



RÈGLES PRATIQUES

PERFORMANCES DE MONTÉE & VOL EN MONTAGNE

21/06/2022

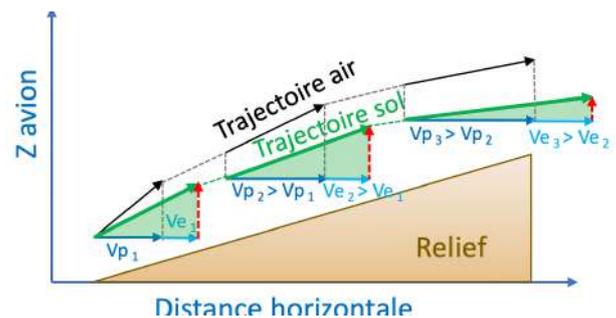
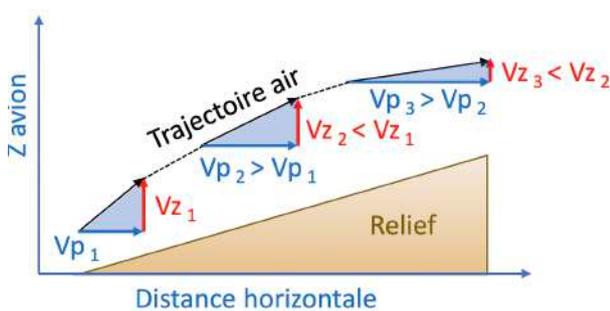
Constat initial : Chaque année, un certain nombre d'événements de sécurité surviennent en milieu montagneux. Ils mettent pour la plupart d'entre eux en évidence le fait que le pilote a fortement surestimé les performances de montée de son aéronef et sa capacité à s'affranchir du relief avec une marge de sécurité suffisante. Cette fiche a en conséquence pour objectif d'attirer l'attention des pilotes, sur quelques éléments de sécurité liés à l'utilisation d'un aéronef en montée dans le milieu montagneux. Le contenu abordé au sein de ce document n'est cependant pas exhaustif et sa lecture pourra utilement être complétée par celle de la RP « Pilotes de plaine et vol en montagne ».

Élément n° 1 : La vitesse est la base de la montée

✚ Pour un aéronef, le vol en montée est caractérisé par plusieurs vitesses :

- la vitesse indiquée **Vi** choisie puis suivie par le pilote, paramètre qu'il maintient généralement constant. En dehors des besoins liés au franchissement des éventuels obstacles au décollage, le pilote opte la plupart du temps dans le cadre de la montée pour la Vi qui correspond à celle pour laquelle des performances détaillées sont publiées au Manuel de vol de son aéronef, à savoir la **Vi de Vz max** ;
- la vitesse verticale **Vz** obtenue à cette Vi, **paramètre subi** et doublement variable, d'abord parce qu'il est impossible à l'usage d'obtenir quelle que soit l'altitude les mêmes valeurs que celles inscrites au Manuel de vol (performances obtenues par un pilote d'essai sur un avion neuf), et ensuite parce que cette Vz ne peut que diminuer de façon régulière au fur et à mesure de la montée en altitude (influence significative de l'altitude densité) ;
- la vitesse propre **Vp** correspondant à cette Vi, paramètre qui au contraire de la Vz, augmente progressivement à raison de + 1 % par tranche de 600 ft et/ou par tranche de + 5° C d'écart par rapport à la température standard au même niveau ;
- la vitesse sol **V sol** résultant du vent effectif positif **Ve** éventuellement subi pendant la montée et qui vient s'ajouter à la Vp. Tout comme la Vp, le Ve est évolutif avec l'altitude et tend généralement à augmenter, y compris lorsqu'il s'agit d'une simple brise de type « brise de vallée montante ».

✚ Le rapport Vz (ft/min) / Vp (kt) caractérise la **pente air** (%) de l'aéronef. Comme la Vz diminue au fur et à mesure de la montée alors que la Vp augmente, la pente air ne peut faire autrement que de diminuer de façon encore plus significative que le pilote peut être amené à le penser initialement (cf. figure suivante à gauche). Le rapport Vz (ft/min) / Vs (kt) caractérise pour sa part la **pente sol** et lorsque le vent est arrière et se renforce avec la montée en altitude, la pente sol devient automatiquement plus faible que la pente air (cf. figure suivante à droite), ce qui ne peut que nuire encore davantage au gradient de montée (altitude gagnée par NM parcouru).



Caractérisation du vol en montée effectué à Vi constante.

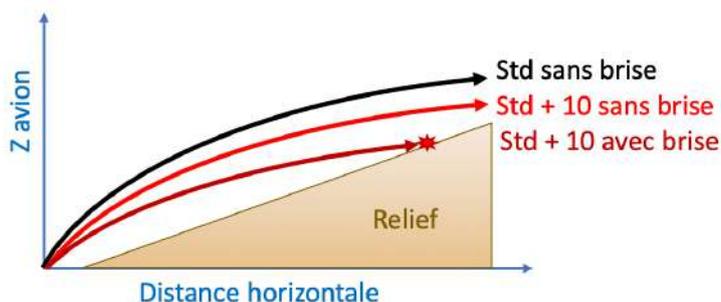
Élément n° 2 : Les ordres de grandeur

✚ Un pilote se doit de connaître les ordres de grandeur liés aux performances de son aéronef, afin d'avoir une vision objective de sa capacité à remplir correctement ou non la mission qu'il lui fixe. Tout comme les performances de l'être humain deviennent de plus en plus limitées au fur et à mesure de sa montée en altitude et/ou de sa confrontation à une atmosphère plus chaude ou plus humide, celles de son aéronef subissent elles aussi une décroissance plus ou moins prononcée fonction de l'altitude densité.

✚ Si un moteur non suralimenté perd généralement et de façon quasi linéaire environ 3 % de puissance par tranche de 1000 ft d'altitude (i.e. il aura perdu 30 % de sa puissance disponible à 10 000 ft), la perte de performances qui affecte la Vz est pour sa part bien supérieure et davantage de l'ordre de **5 à 7 % par tranche de 1000 ft** (e.g. un Robin DR 400/180 voit par exemple sa Vz décroître de façon linéaire de 885 ft/min au niveau de la mer à 415 ft/min au FL 100, soit une perte nette de 53 % de sa Vz initiale).

✚ S'y ajoute bien entendu l'éventuelle pénalisation complémentaire liée au vol dans une atmosphère plus chaude que la standard. Cette pénalisation supplémentaire, de l'ordre de **4 % par écart de 10° C** au-dessus de la température standard, est susceptible d'engendrer au final une **pénalisation globale des performances de montée** de l'aéronef de l'ordre de **9 à 11 % par tranche de 1000 ft**. Et c'est tout particulièrement l'été, alors que les aéronefs évoluent en remontée de vallée le long des versants ensoleillés dont l'air s'est réchauffé par convection, qu'ils sont le plus souvent confrontés à des performances de montée de plus en plus dégradées et qui n'ont malheureusement pas été suffisamment anticipées lors de la préparation du vol. Pour finir, un **abaissement du plafond pratique** de l'aéronef de l'ordre de 1000 ft est également à prendre en considération pour chaque tranche de +10° C d'écart par rapport à la température standard.

✚ Au cours de la montée, l'avion est également amené à subir l'influence du vent (tendance naturelle à se renforcer avec l'altitude) ou celle des différents régimes de brise (brise de vallée montante notamment). Lorsque le vent provient du secteur arrière, un infléchissement de la trajectoire est alors à prévoir et il se doit bien entendu d'être anticipé (cf. figure suivante).



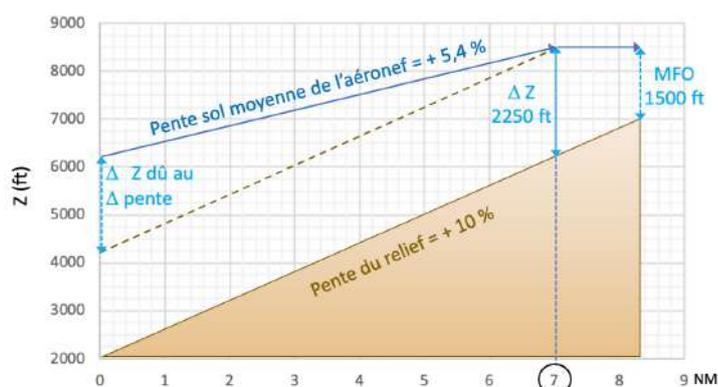
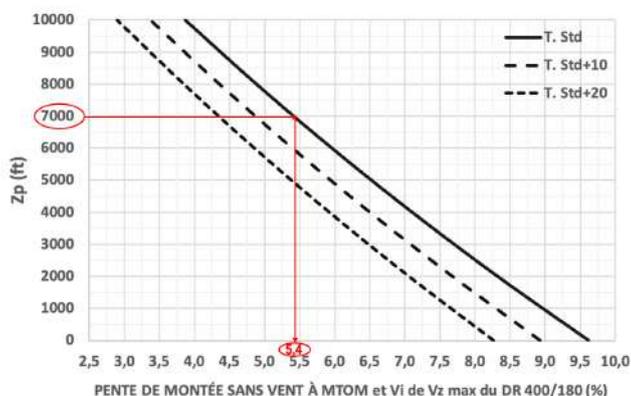
Trajectoire de montée d'un aéronef léger en fonction de variables subies (vent effectif V_e , température + élevée que la T. standard).



Élément n° 3 : Pente aéronef vs pente du terrain

✚ Tout relief montagneux est caractérisé par une pente ascendante dont le pilote peut aisément prendre connaissance, *via* la carte IGN *ad hoc* ou grâce aux fonctions d'affichage du profil altimétrique dont sont dotées aussi bien les applications généralistes que les applications spécialisées dans la préparation des vols. C'est la valeur de la **pente moyenne du relief** qui doit intéresser tout particulièrement le pilote, afin qu'il puisse la comparer à la valeur de **pente sol moyenne** escomptée pour son aéronef pendant la montée. En effet, seule la comparaison de données de même nature est à-même de permettre au pilote de calculer la marge d'altitude nécessaire au point de début de montée, **qui puisse lui garantir le franchissement effectif du relief sur l'intégralité de sa trajectoire**.

✚ Les Manuels de vol ne fournissent pas les courbes de variation de la pente de montée des aéronefs mais il est néanmoins fortement conseillé aux pilotes désireux d'emprunter des itinéraires les amenant à monter pour survoler le relief, d'établir au préalable un abaque qui leur permette de déterminer de façon simple leur pente moyenne de montée (cf. exemple du DR 400/180, figure suivante à gauche). À partir du ΔZ correspondant au Δ de pente entre celle du relief et celle de l'aéronef, ils pourront ainsi en déduire facilement l'altitude minimale requise au début de la montée (rappel : un Δ de pente de 1 % engendre un ΔZ de 60 ft par NM de distance parcourue).



Exemple de mise en oeuvre : Un jour où le QNH est de 1013 hPa et la température standard, le pilote d'un DR 400/180 souhaite remonter sur toute sa longueur (8,3 NM), une vallée montagneuse de pente moyenne 10 %, dont l'aval est à $Z_t = 2000$ ft et le sommet à $Z_t = 7000$ ft. Il se fixe pour objectif de franchir le col situé au sommet avec une marge verticale de 1500 ft et d'atteindre cette altitude de franchissement 1,3 NM avant le col. Le vent, tant dans la vallée qu'en altitude, est nul.

Quelle est l'altitude minimale d'entrée dans la vallée qui permette au pilote d'obtenir la marge souhaitée au point sélectionné ?

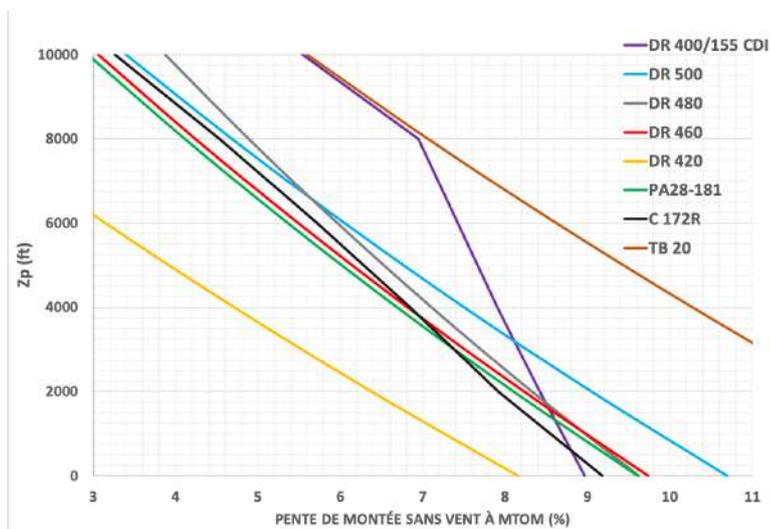
Résolution : Z_p aéronef à 7 NM = 8500 ft et $\Delta Z = 2250$ ft au même point. La pente de montée du relief (+ 10 %) étant plus importante que celle de l'aéronef à toutes les Z_p , Z_p en entrée de vallée doit obligatoirement être largement supérieure à 4250 ft. En 1^{ère} approximation, elle est donc prise égale à 5500 ft. Pour une Z_p moyenne estimée de 7000 ft pendant la montée et aux conditions du jour (T . Std et $V_e = 0$), l'abaque donne une pente de montée de 5,4 %. Au Δ de pente de 4,6 % entre celle du sol et celle de l'aéronef, correspond un ΔZ de $4,6 \times 60 \times 7 \approx 2000$ ft.

La marge verticale en entrée de vallée doit donc être de $2000 + 2250 = 4250$ ft et la Z de début de montée à cet endroit de 6250 ft minimum. **Il est fondamental de déterminer et de noter cette Z sécurisée sur le log de nav.**

Élément n° 4 : Les bonnes pratiques



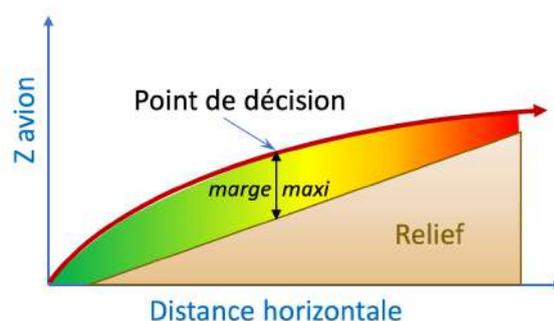
Ne pas penser qu'un moteur plus puissant permet obligatoirement d'obtenir des performances de montée meilleures et qu'un certain relâchement dans la préparation du vol peut ainsi s'opérer. Une comparaison des données issues des Manuels de vol de plusieurs modèles d'aéronefs montre par exemple qu'à la MTOM, du niveau de la mer jusqu'au FL 100, tant les DR 400/160, 180 et 200 CV que les PA28 ou C172 suivent quasiment les mêmes pentes de montée (cf. graphique ci-contre). On observe aussi que quelle que soit la puissance du moteur (e.g. DR 400 de 120 CV comme TB 20 de 250 CV), la diminution de la pente de montée est quasi identique et de l'ordre de 0,8 % par 1000 ft. On notera enfin que les moteurs suralimentés subissent eux aussi une diminution de même amplitude, mais seulement à partir de l'altitude dite « critique » (e.g. FL 80 pour le DR 400/155 CDI, cf. graphique ci-dessus).



Quelle que soit la masse estimée de l'aéronef, **utiliser systématiquement les performances publiées les plus pénalisantes** c'est-à-dire celles qui correspondent à la masse maximale, en leur affectant comme il est d'usage pour les performances au décollage, **un coefficient de sécurité** (e.g. « si la V_z moyenne décollant du Manuel de vol ressort à 600 ft/min, je retiens par sécurité pour mes calculs une V_z de 500 ft/min seulement »). En effet, pour obtenir les performances de V_z max publiées par le constructeur, il est nécessaire de diminuer progressivement la V_i au fur et à mesure de la montée (ordre de grandeur de -0,5 à -1 kt de V_i par 1000 ft), ce que seuls les pilotes d'essai sont amenés à faire en pratique dans le cadre du processus de certification. La V_i de V_z max du C172 R est par exemple donnée pour 79 kt au niveau de la mer et 69 kt à $Z_p = 12\ 000$ ft. Un pilote de plaine qui utilise pendant l'intégralité de la montée vers ou dans le relief, la V_i du Manuel de vol correspondant au seul niveau de la mer, voit ainsi les performances de montée de son aéronef se dégrader de plus en plus eu égard à celles qu'il croyait obtenir en théorie. De même, la turbulence éventuelle rencontrée pendant la montée exerce une influence non négligeable sur la symétrie du vol, ce qui handicape d'autant plus la V_z moyenne.



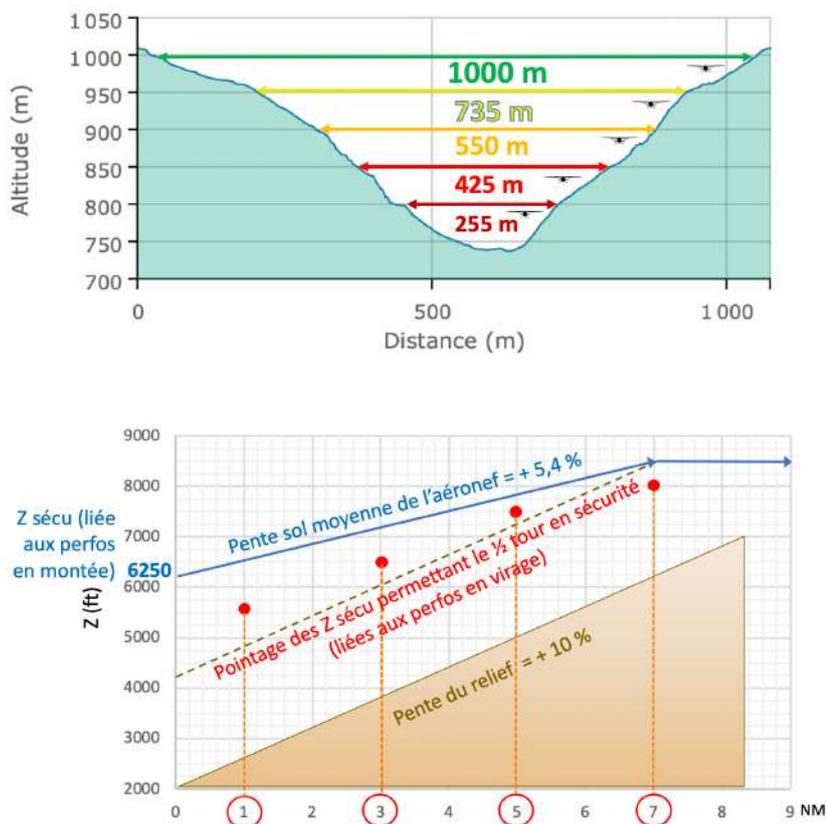
Établir systématiquement **un point de décision dans la montée**, qui permette de ne pas se retrouver « piégé » involontairement et dans l'impossibilité de faire demi-tour. La nécessité d'établissement de ce point provient du fait que la trajectoire réelle d'un aéronef en montée s'apparente à un arc de parabole et que dans un premier temps, l'augmentation progressive de la marge verticale au relief peut laisser croire au pilote non averti qu'il en sera ainsi jusqu'à la fin de la montée (cf. figure ci-contre). Le resserrement naturel progressif des vallées vers l'amont, associé à la diminution subie de la marge de survol du relief dans la 2^{ème} moitié de la montée, induit en effet le risque de ne plus pouvoir procéder à un ½ tour lorsque le pilote s'apercevra qu'il ne pourra atteindre l'altitude désirée à l'endroit qu'il s'était fixé.



Si la remontée d'une vallée est envisagée, toujours vérifier dans le cadre de la préparation du vol et à l'aide des outils adéquats, **sa largeur en différents points et à différentes altitudes**, en la comparant au diamètre nécessaire à la réalisation d'un demi-tour (cf. figure page suivante, établie directement à partir du profil altimétrique en coupe d'une vallée donnée). Il est évident que le pilote doit prendre en compte **une marge de sécurité conséquente** permettant la réalisation effective de ce ½ tour (l'aéronef ne rase pas la paroi en remontant la vallée, de même qu'il ne doit pas raser le versant opposé en sortie de virage). Cette marge de sécurité ne doit cependant en aucun cas l'inciter à voler au centre de la vallée, ce qui est pourtant tentant étant donné que c'est au centre que la marge verticale au relief est maximale.

La prise en compte d'une marge latérale supplémentaire équivalente à 30 % du diamètre nécessaire au ½ tour semble communément admise. Cette vérification s'avère d'autant plus nécessaire que les versants latéraux d'une vallée ont toujours une pente largement supérieure à celle de la vallée elle-même. Le pilote doit également avoir en tête qu'à V_i et inclinaison données, le diamètre nécessaire à un ½ tour augmente nécessairement avec l'altitude, suite à l'augmentation de V_p (e.g. un ½ tour réalisé à $V_i = 80$ kt et inclinaison 30° a un diamètre de 600 m au niveau de la mer mais de plus de 800 m à 10 000 ft d'altitude). Une fois les Z mini de passage en différents endroits déterminées, le pilote devra les reporter sous forme de simples points sur un abaque gradué en distance d'un côté et en altitude de l'autre.

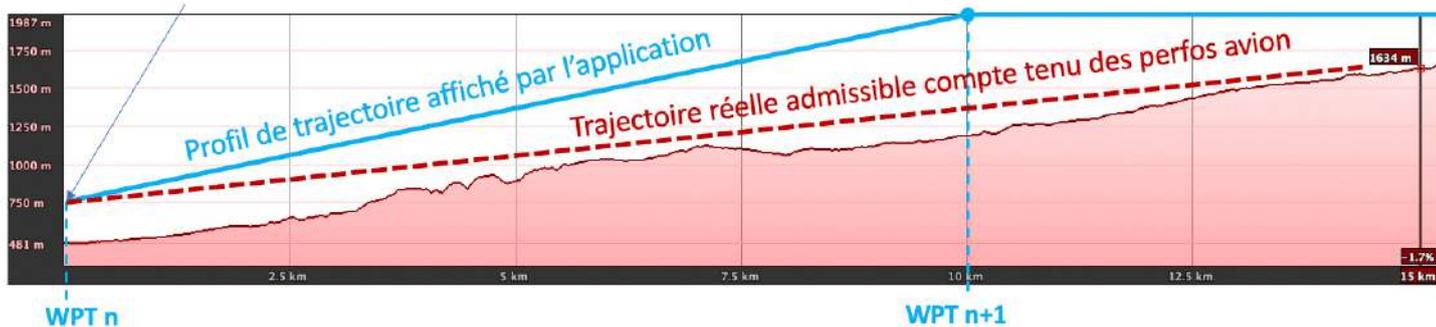
Exemple lié à celui de la page 2 : le pilote a déterminé que 3 NM après l'entrée dans la vallée qu'il souhaite remonter, la Z mini permettant le ½ tour avec une marge de sécurité suffisante était de 6500 ft. En portant ce point sur le graphe (cf. ci-contre), il en déduit lors du tracé de la droite correspondant à la pente moyenne suivie par son aéronef, que sa trajectoire verticale lui permet bien de le franchir à l'altitude minimale requise.



Garder à l'esprit que les applications d'aide à la préparation du vol, qui permettent au pilote de sélectionner en un point donné une altitude aéronef de son choix, ne tiennent pas obligatoirement compte des performances réelles de sa machine. En observant le profil de vol qu'il vient de créer et qui montre une trajectoire verticale de pente plus importante que celle du relief qu'il doit survoler, le pilote est en effet susceptible de se croire d'emblée en sécurité et de s'affranchir ensuite de tout ou partie des vérifications évoquées précédemment. Ce **faux sentiment de sécurité** pourrait constituer un facteur contributif à certains événements de sécurité survenus ces dernières années dans le relief (cf. figure suivante).

Z sélectionnée au WPT n

Z sélectionnée au WPT n+1



Conclusion : Vous l'aurez compris, le franchissement d'un relief montagneux nécessite la prise en considération de multiples facteurs qui exercent séparément mais aussi collectivement une influence majeure sur la sécurité du vol. Seule une parfaite connaissance des capacités réelles de son aéronef associée à une préparation minutieuse et approfondie du vol, permet en pratique au pilote **et tout particulièrement au pilote de plaine**, de se préserver de la survenue d'événements indésirables susceptibles de mener à l'accident.

Le vol en montagne ne s'improvise pas et doit absolument faire l'objet d'un apprentissage spécifique.