que celles attendues par le pilote ;**
- la majorité ont eu lieu avec des avions légers avec un rapport poids puissance relativement élevé, c'est-à-dire avec un excédent de puissance faible.

Menaces liées à l'environnement :

Des facteurs liés à l'environnement peuvent contraindre la trajectoire de décollage ou de remise de gaz, tels que :

- la présence **d'obstacle dans la trouée d'envol ;**
- la présence de **relief à proximité de l'aérodrome ;**

- **la piste en pente ou courte.**

4.2.2 Risques associés

L'absence de prise en compte des paramètres précédemment mentionnés, ou une estimation erronée de ces paramètres, peut conduire à des **erreurs dans l'évaluation des performances de décollages et ascensionnelles de l'avion**.

Au **décollage**, le maintien au second régime de vol résulte en général d'une ou plusieurs de ces actions :

- une **variation d'assiette longitudinale à cabrer ou un taux de tangage excessif,** après la rotation, conduisant à une baisse de la vitesse ;
- une **rotation effectuée à une vitesse inférieure à la vitesse de rotation**. L'excédent de puissance disponible peut être négatif ou nul et ne pas permettre d'accélérer vers la vitesse de montée ;
- un **excédent de puissance trop faible** lié à la réalisation d'un vol avec des **performances trop limitées aux conditions du jour** (altitude-densité élevée, masse de l'avion importante, longueur de piste disponible limitée, terrain meuble, piste en pente positive, etc.).

Lors du roulement au décollage, lorsque l'avion n'a pas les performances attendues, la décision d'interrompre le décollage peut être difficile à prendre, et la focalisation du pilote sur le décollage peut contribuer à effectuer une rotation avec une vitesse insuffisante.

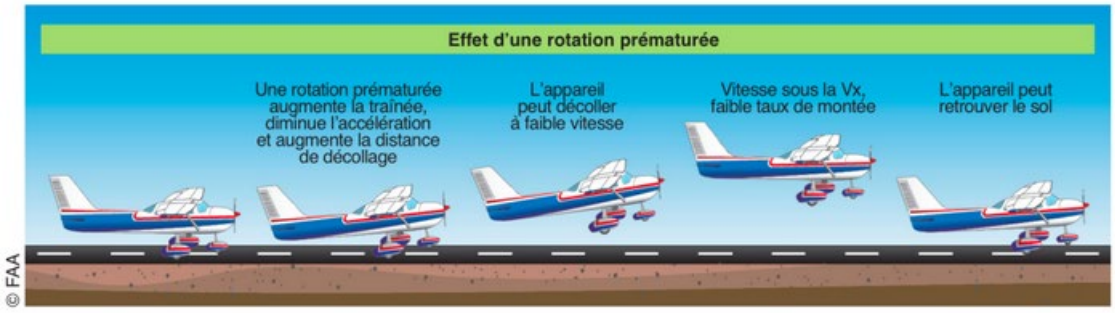


Figure 8 : illustration de l'effet d'une rotation prématurée (Source : FAA, traduction BEA)

Lors d'**une interruption de l'atterrissage**, le maintien au second régime peut résulter **d'une variation d'assiette à cabrer trop rapide ou trop importante** compte tenu des performances et de la configuration de l'avion.

4.2.3 Autres facteurs contributifs

Lors du décollage ou d'une interruption de l'approche, d'autres facteurs peuvent également contribuer à un maintien au second régime tels que :

- une **surveillance insuffisante des paramètres de vol** à travers les circuits visuels primaires (assiette, vitesse indiquée, altimètre) et secondaires (assiette, puissance moteur, taux de montée, symétrie) qui peuvent rendre difficile l'identification d'une évolution au second régime. Un contexte particulier du vol (vol à frais partagés, vol à titre commercial, présence de passagers) peut contribuer à une dispersion de l'attention ;
- une **configuration inadaptée de l'aéronef** (compensateur, volets, train d'atterrissage, réchauffage carburateur, pas d'hélice, etc.) qui peut affecter les performances de décollage et de montée tout en réduisant l'excédent de puissance disponible ;

- un **centrage proche, voire en dehors, des limites du manuel de vol**, modifiant le comportement de l'avion ;
- un moteur qui ne délivre pas la puissance prévue en raison d'un éventuel dysfonctionnement.

5 PISTES DE RÉFLEXION CONCERNANT LA FORMATION DES PILOTES

Lors de la formation du pilote d'avion léger, le second régime de vol est évoqué à plusieurs reprises :

- lors de l'apprentissage du vol lent, durant lequel les élèves sont amenés à constater la puissance propre au second régime de vol ainsi que la faible vitesse indiquée associée ;
- parfois, lors d'exercices de décrochage.

Cependant, les **caractéristiques du vol lent et les effets associés sont la plupart du temps démontrés lors de vols réalisés en palier, avec une hauteur permettant de garantir la sécurité du vol**.

Les accidents analysés dans cette étude montrent que :

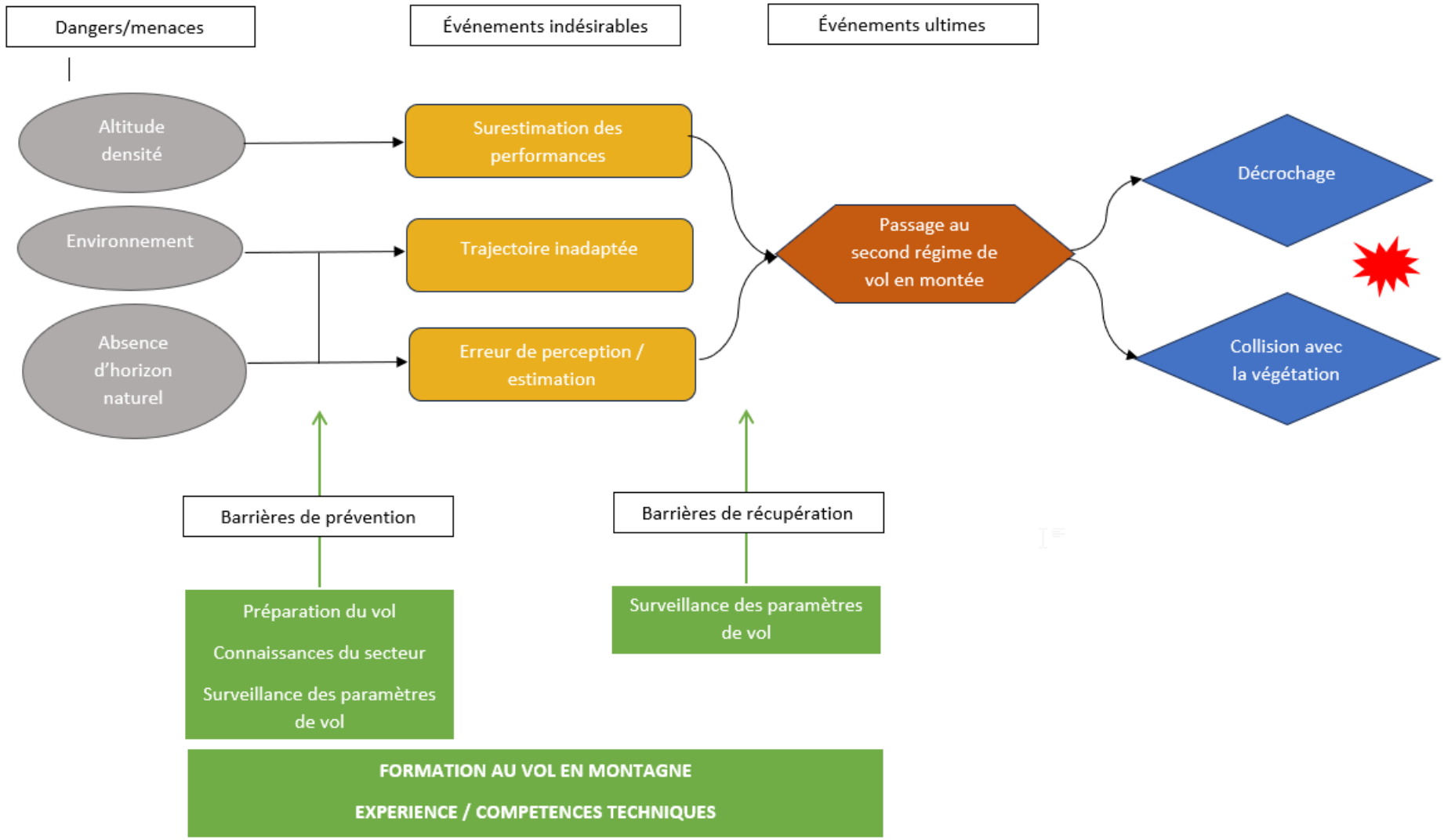
- le passage progressif au second régime peut avoir lieu en montée, notamment lors d'une interruption d'approche ou lors d'un vol en région montagneuse à **pleine puissance** ;
- le maintien au second régime de vol peut avoir lieu au décollage à la suite d'une rotation prématurée, d'une prise d'assiette excessive ou de performances insuffisantes, **malgré l'affichage de la puissance maximale.**

Lorsque le pilote entre dans la zone critique du second régime proche du sol, la faible marge de hauteur peut ne pas être suffisante pour en sortir.
Les exercices proposés lors de la formation au pilotage de base, notamment la leçon concernant le vol lent, **ne couvrent pas complètement ces situations.** En particulier, les exercices sont réalisés à altitude constante et à une puissance inférieure à la puissance maximale.
À ce titre, plusieurs pistes de réflexion pourraient être envisagées :

- renforcer la sensibilisation des pilotes sur les risques associés aux différentes phases de vol énoncées précédemment ; il pourrait être envisagé de présenter en formation les scénarios types exposés dans cette étude, afin d'illustrer les mécanismes conduisant au passage ou au maintien au second régime selon les différentes phases de vol ;
- développer des supports pédagogiques permettant de démontrer l'évolution du taux de montée en fonction de la vitesse indiquée et d'illustrer le passage progressif au second régime en montée. Afin de limiter les risques associés, l'instructeur pourrait adapter les vitesses d'évolution aux caractéristiques de chaque aéronef et à l'environnement d'évolution ;
- envisager, lorsque cela est pertinent, des exercices pratiques. Compte tenu des risques associés aux évolutions à faible vitesse et à pleine puissance, leur mise en œuvre devrait toutefois faire l'objet d'une évaluation préalable pour assurer leur réalisation en sécurité en tenant compte notamment du type d'aéronef, des compétences de l'instructeur et des conditions environnementales.

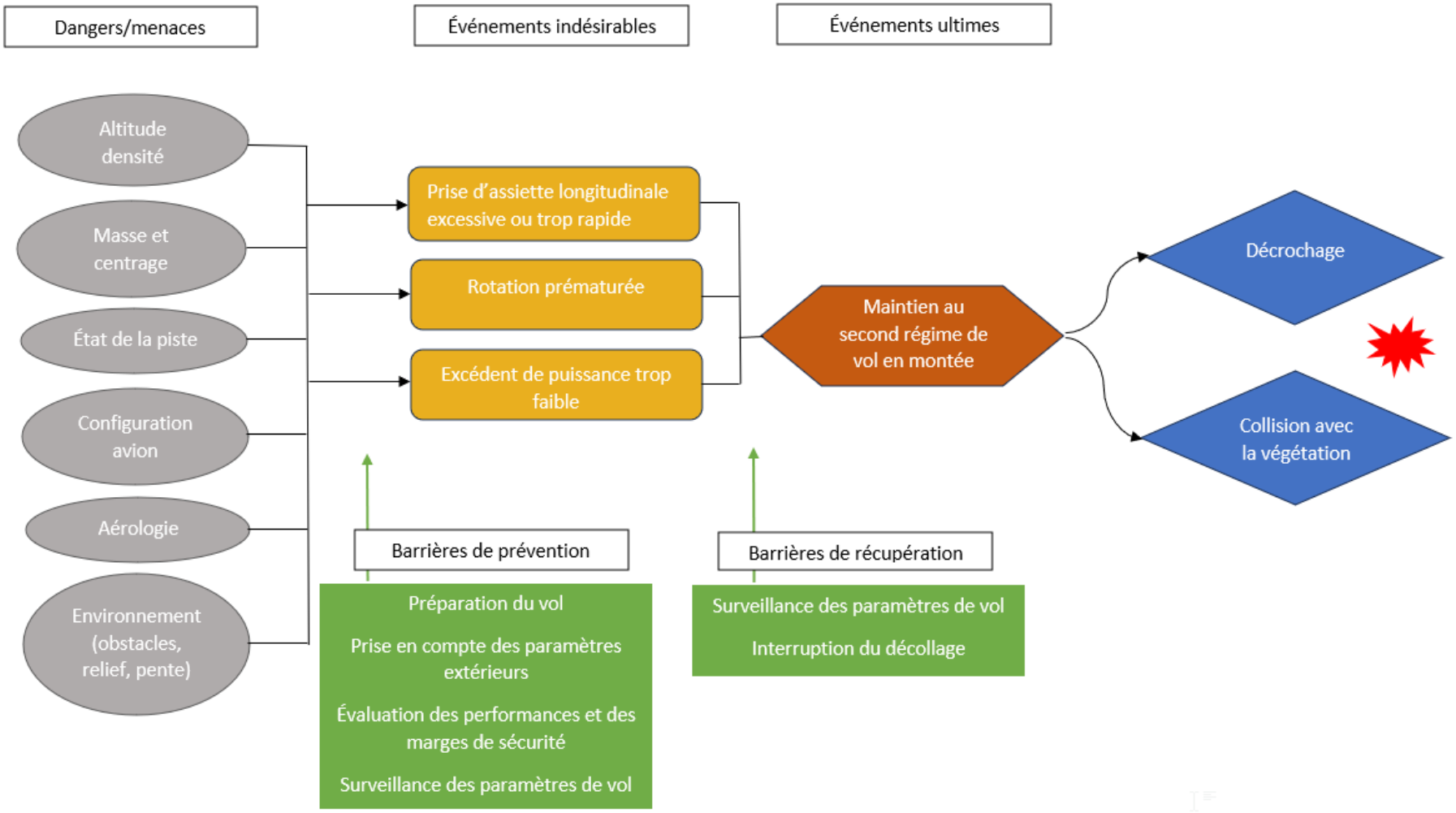
En aviation commerciale, à la suite de nombreux accidents consécutifs à une perte de contrôle, un guide destiné à la formation des pilotes professionnels a été édité par l'OACI. Il contient notamment les concepts de transfert d'énergie lors des évolutions. Une telle formation adaptée à l'aviation légère pourrait être envisagée pour les pilotes privés.

6 SYNTHÈSE - PASSAGE AU SECOND RÉGIME LORS D'UN VOL EN RÉGION MONTAGNEUSE



BEA

7 SYNTHÈSE – MAINTIEN DU SECOND RÉGIME LORS DU DÉCOLLAGE OU D'UNE REMISE DE GAZ



BIBLIOGRAPHIE

Les documents et livres suivants ont soit servi à la rédaction de la partie 3 de cette étude, soit peuvent être un complément pour le lecteur qui voudrait approfondir le sujet.

AGNOUX, Daniel. Le vol en montagne expliqué au pilote. Paris : Éditions Cépaduès.

GIBELLI, François. Navigation aérienne en montagne : Comprendre les menaces, éviter les erreurs. Toulouse : Éditions Cépaduès,

BARRY, Michel. « Les pièges du second régime ». Info Pilote, n° 731, février 2017.

Collectif. Manuel du pilote d'avion. Toulouse : Éditions Cépaduès.

Collectif. Le guide pratique du pilotage. Toulouse : Éditions Cépaduès.

ENAC. Guide de l'instructeur. Toulouse : École Nationale de l'Aviation Civile.

ASSOCIATION FRANÇAISE DES PILOTES DE MONTAGNE (AFPM). Documentation ATO – vol en montagne et formation pilote. Portail AFPM – Association Française des Pilotes de Montagne.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Airplane Flying Handbook. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration,

- Ch. 4 : "Energy Management: Mastering Altitude and Airspeed Control"
- Ch. 5 : "Maintaining Aircraft Control: Upset Prevention and Recovery Training".

CIVIL AVIATION AUTHORITY (CAA) of New Zealand. Wellington : CAA of New Zealand,

- Good Aviation Practice: Mountain Flying.
- Take-off and Landing Performance.