

Théorie et Pratique du Treuil

Jean-François Hème



Publishroom
www.publishroom.com

ISBN : 979-10-236-0736-9

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Jean-François Hème

THÉORIE ET PRATIQUE DU TREUIL

Treuil fixe et mobile

Parachutes

Parapentes

Deltas

Rigides

Planeurs



publishroom

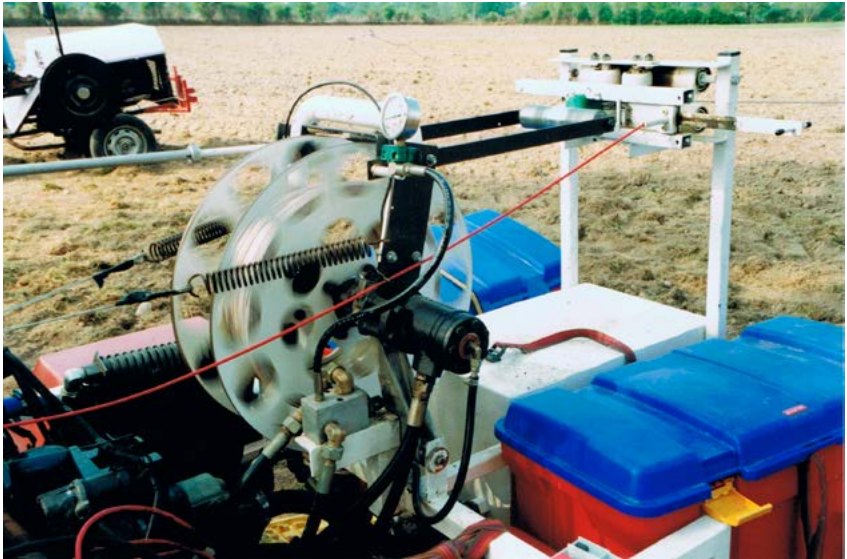
2085...
Et tous les soirs cette queue au treuil !
Et pomper ! Pomper !
Pour rentrer chez soi chaque soir...

– Jean-Paul Budillon / février 1985

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	9
Introduction	11
Description vectorielle de la mécanique du vol treuillé	19
Le câble	27
Propagation et réglage de la tension	39
Équation de la trajectoire par vent nul lorsque la tension du treuil fixe est égale au poids total	47
Les vitesses du mouvement par vent nul lorsque la tension du treuil fixe est égale au poids total volant	59
Etude générale du gain par vent nul en fonction de la tension	75
Etude générale des composantes de la vitesse d'aéronef par vent nul	89
Treuillage en présence de vent météorologique	99
Le vol quasi stationnaire	117

Gestion à deux du VQS . . . . .	.133
Treillage « allers et retours » . . . . .	.145
Le tracté au dévidoir . . . . .	.167
Treillage sur sol incliné. . . . .	.177
Le tracté à câble fixe ou vol captif. . . . .	.185
Aspects énergétiques d'une treillée par vent nul . .	.193
Guide et concepts à intégrer pour la construction d'un treuil . . . . .	.205
Rupture et largages. . . . .	.215
Le verrouillage latéral . . . . .	.235
Treillages exotiques . . . . .	.247
Annexes . . . . .	.253



Le treuil fixe à moteur hydraulique
du Delta Club Parapente 53 en Mayenne

AVANT-PROPOS

La première version de cet ouvrage sur le vol treuillé date de 1989. Elle est alors publiée par chapitres, pour un peu plus de la moitié de son contenu par les Éditions Rétine entre février 1990 et avril 1991. Ensuite furent publiées en intégralité cette fois *36 questions sur le vol treuillé*, du même auteur, ouvrage grand public certes, mais qui obligeait pilotes et treuilleurs à admettre mes règles sans aucune démonstration. Certaines de ces règles sont peu évidentes à admettre et l'absence de support démonstratif « béton » a probablement nui à leur crédibilité, permettant aux vieux poncifs, aussi nuisibles que contre-productifs, de continuer à proliférer dans le bouillon des idées reçues.

Cette nouvelle version finalisée 19 ans plus tard a été revue et augmentée, mais surtout rénovée grâce à un nouvel apport de rigueur. Les équations de la trajectoire au treuil fixe étaient initialement résolues à l'aide d'une fonction à peu près satisfaisante dans sa capacité de prédétermination, certes, mais étaient approximatives car obtenues à partir de ce que l'on appelle en mathématiques un développement limité de la solution. Or je me suis aperçu des années plus tard, en reprenant la résolution de l'équation différentielle de la trajectoire en coordonnées polaires, d'abord que la solution analytique exacte existait, et

que son utilisation ne posait pas réellement plus de difficultés que la solution approximative. L'annexe montre que le calcul numérique de cette fonction peut toujours se contenter d'une calculatrice programmable à 38 pas de programme. Bien géré, ce calcul s'est même révélé légèrement plus simple qu'à l'origine.

Les applications numériques de la théorie du treuil concernaient en 1989 des parapentes de finesse 4 et des deltas de finesse 10, performances aujourd'hui caduques. Cette nouvelle version s'applique en 2008 à des parapentes de finesse 8, des deltas de finesse 14, et des planeurs de finesse 50. Il est évident que tout un chacun pourra interpréter, interpoler ou extrapoler les résultats pour son propre appareil ! Il figure en Annexe 3 de cet ouvrage par exemple, un réseau de courbes correspondant à la finesse 7.

Je remercie Henri, Matthieu et Raymond qui m'ont corrigé tant de ces fautes d'orthographe, de grammaire et de typographie qui me désolent, assaisonnées de doublons et de fautes de frappe. Leur contribution est considérable. Mais il est vraisemblable que ce travail de correction ne sera jamais terminé et qu'aucune perfection ne peut être atteinte ni dans la forme, à l'image même du vol treuillé. Et je remercie par avance tout un chacun qui me détectera une faute de grammaire, d'orthographe, de ponctuation, de frappe, ou d'expression française et m'en fera part. Les erreurs d'analyse physique ou mathématique sont bien sûr inacceptables mais elles ont en principe déjà été revues. En somme, « aidez-moi sur la forme », le fond, je m'en charge.

L'ouvrage ne comporte pas de glossaire ou d'index des termes cités puisqu'il est de nature virtuelle ; l'utilisation du raccourci universel « CTRL + F » dans le fichier « .pdf » de l'ouvrage y permettra la navigation, et cet ouvrage dématérialisé se trouve sur mon site Internet.

Enfin les huées, doléances et autres noms d'oiseaux sont à expédier à :

jeanfrancoisheme@sfr.fr

INTRODUCTION

Sud-Est de l'Australie, un samedi après-midi de septembre 1963. Rod Fuller, sous un delta construit avec des fonds de poubelle par John Dickenson, se fait tracter sur l'eau par un canot et s'élève dans l'anonymat le plus complet pour un vol de près de 2 km. C'est donc bien du treuil que naquit le Vol Libre, et non point d'une quelconque falaise ou d'un sommet de montagne. La première séparation de l'aile de son câble de traction n'aura lieu qu'en 1964, l'année suivante ! Le procédé n'était alors guère rassurant mais il permit aux pionniers du Vol Libre de « s'éclater » dans tous les sens du terme. Le décollage à la traction par un câble apparaît donc historiquement comme le moyen naturel du Vol Libre. Faut-il rappeler qu'il est utilisé depuis plus longtemps encore par le Vol à Voile ? Le fait que la pratique intensive du treuil moderne dans les clubs de plaine soit apparue bien après le vol libre glissé ne doit pas faire apparaître le premier comme un simple accessoire du second. Les débuts difficiles du vol treuillé vinrent en fait d'une simple mais souvent tragique confusion : si le treuillage d'un planeur conventionnel lourd se fait par accrochage au ventre du planeur, celui d'un planeur ultra léger se fait au pilote et non à l'aile ; d'ailleurs, dans le cas du parapente, comment pourrait-il en être autrement ? Grâce à cette amélioration subtile

mais essentielle qui permet d'additionner les efforts du pilote à l'effort du câble pour permettre le contrôle de l'aile en roulis et en lacet, la mise en vol au treuil a atteint un niveau de sécurité si satisfaisant, que les rares accidents qui se sont produits depuis, au cours de cette discipline d'équipe, ne sont après analyse, en général jamais reliés directement à la méthodologie du treuilage. À condition d'éviter le treuilage en « allers-et-retours » et de s'imposer l'utilisation d'un treuil à tension asservie.

Le treuil est pour le pilote de vol libre ou de vol à voile un moteur temporaire, le plus simple de tous, bien dans le vent d'une société de consommation : on applique une tension à l'aéronef, et le pilote jette après usage, c'est-à-dire on largue une fois la hauteur atteinte. On notera ici que ce qui est jeté (le câble) est perpétuellement recyclé, ce qui est bon pour la planète. Il en a toujours été ainsi depuis les débuts du vol humain : l'aéronef non motorisé doit gagner son altitude avant de faire jouir le pilote de son vol libre glissé et du jeu avec l'ascendance. Que l'aéronef soit monté au sommet en automobile au cours d'une navette interminable, monté à grands frais en montgolfière ou hélicoptère, remorqué par un ULM, ou porté à dos d'homme sur une dune ne serait-ce que de 5 mètres de dénivelée, le fait est là, inexorable : il faut hisser l'aile et le pilote d'une certaine dénivelée au départ, si faible soit-elle, même pour un vol purement dynamique. Pour un vol thermique, quelques centaines de mètres sont souhaitables. Ceci tient à une condition physique simple nommée « condition aux limites » : une particule d'air ne peut avoir de vitesse verticale au voisinage du sol, mais seulement un mouvement horizontal. Or seule la composante verticale de la vitesse de l'air peut faire monter un aéronef sans moteur pour autant qu'elle soit supérieure à la vitesse minimale de chute. Il est également possible d'exploiter le gradient vertical de vent pour se maintenir en l'air sans moteur.

Aucun site « classique », si favorable soit-il par son exposition, sa facilité d'accès et sa navette officielle à prix écrasé, ne peut concurrencer le treuil dont voici la fiche miraculeuse :

- localisation du site : dans le garage ;
- orientation : tous vents ;
- force du vent limite au décollage : 10m/s ;
- dénivelé : variable de 0 à 1000 m voire beaucoup plus ;
- durée de la navette : de 1 minute à 10 minutes ;
- coût de la navette : 2€ ou moins, soit le vingtième d'un remorquage ;
- nombre de vols possibles dans une journée : très grand et indéterminé ;
- atterrissage : partout, y compris immédiatement dans l'axe après un décollage raté que seul le treuil peut permettre soit dit en passant ;
- durée du portage : nulle ; on monte et on démonte à côté de la voiture sauf en cross.

Les esprits chagrins auront rapidement trouvé la faille de ce système à voler idyllique : le site n'est pas seulement le treuil dans le garage, il faut aussi le terrain des opérations. Cette difficulté pour trouver un terrain suffisamment vaste et dégagé, aérologiquement favorable (terrains en bordure de mer et marais n'excitent guère les convoitises), praticable toute l'année et surtout où on en a besoin, constitue en fait le vrai problème de la pratique du treuil. On se consolera en se disant qu'en plaine il est encore plus difficile de trouver des sites à dénivelée !

Une autre difficulté, plus légère, tient à la spécificité de l'activité : l'impossibilité en principe de voler seul, quoique l'on puisse concevoir un treuil fixe entièrement automatisé et radiocommandé par le pilote. Sur l'aire de décollage, la bonne ambiance peut être facile à gérer pour peu que chacun connaisse

son Savoir Vivre Classique. Cependant, tandis qu'une partie de l'équipe monte en jouissant vers le frais de l'altitude, il y a le treuilleur et l'assistant, qui eux ne volent pas et cuisent à terre sous le cagnard. Dans une isothermie sans vent sous 8/8 de stratocumulus, il n'est pas rare de trouver plus de treuilleurs que de pilotes. En revanche, sous un ciel « pété » de 3/8 de cumulus dans une masse d'air à pied convectif de 1800m d'épaisseur, à la question : « C'est qui qui tire ? », on voit des pilotes regarder la pointe de leurs chaussures ou faire celui qui n'a pas entendu la question. Seul un code prévoyant la prise en compte du capital frustration de chaque treuilleur sur un exercice, permettra d'éviter l'injustice. À noter que le tracté au dévidoir nécessite aussi la réquisition d'au moins deux victimes.

L'ouvrage que voici est né d'abord de la fascination de son auteur physicien, pour un mouvement mécanique paradoxal. L'ascension au treuil s'obtient en tirant vers le bas ! L'auteur, également pilote de delta (mauvais) avait donc le double atout nécessaire à une telle étude. Quelle tâche exaltante que de mouiller sa chemise pour vérifier expérimentalement ses résultats, parfois tout à fait inattendus ! Je me devais donc d'attaquer le problème par le bon bout, celui du câble bien sûr, véritable cordon ombilical entre le pilote et le treuil. Le bout supérieur est accroché au harnais du pilote, le bout inférieur au tambour d'un treuil susceptible d'enroulement ou de déroulement suivant les conditions. Toute la théorie et la technique du treuil développée dans cet ouvrage est valable pour n'importe quel aéronef non motorisé allant du parapente au planeur conventionnel lourd, seules les performances diffèrent. Dans un chapitre spécial, il sera démontré que le tracté au dévidoir ne diffère en rien du treuil fixe sur le plan mécanique.

La démarche générale de l'ouvrage vise à optimiser les techniques actuelles de treuillage à travers une compréhension approfondie de la mécanique du vol treuillé, incluant forcément son formalisme mathématique. Pour ceux que le

raisonnement mathématique rebute, il y aura toujours possibilité de se contenter des résultats, pour les autres d'éplucher mes calculs pour en extraire les erreurs ! La tentation était grande d'escamoter les équations les plus indigestes, pour n'en retenir que les argumentations grand public, faire de la pédagogie, de la vulgarisation en quelque sorte... Mais l'expérience m'a montré qu'il était impossible de lutter contre des idées reçues bien ancrées et souvent fausses, sans produire une démonstration irréfutable. Seule une théorisation du treuillage à partir des lois universelles de la Physique pouvait dissuader le lecteur-pilote pratiquant le treuil de faire valoir des idées inexactes issues de son seul « ressenti ».

Bien que des analyses, parfois seulement qualitatives, et les conséquences qui en découlent soient accessibles à tout lecteur, il faudra, pour suivre certains développements, faire un réel investissement personnel. Sinon ne pas se laisser rebuter par le spectacle barbare de certaines équations : le lecteur non concerné pourra sauter les passages imbuables sans pour autant hypothéquer sa compréhension ultérieure de l'ouvrage. Une bonne connaissance de la mécanique élémentaire du vol libre ordinaire (ou glissé) est en revanche extrêmement souhaitable pour goûter l'ensemble des démonstrations jusqu'à leurs juteuses finalités. Les développements mathématiques (pour les pilotes concernés bien sûr !) débutent souvent par une équation différentielle issue des lois générales de la Physique, et se terminent alors inéluctablement par des solutions de ces équations à apporter. Parfois la solution est une fonction analytique, mais dans d'autres cas, la solution exige un calcul numérique nécessitant un programme à plusieurs dizaines de pas. J'ai personnellement effectué la totalité de ces calculs dans les années 90 avec une calculette à 7 mémoires et 38 pas de programme, mais il est certain qu'on peut aujourd'hui faire ces calculs par des moyens plus économiques en effort. Dans certains cas, par exemple la trajectoire au treuil en présence

de vent, le calcul n'a pas été effectué, car sa lourdeur devenait disproportionnée avec le bénéfice à en retirer ; le calcul mathématique est un moyen, pas une fin en soi ! L'équation différentielle reste cependant posée à la disposition du lecteur averti, qui peut terminer le calcul, mais à condition cette fois de disposer d'un instrument de calcul beaucoup plus puissant.

Les développements précités étant sautés par le lecteur, les nombreuses observations et conclusions qui en découlent permettront aux pratiquants les plus entraînés de vérifier la correspondance souvent spectaculaire entre la prédétermination issue d'une formule et l'observation réelle. J'ai personnellement vérifié des hauteurs de largage par rapport à celles prévues par les formules, la correspondance est absolument saisissante ! Les résultats de cet ouvrage devraient aussi permettre aux clubs, débutants ou non au treuil, d'optimiser leur méthode de treuilage en évitant les erreurs, mais aussi en balayant quelques idées fausses telles que, pêle-mêle, « il faut larguer à la verticale du treuil », ou « la différence de gain au largage entre un planeur et un parapente est énorme » ou « plus on tend le câble plus le tambour enroule vite », ou encore « il faut accélérer quand il y a du vent », et la liste de ces poncifs injustifiés est sans limite. Enfin, des résultats plus pointus et apparemment peu utiles pour le pilote peuvent être pris en compte dans la conception du treuil ; par exemple, par vent nul, la captation de l'angle du câble pourrait servir par rétroaction à réguler automatiquement le régime du moteur qui entraîne la pompe hydraulique ou la transmission électromagnétique ; ceci n'apporte rien à la mécanique du processus, mais libérerait le treuilleur d'une contrainte d'économie de carburant.

La correspondance entre les résultats obtenus par la théorie du vol treuillé et l'observation sur le terrain est si bien vérifiée au travers des treuillées ordinaires, qu'elle entraîne forcément la validation de ses développements. Il s'ensuit que, si cette même théorie apporte des résultats inattendus, paradoxaux,

voire choquants, ceux-ci devront être considérés comme corrects et vérifiables.

En ce qui concerne les unités des grandeurs physiques employées dans cet ouvrage, elles sont bien sûr celles du système international d'unités dites uSI, mais pour une, l'unité de force, j'ai dû faire un arrangement avec le diable. Peu de lecteurs auraient goûté des forces exprimées en daN alors que les balances et autres pesons affichent celles-ci en kg. Faisant fi de l'intégrisme scientifique, l'auteur a alors décidé d'exprimer les forces en kgf et les poids en kgp. La conversion est aisée : $1\text{daN} \# 1\text{kgf} = 1\text{kgp}$. Mais le lecteur pourra toutefois par endroits trouver des forces exprimées en daN : chassez le naturel et il revient au galop !

Cet ouvrage contient la quasi-totalité de ce qu'il faudrait savoir pour prétendre maîtriser la pratique et la théorie du treuillage des aéronefs sans moteur, lesquels exigent une mise en hauteur préalable (un décollage) pour traquer les ascendances atmosphériques après largage du câble. Les procédures permettant de réaliser des treuillées en toute sécurité sont en 2017 largement fiabilisées certes, que ce soit en parachutisme, en vol libre ou en vol à voile, mais l'incompréhension de ce qui se passe vraiment pendant le treuillage est en général totale.

Les conséquences de certaines pratiques marginales, et de ses risques, sont parfois totalement inconnues, ou alors connues expérimentalement, sans que les causes analytiques en soient réellement élucidées. Des affirmations totalement fausses sont entendues sur les terrains d'envol, sans forcément remettre en cause la sécurité d'ailleurs.

Cet ouvrage n'est sans doute pas parfait, mais met en lumière, les raisons qui permettent d'anticiper des conséquences de certaines méthodologies et y sont disséquées sans la moindre complaisance. Cet ouvrage est à destination des pilotes de vol libre, en parapente, en delta souple ou en rigide, des pilotes de vol à voile sur des planeurs dits lourds, et même des parachutistes utilisant le treuil par économie pour les exercices de précision d'atterrissage. Mais ce livre devrait concerner encore plus les clubs de vol libre et de vol à voile, leurs moniteurs et instructeurs et les fédérations de tutelle.

Jean-François Hème est professeur agrégé de Physique Appliquée. Pilote de «deltaplane» depuis 1978, il découvre le vol de plaine en 1987 grâce au treuil, pratique ancienne du décollage en vol à voile. Son obsession de la compréhension totale de la mécanique du vol, conjuguée à de nombreux accidents partout dans le monde, le pousse alors à théoriser complètement la physique du décollage à partir d'un treuil au sol. Les résultats entraînent même pour l'auteur, une série de conséquences inattendues.