

science et culture pour tous

LA PASSION VERTICALE

Jean-Pierre Petit



C'est une idée originale de passer par Voltaire pour écrire une théorie du vol de l'hélicoptère. Il en résulte un ouvrage plaisant, et attirant par son tour humoristique.

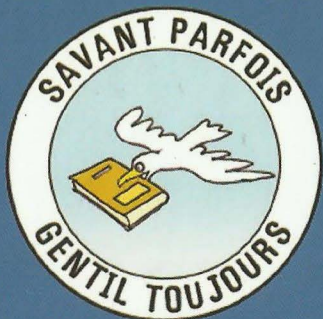
En même temps, le sérieux du point de vue technique et théorique fait de cet ouvrage un livre de base pour les futurs pilotes.

L'hélicoptère, merveilleuse machine, a encore un bel avenir!

Jean Boulet



*Le 15 février 2011, Jean Boulet nous a quittés.
Avec sa disparition, c'est une page de l'histoire
des voilures tournantes qui se tourne.*



Science et Culture pour Tous

Vendu au profit de l'association
SCIENCE ET CULTURE POUR TOUS
BP 55 84122 Pertuis, France
scienceculturepourtous@gmail.com

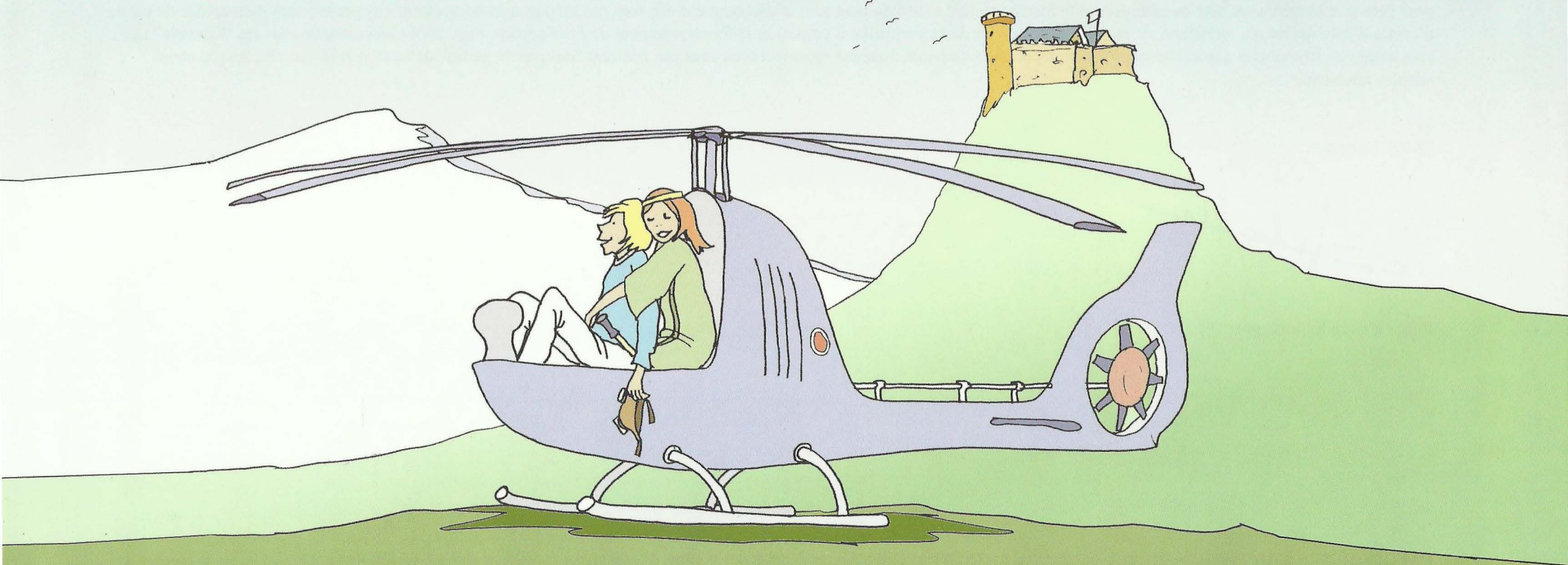


Soutenu par



Jean-Pierre Petit

LA PASSION VERTICALE



L'édition du présent ouvrage a été sponsorisée par la société Eurocopter
Il est vendu au profit de l'Association Science et Culture pour Tous

www.scienceculturepourtous.net

“J’y comprends rien à ton truc, et puis on se demande comment ça vole!”

Combien m’ont déjà dit cela? Si je commence à peine à savoir un tant soit peu y répondre voilà bien longtemps que je me pose la question. Je me rappelle enfant mes promenades au jardin public d’à côté durant lesquelles je regardais pendant de longues minutes, avec intérêt et étonnement, les graines de sycomore tomber en tournoyant sur elles-mêmes. Mais quelle utilité, pourquoi ça tourne et comment? Il m’est apparu bientôt évident que ce tournoiement ralentissait leur chute: une graine non mure avec une “voilure” mal développée tombait beaucoup plus vite. Je comprenais un peu plus tard qu’ainsi, ces graines pouvaient se déplacer au gré du vent et coloniser d’autres lieux. Les voilures tournantes pouvaient donc être un moyen de transport!...

De toutes les machines volantes inventées, l’hélicoptère est celle qui aura de toute évidence eu les développements les plus originaux et les applications les plus diversifiées. Simple moyen de s’élever dans les airs à ses débuts, il est devenu aujourd’hui un outil indispensable à notre civilisation et si la question de son utilité d’un tel engin ne se pose plus tant les réponses sont nombreuses et évidentes restent celles du pourquoi et du comment. Ce sont ces mêmes questions qui m’ont poussé vers mon métier de pilote d’essais d’hélicoptère. Sa technicité est en effet le corollaire de sa versatilité d’emploi et le fonctionnement de l’hélicoptère reste bien mal connu de tous les “Candide” que cela intéresse. Je souhaite que cet ouvrage facétieux et plein de bonne humeur apporte à tous ceux qui désirent “cultiver le jardin” de leurs connaissances, les réponses simples attendues.

Didier Delsalle



Pilote d’essai à Eurocopter (*)

(*) Le 14 mai 2005 à 7h08 (heure locale), un Ecureuil/AStar AS 350 B3 de série avec aux commandes le pilote d’essai Didier Delsalle, s’est posé à 8.850 mètres (29.035 ft) sur le sommet de l’Everest (Royaume du Népal), pulvérisant ainsi le record du monde (*) de poser et décollage en altitude. Ce record mondial (*) marque une étape absolue dans l’Histoire de l’Aviation.

Il y avait une fois en Westphalie un château qui appartenait au baron de Thunder-ten-Tronckh. Il y vivait avec sa femme et sa fille Cunégonde. Un jeune garçon nommé Candide vivait également au château. C'était le fils d'une parente de Monsieur le Baron et, paraît-il, de quatre-vingts chasseurs. Vivait également au château un philosophe, maître Pangloss, grand amateur des écrits de Leibniz, qui prouvait admirablement qu'il n'y avait point d'effet sans cause et que, dans le meilleur des mondes possibles, le château de monseigneur le baron était le plus beau des châteaux et madame la baronne la meilleure des baronnes possibles.



Un jour la jeune Cunégonde, âgée de 17 ans, aperçut dans un bois proche du château le professeur Pangloss qui donnait une leçon de physique expérimentale à la femme de chambre de madame la baronne. Ayant beaucoup de dispositions pour les sciences, elle observa les expériences réitérées dont elle fut témoin. (*)

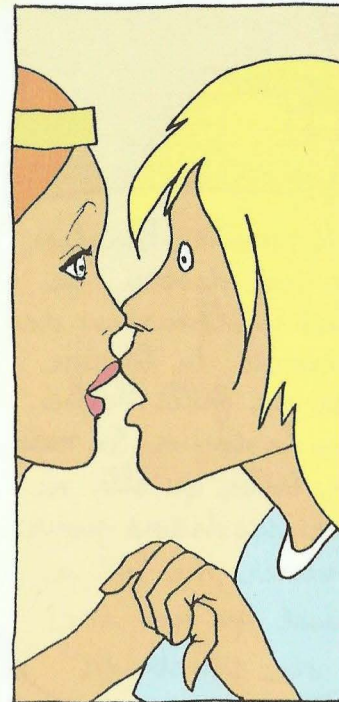


Elle vit clairement la raison suffisante du docteur, les effets et les causes et s'en retourna toute agitée, toute pensive, en grand désir d'être instruite (*)



Elle rencontra Candide en revenant au château et rougit; Candide rougit aussi; elle lui dit bonjour d'une voix entrecoupée et Candide lui parla sans savoir ce qu'il disait (*)





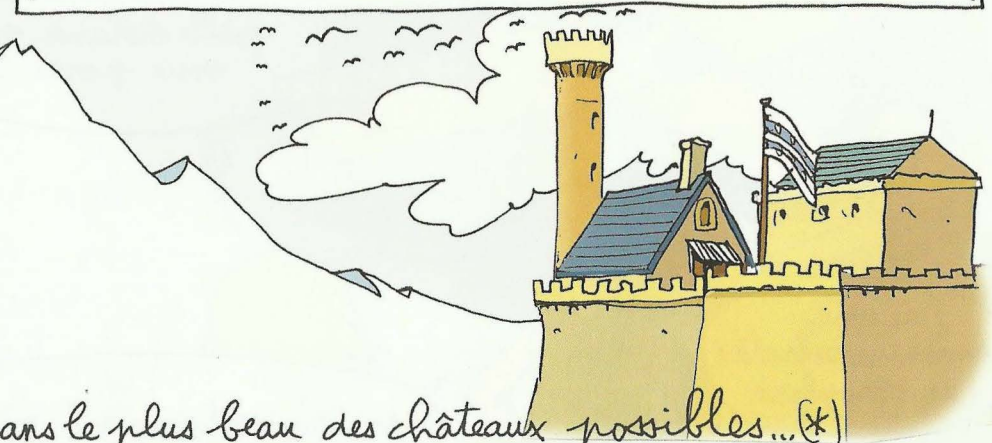
Leurs lèvres se touchèrent, leurs mains s'égarèrent. Monsieur le baron, qui passait par là, vit cette scène, ses effets et ses causes (*)



Monsieur le baron chassa Candide à coups de pied dans le derrière (*)



Madame la baronne souffleta Cunégonde et l'enferma dans une pièce située tout en haut de la tour de guet du château



et tout fut consterné dans le plus beau des châteaux possibles... (*)

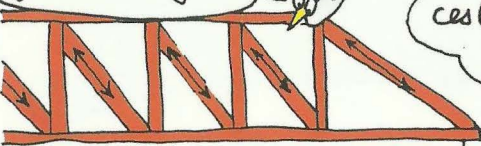
(*) Reproduction à l'identique du texte du roman "Candide", de Voltaire (1694-1778)



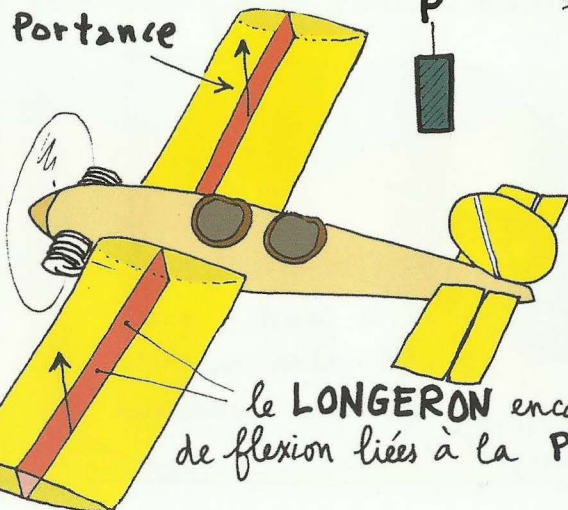
je dois pouvoir réduire la longueur d'atterrissage en effectuant une approche à plus faible vitesse. La **PORTANCE** de l'aile est proportionnelle à son **INCIDENCE** α . En cabrant l'avion je devrais pouvoir voler beaucoup plus lentement



c'est comme dans les flèches de grues



ces barres travaillent en **TRACTION**



le **LONGERON** encaisse les forces de flexion liées à la **PORTANCE**

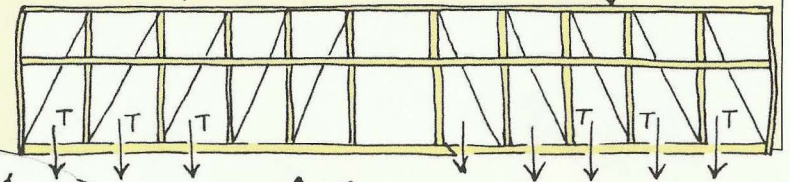
c'est donc cette aile qui vous permet de vous maintenir en l'air



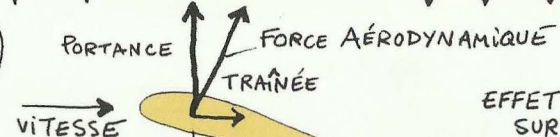
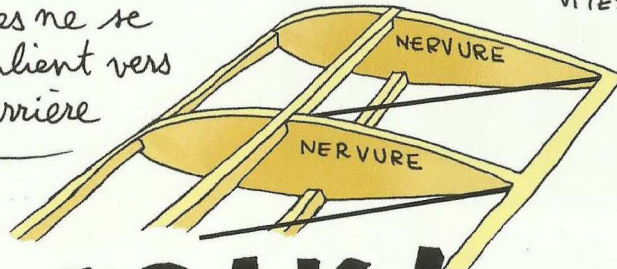
oui

VENT RELATIF

Bord d'attaque

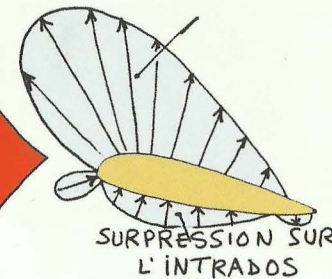


j'ai mis des câbles raidisseurs qui encaissent les forces de traînée et évitent que les ailes ne se replient vers l'arrière



PROFIL D'AILE

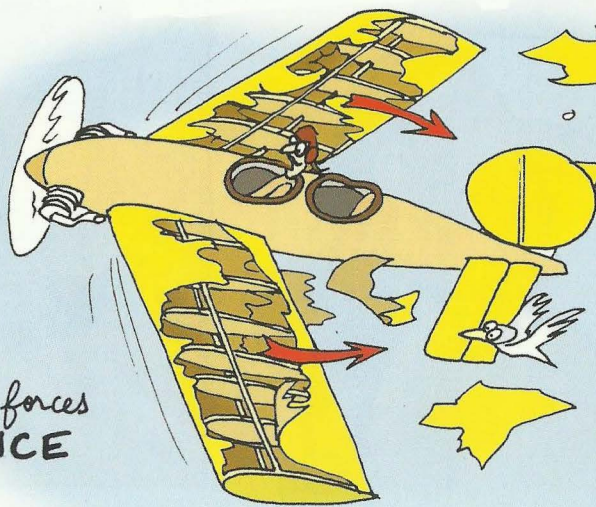
EFFET DE SUCCION SUR L'EXTRADOS



distribution de la pression

SURPRESSION SUR L'INTRADOS

KRAK!



messieurs, sans ces précieux raidisseurs les ailes se briseraient

une sage précaution



Bien, allons voir comment nous pouvons réduire la vitesse en cabrant l'appareil



Je tire sur le manche



KRAAAK !

Soudain les ailes se brisent, se rabattant vers l'avant !



voilà, c'est arrangé. Il suffit de mettre une seconde série de raidisseurs qui empêchent les ailes de se replier vers l'avant



l'appareil est maintenant correctement renforcé. Je vais cabrer progressivement



il faudra que ça cabre ou que ça dise pourquoi



LE DÉCROCHAGE

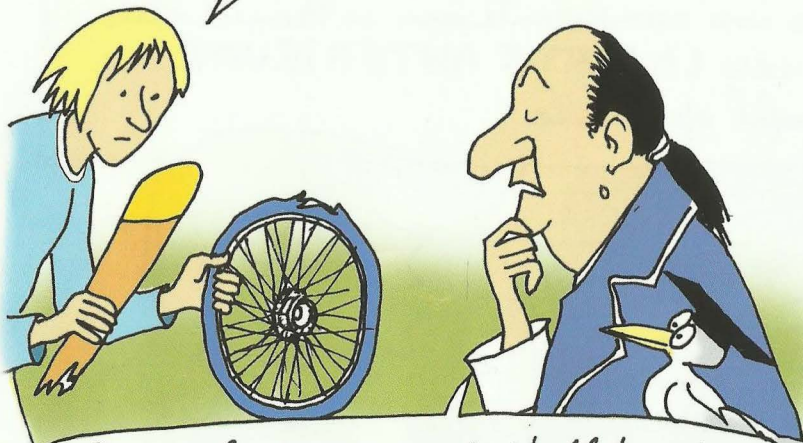


cette fois vous avez vraiment eu de la chance que cette meule de foin soit juste en dessous !

que s'est-il passé ?

Je ne sais pas. A une certaine incidence, la portance a disparu

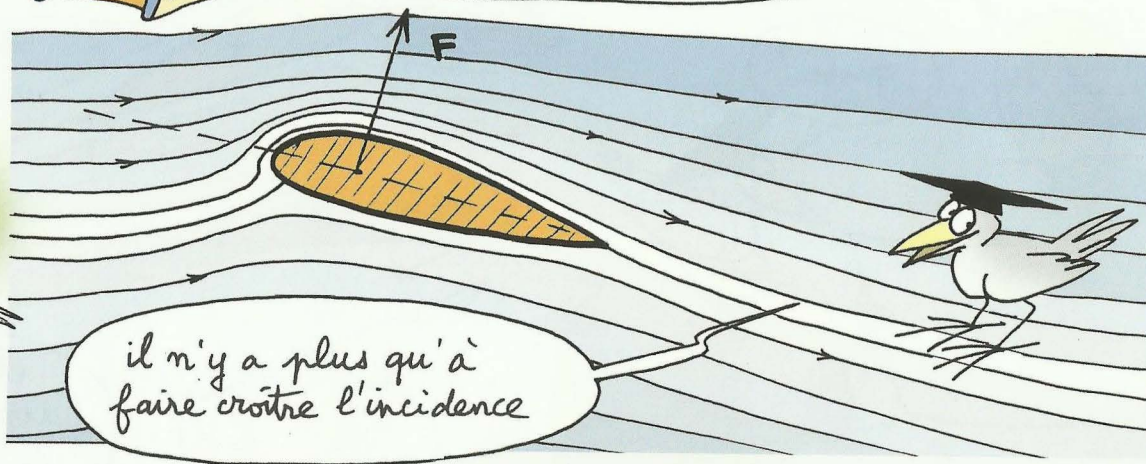
Ce n'est pas avec cette machine que je pourrai délivrer Cunégonde. Te me demande franchement si cet engin a un avenir quelconque



Comme il n'y a point d'effet sans cause il nous faut découvrir la raison suffisante de cette brutale disparition de la portance

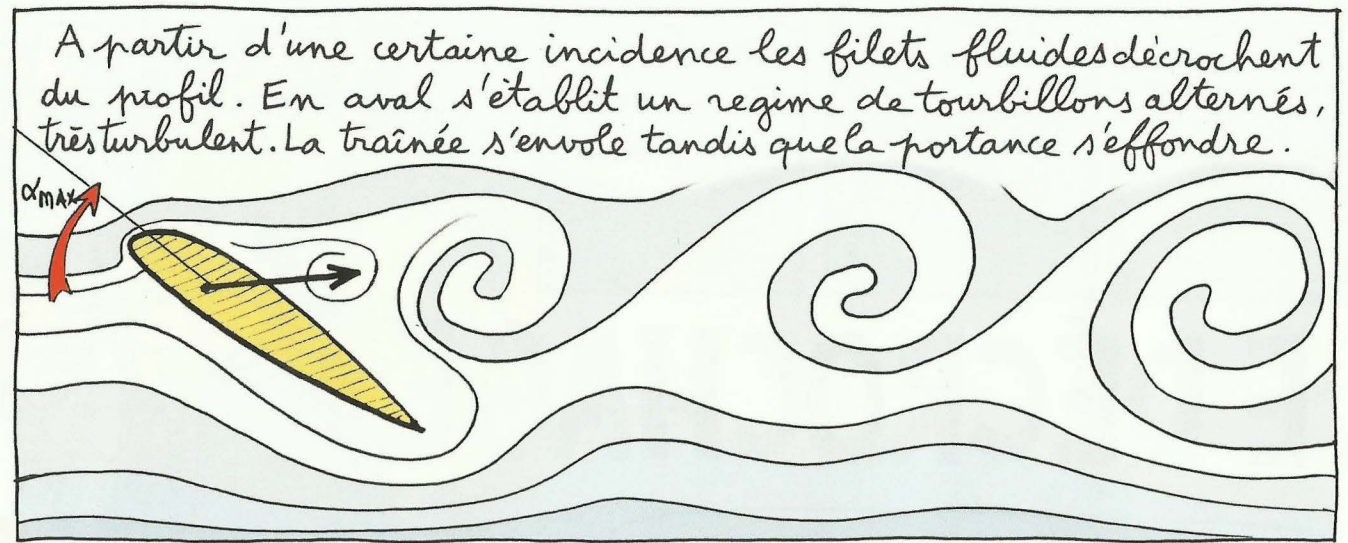
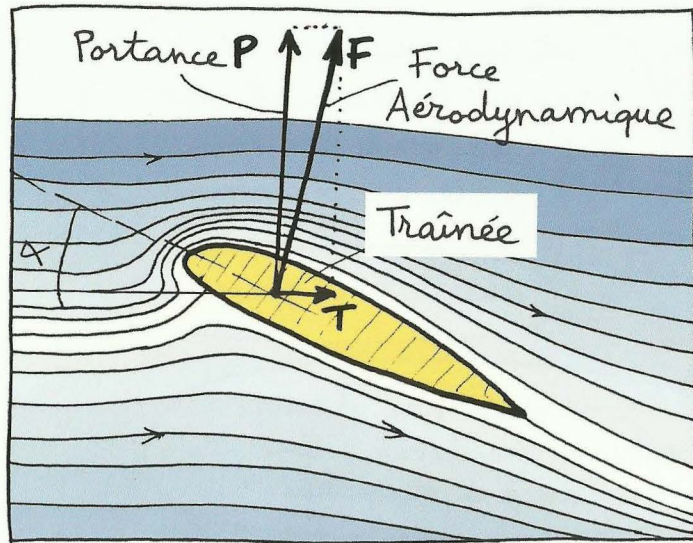


il n'y a aucune mention de ce phénomène dans l'Aspirisouffle (*). On voit seulement que la portance s'établit quand un écoulement bien régulier envoie le fluide vers le bas



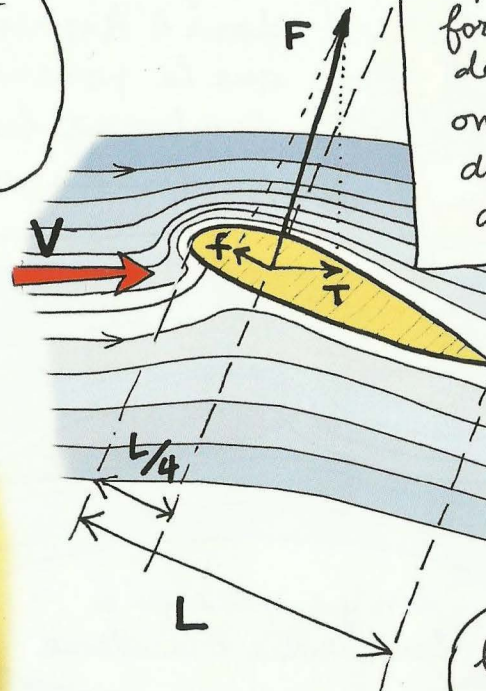
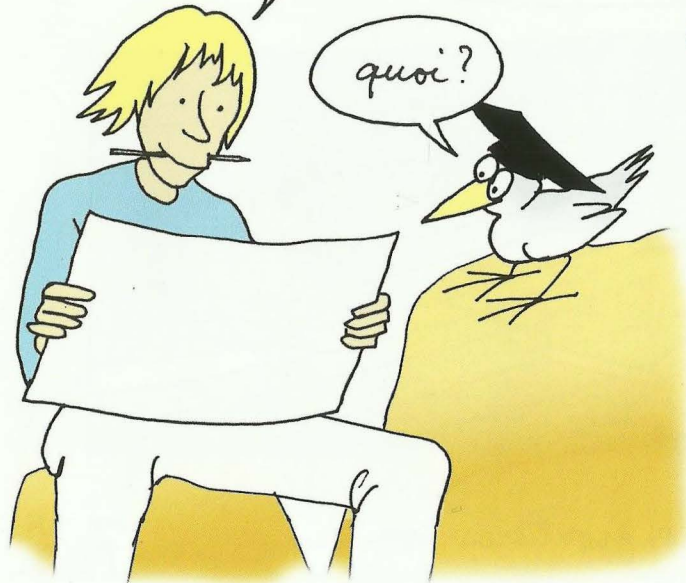
il n'y a plus qu'à faire croître l'incidence

(*) dans <http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Quand je regarde le schéma de l'écoulement correspondant à une forte incidence, je remarque quelque chose

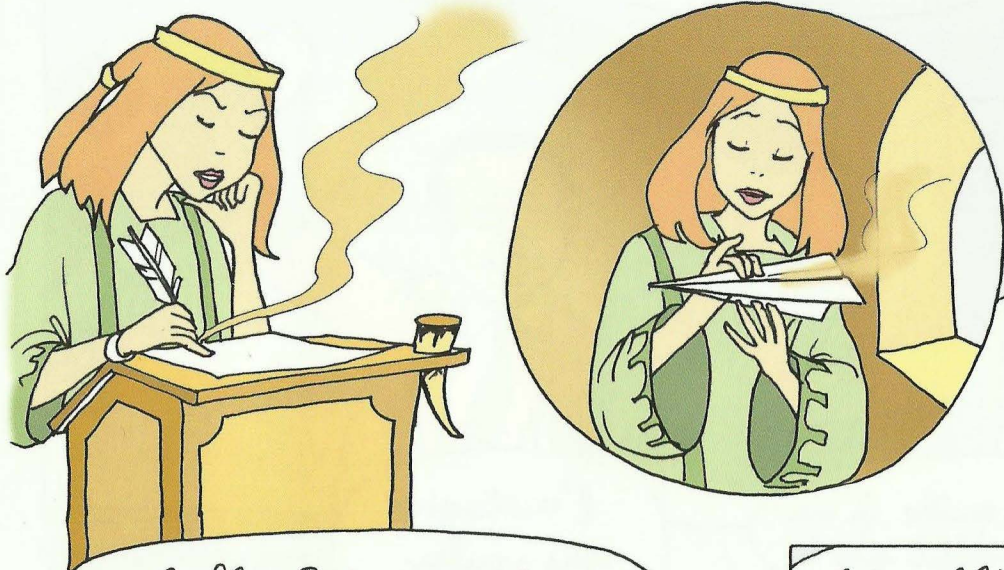
quoi?



quand on projette la résultante de la force aérodynamique F (qui s'exerce au quart de la longueur du profil, de sa "corde") on trouve une composante qui se trouve être dirigée vers **LA PARTIE ANTÉRIEURE** du profil de l'aile

et c'est cela qui avait fait se replier vers l'avant les ailes de l'avion de ce brave monsieur

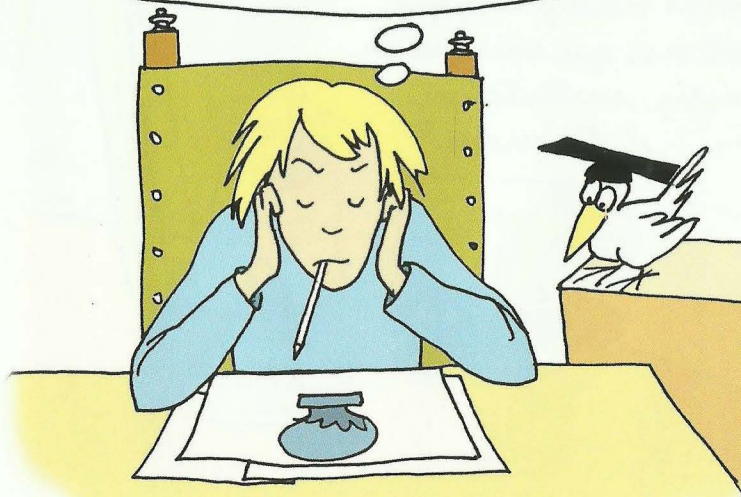
Pendant ce temps-là, Cunégonde écrivait lettre sur lettre à Candide



mais ses paroles étaient si enflammées que ses missives se consumaient avant de toucher le sol



Un ballon ? Ça ne peut pas marcher - J'aurais toutes les chances de rater la tour



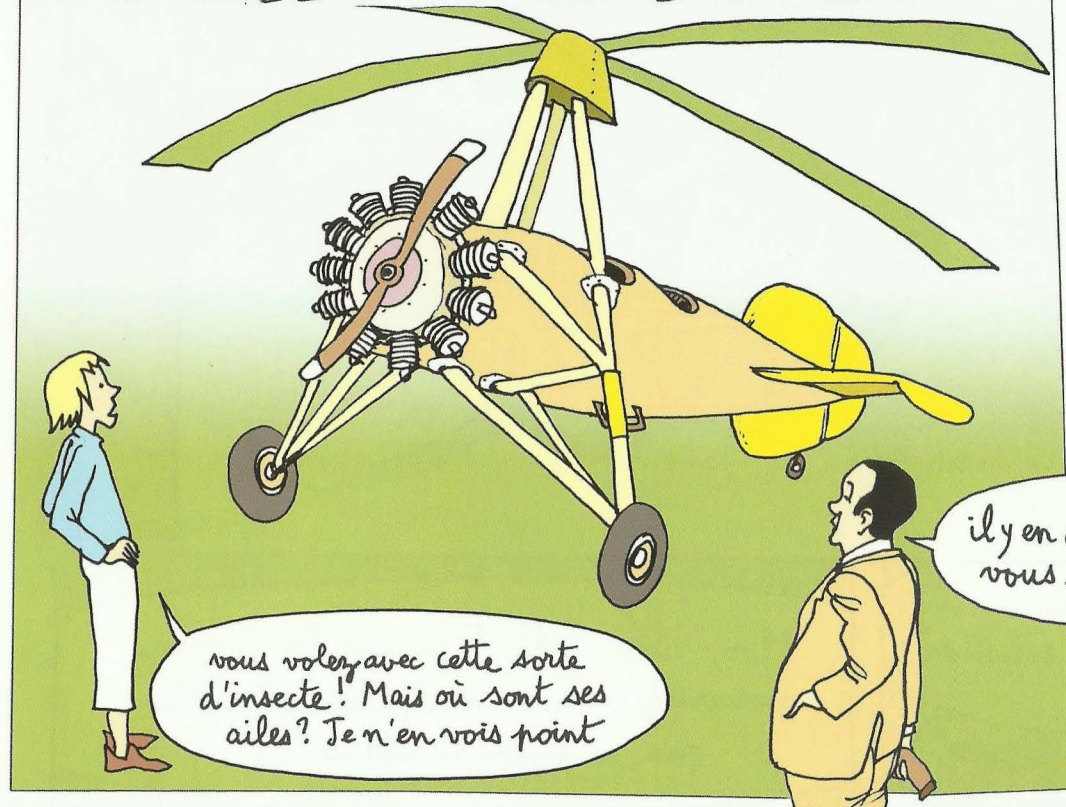
le problème semble sans solution



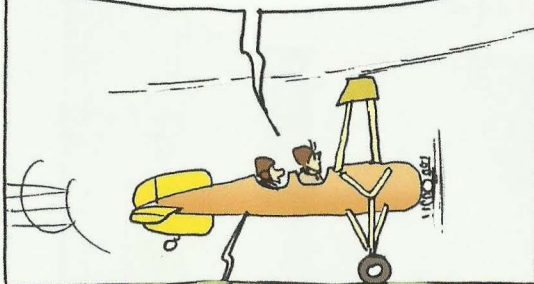
Mon nom est Juan de la Cierva
pourriez-vous m'indiquer des toilettes
que je pourrais utiliser ?



L'AUTOGIRE

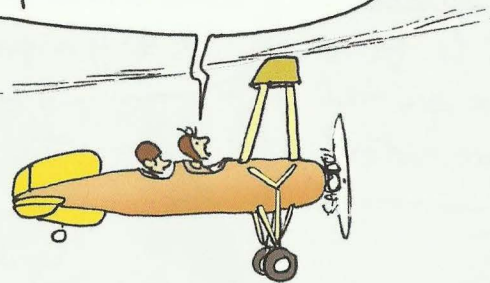


ma parole, ce rotor
tourne tout seul,
maintenant, pourquoi



autorotación

et maintenant nous
volons. Mais par
quel miracle ?!?



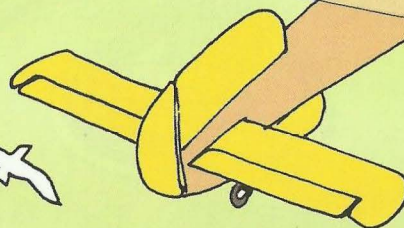
au château, vite
s'il vous plaît!



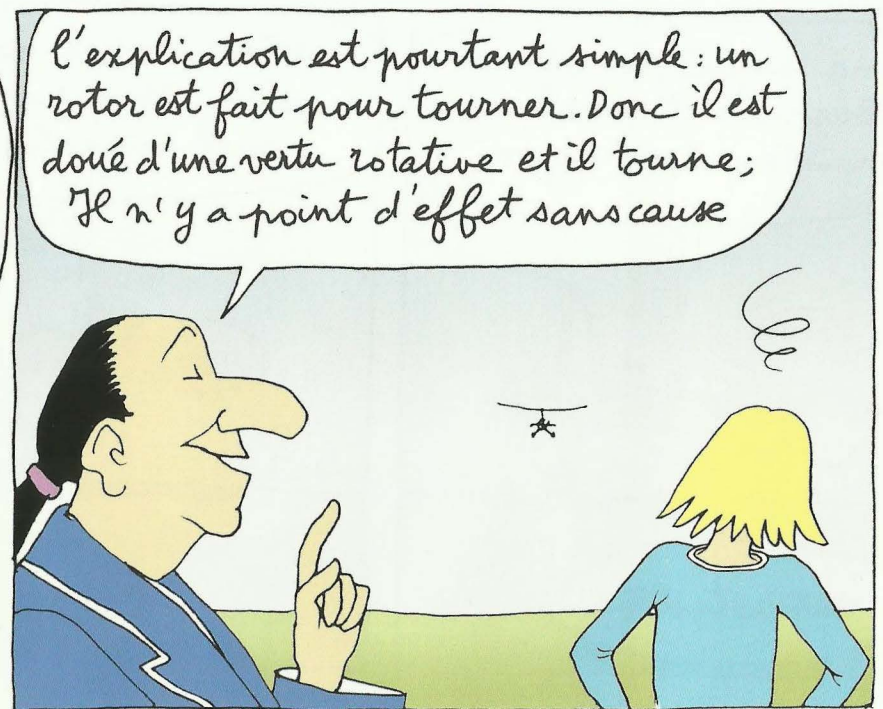
ma chère Cunégonde, qui
doit être là, en bas!

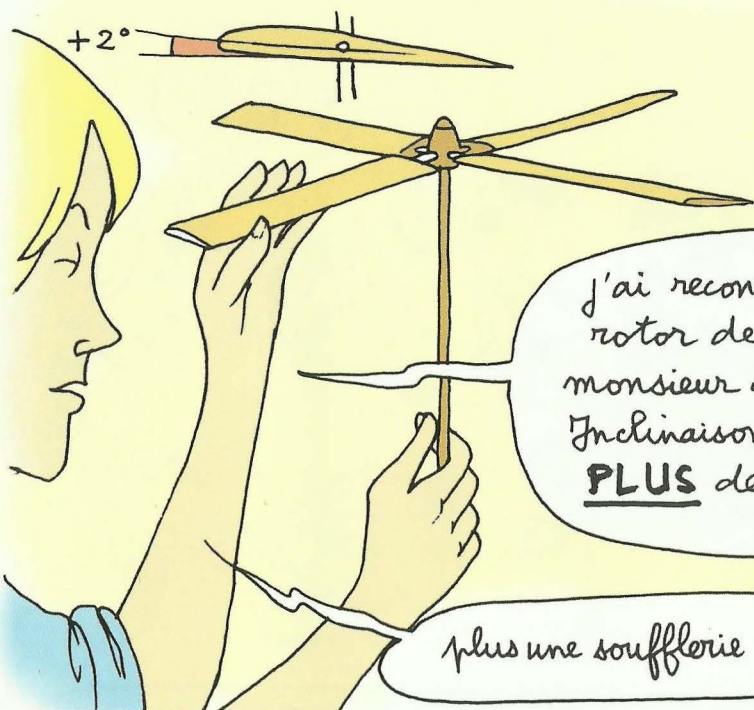


pourriez-vous
vous poser sur cette
terrasse ?

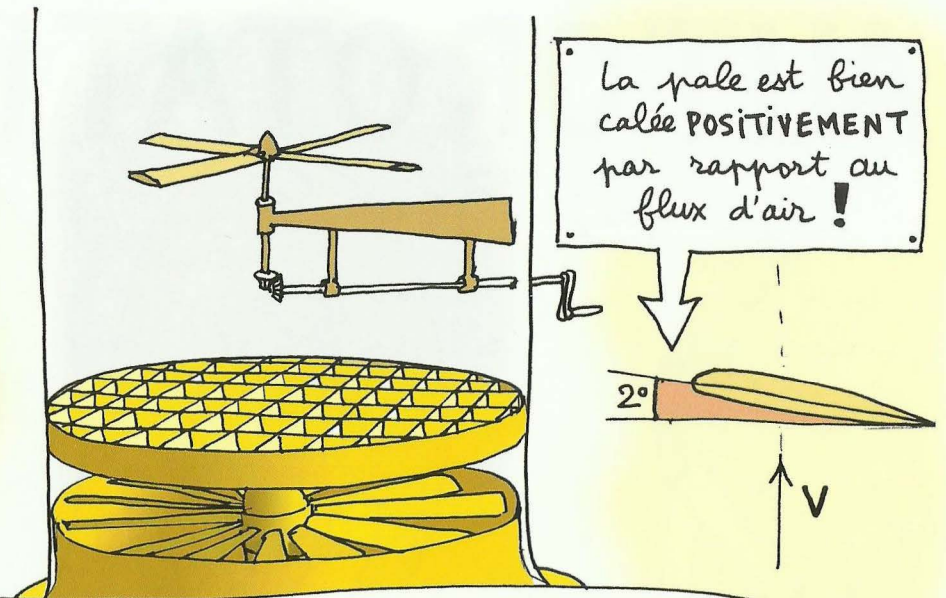


l'autogire peut se poser très
court, mais cette terrasse-là est
vraiment trop petite!

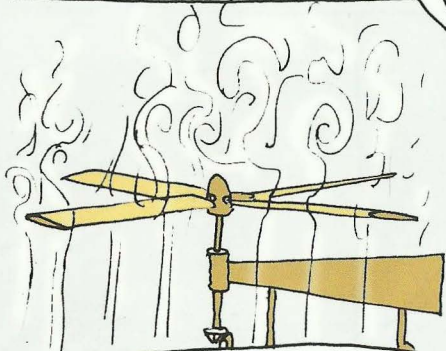




plus une soufflerie verticale, une grille de tranquillisation et émettrice de fumée



j'envoie un flux d'air ascendant

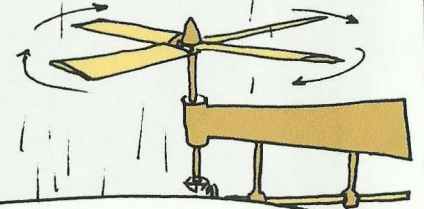


le rotor ne tourne pas. Il crée simplement une forte turbulence dans son sillage



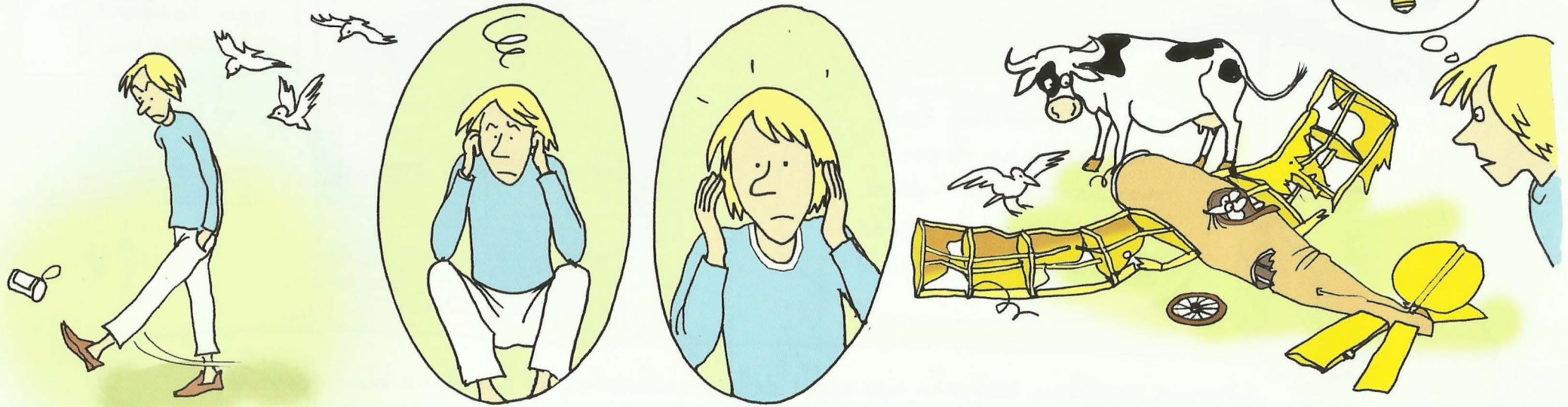
maintenant je mets le rotor en rotation

Et voilà. Il tourne tout seul. c'est à n'y rien comprendre !

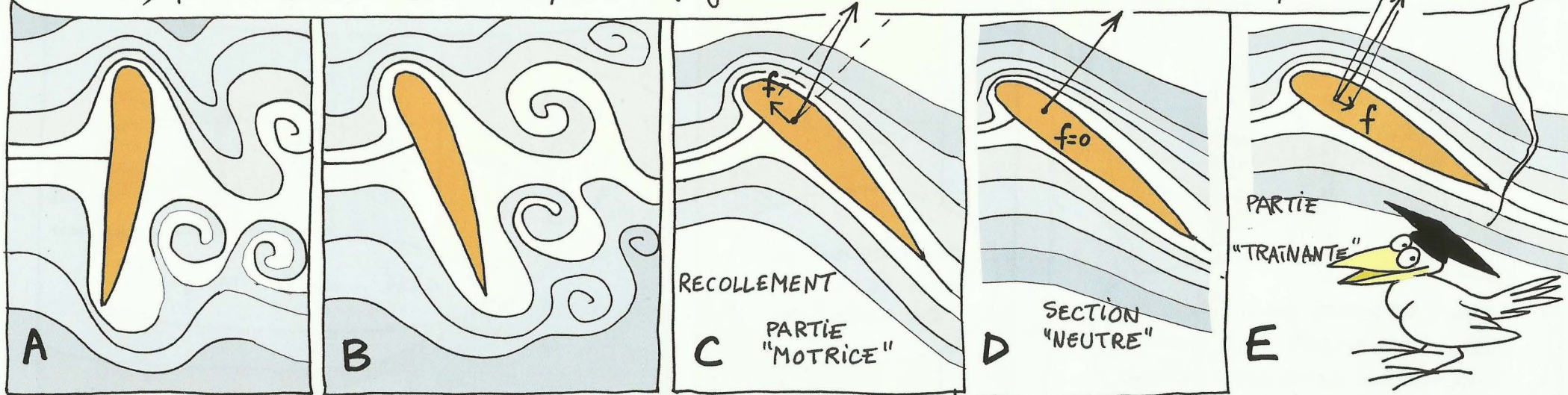


c'est ... de la magie !?

AUTOROTATION



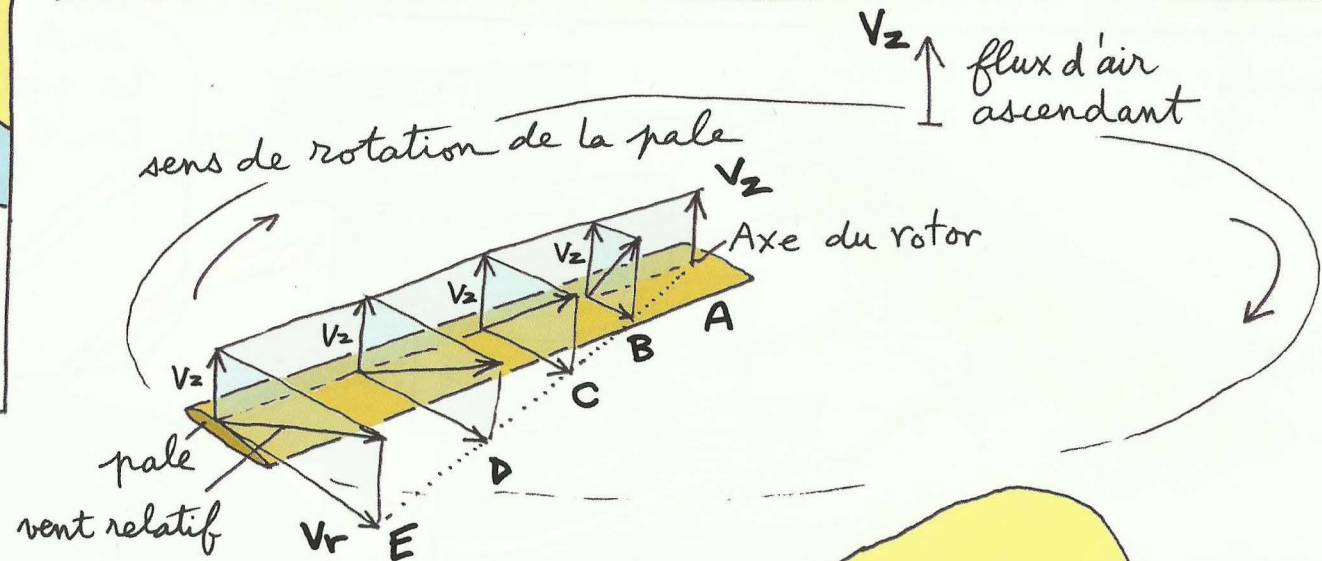
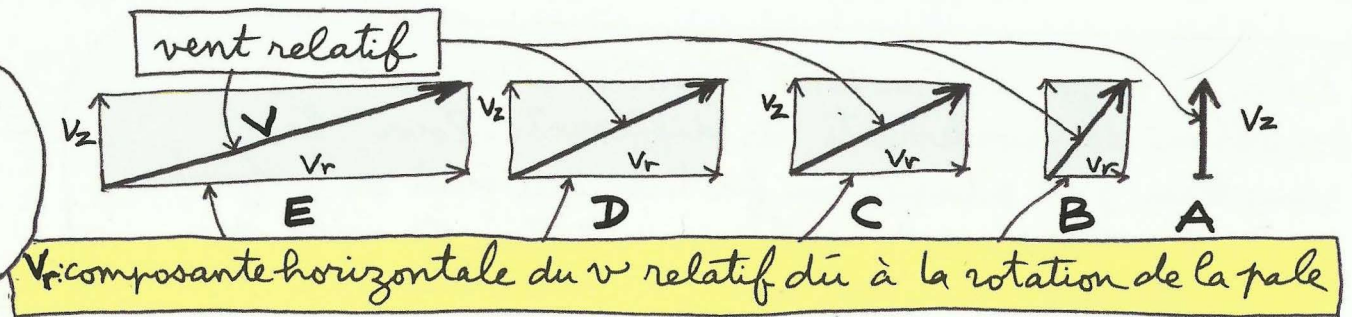
quand l'incidence de la pale diminue, par rapport à la direction du **VENT RELATIF**, l'écoulement recolle (figure C). La force aérodynamique (composante f) tend à entraîner la pale. En D cette force s'annule, puis s'inverse en E. la composante f freine alors le mouvement de la pale



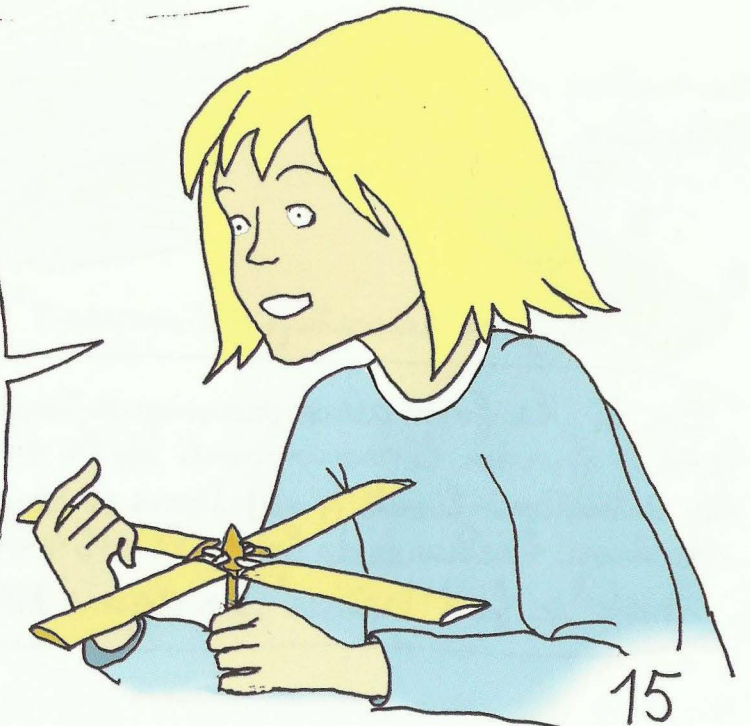
J'entends bien, mon cher Candide.
Mais d'où vient ce changement
de direction de ce que vous
appelez le **VENT RELATIF** ?



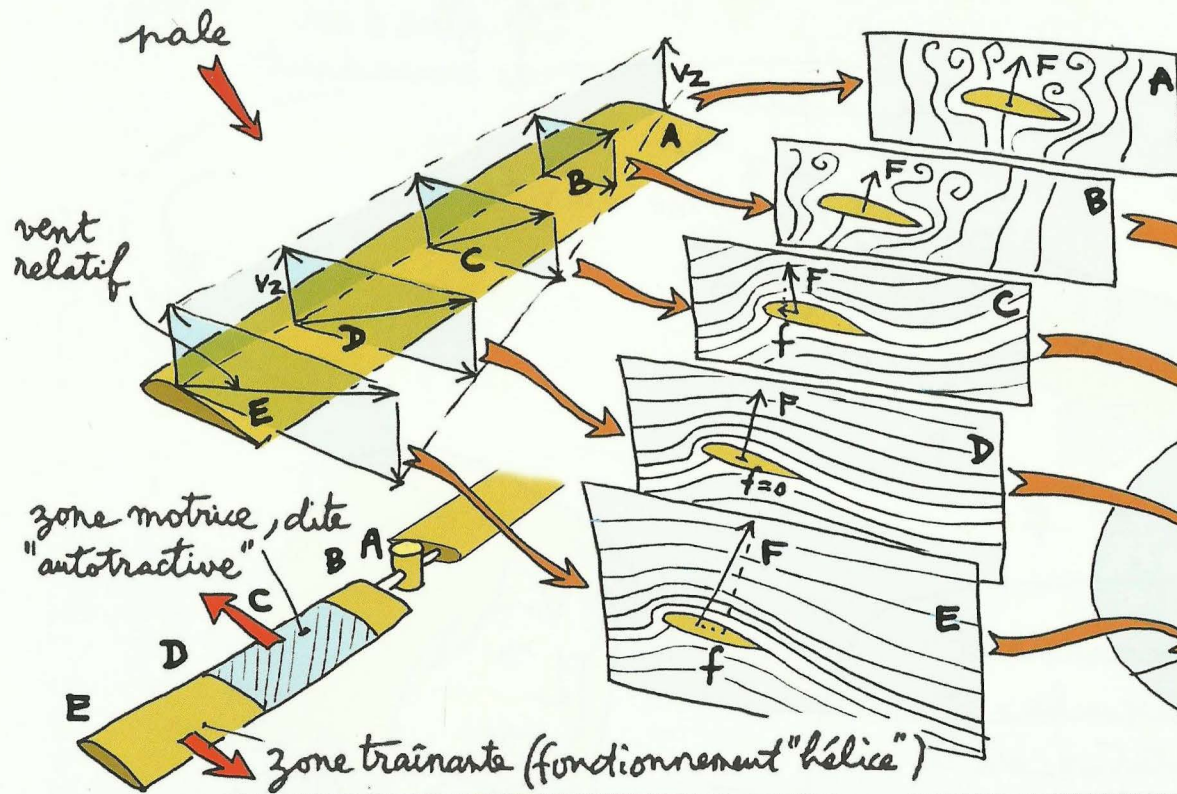
la vitesse du rotor
se combine avec
la vitesse issue de la
rotation de la pale



le rotor est immergé dans un flux d'air ascendant
qui correspond à une vitesse V_z . Celle-ci se combine à
la vitesse induite par le mouvement de rotation de la
pale V_r , vitesse qui est proportionnelle à la distance à
l'axe. La résultante donne le **VENT RELATIF**, qui se
couche de plus en plus sur la pale au fur et à mesure
que l'on s'éloigne de l'axe. En même temps le module
de cette vitesse s'accroît, de l'axe à la périphérie



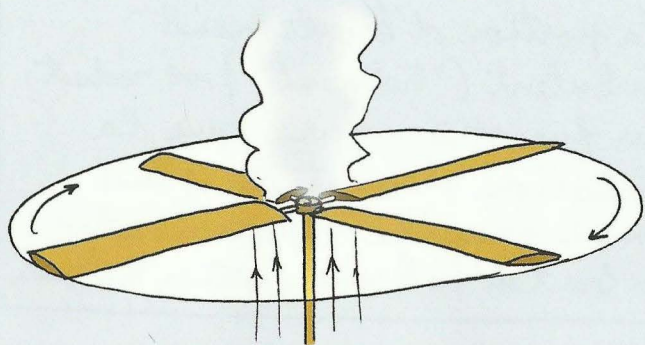
Selon la façon dont le **VENT RELATIF** attaque la pale on obtient des écoulements très différents. Pour les visualiser j'ai adapté un fin tube qui émet de la fumée, en étant solidaire de la pale en rotation. Et voilà les différents résultats que j'ai pu obtenir



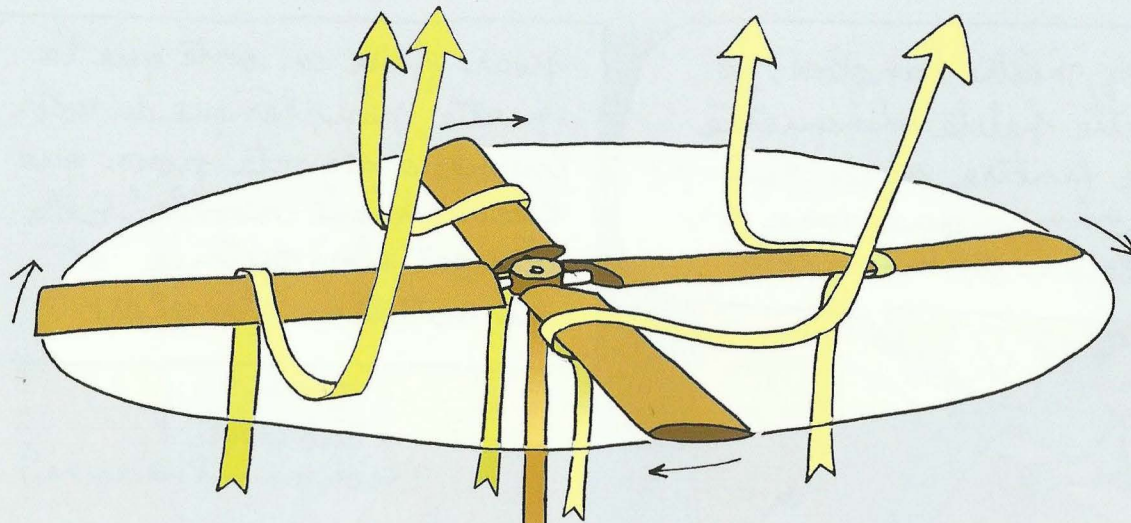
en A et B l'écoulement est "décroché" la pale crée une forte turbulence. En C l'écoulement recolle au profil. la force aérodynamique tend à entraîner la pale vers l'avant (zone motrice, "autorotative", grise)

En E la force aérodynamique, toujours dirigée vers le haut, tend à freiner le mouvement de la pale. la figure D représente la situation - limite ($f=0$). Dans ce régime d'**AUTOROTATION** la portion hachurée de la pale est motrice, alors que le bout de pale "se fait traîner". Un régime **AUTOSTABLE** s'établit

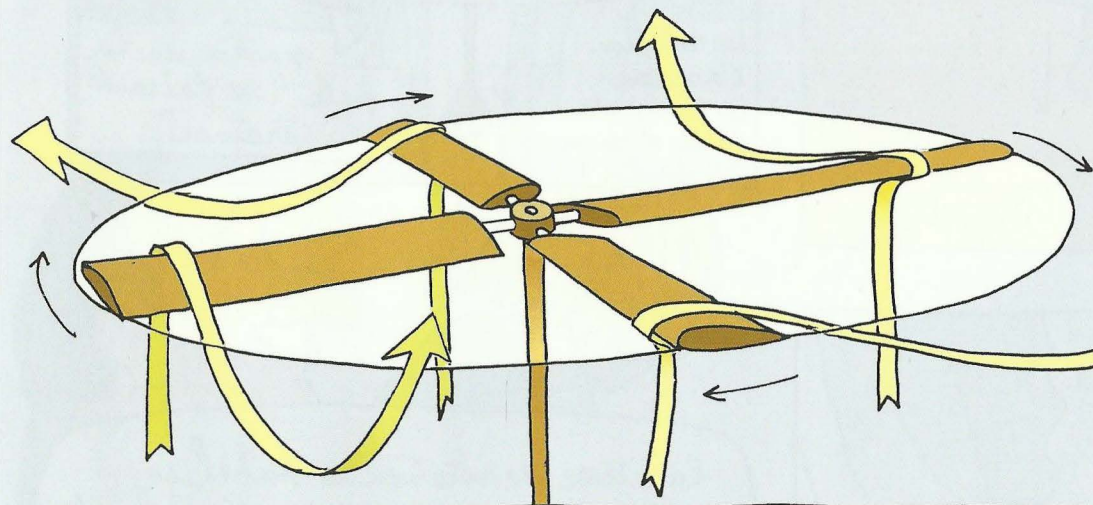
tout cela ayant été essayé en soufflerie par Juan de la Cierva



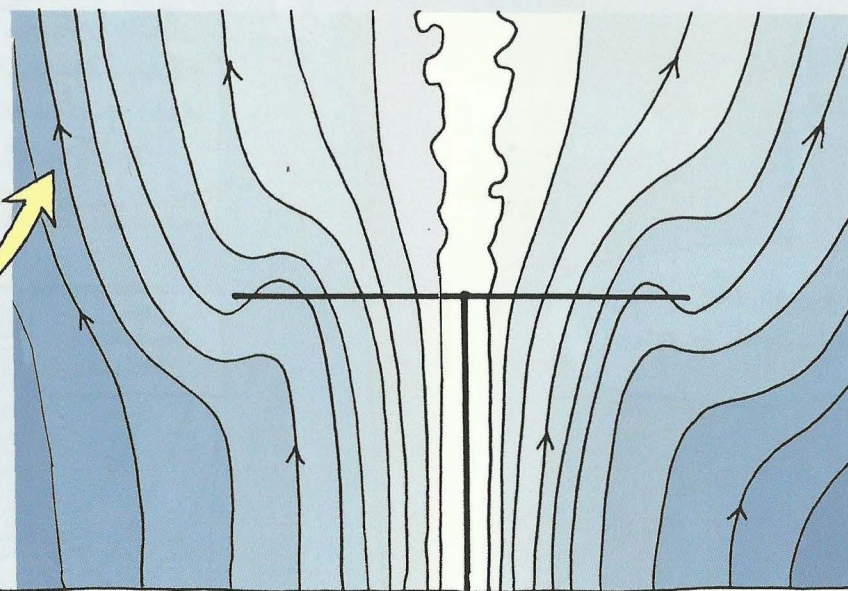
au dessus de la partie centrale
(écoulement "décroché", un
sillage fortement turbulent



Ici, l'écoulement recolle au profil de la pale

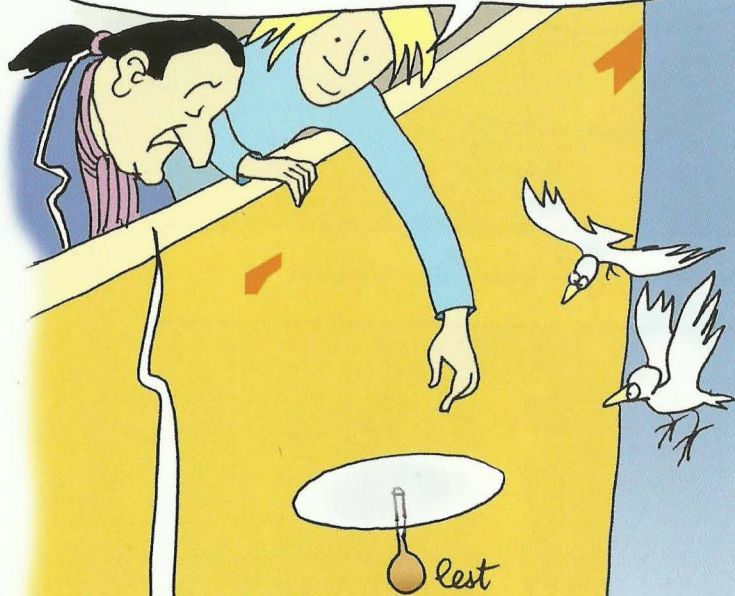


A la périphérie, l'impulsion communiquée à la
masse d'air, dirigée vers le bas (**VITESSE INDUITE**)
est suffisante pour que cet air ressorte en
dehors du disque balayé par le rotor



ce qui donne à l'écoulement global
l'allure étrange ci-dessus

Regardez, maître Pangloss, je lâche cette petite maquette par cette fenêtre après lui avoir communiqué une impulsion minimale

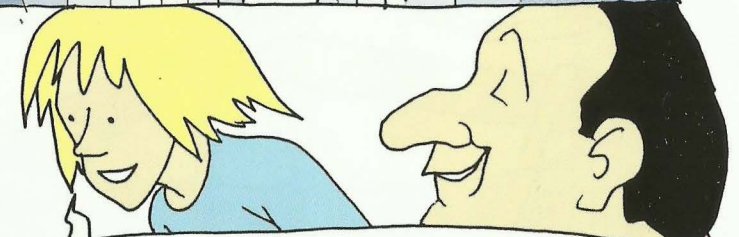
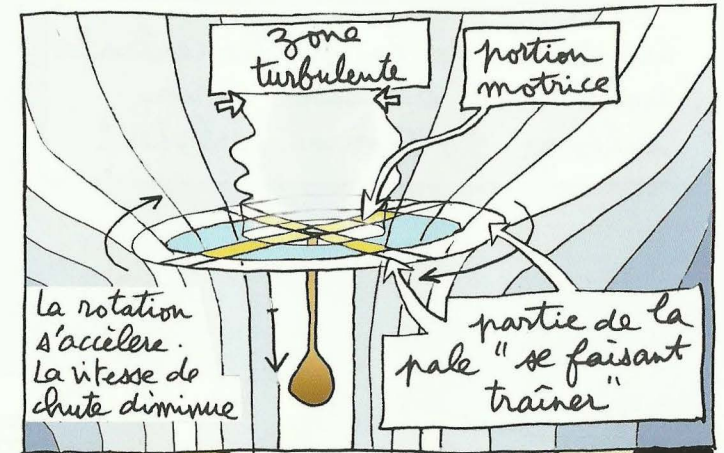


minimale ... par rapport à quoi?

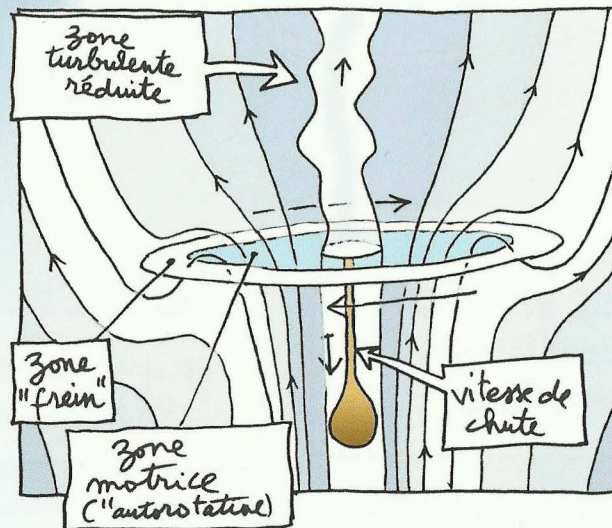
pour faire en sorte que la partie périphérique du rotor tourne assez vite pour que l'écoulement "recolle". Elle devient alors motrice et la rotation s'accélère



la portion d'écoulement turbulent ("traînante") se réduit au fur et à mesure que la rotation devient de plus en plus rapide. Apparaît alors en bout de pale une portion "hânanche".

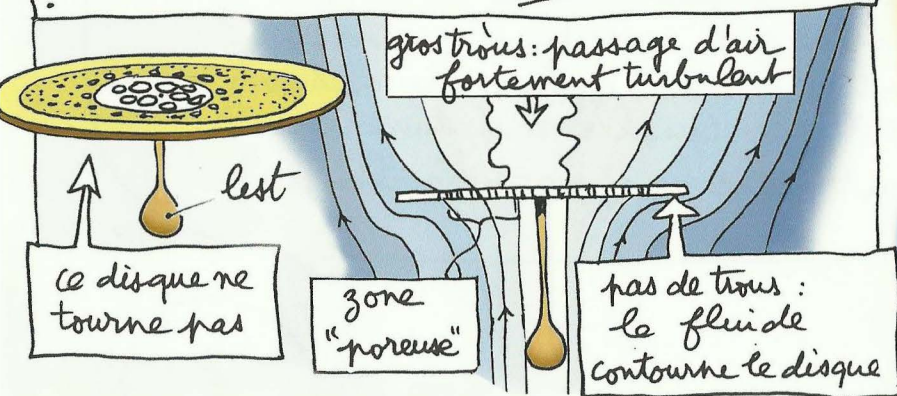


la vitesse de rotation se stabilise quand les deux couples s'équilibrent. Le régime d'autorotation est alors pleinement établi et la vitesse de descente est minimale



On obtiendrait un écoulement similaire si on lâchait un disque qui ne tourne pas, doté de perforations dont le diamètre décroît du centre à la périphérie, ce qui crée des zones de porosités différentes.

La Direction



que se serait-il passé si vous n'aviez pas donné une impulsion en rotation suffisante au départ?

la vitesse au bout des pales n'aurait pas été suffisante pour que l'écoulement "recolle" sur le profil. Donc pas de force motrice. Pas d'établissement du régime d'autorotation: la maquette tombe comme un caillou!

j'avais pensé un instant que ce dispositif aurait pu permettre à mademoiselle Curégonde de négocier son évasion. Mais je crois que c'est une affaire à se rompre les os

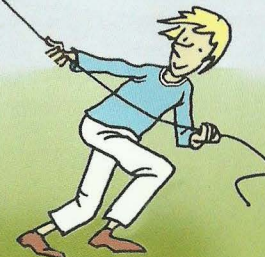
et l'autogire?

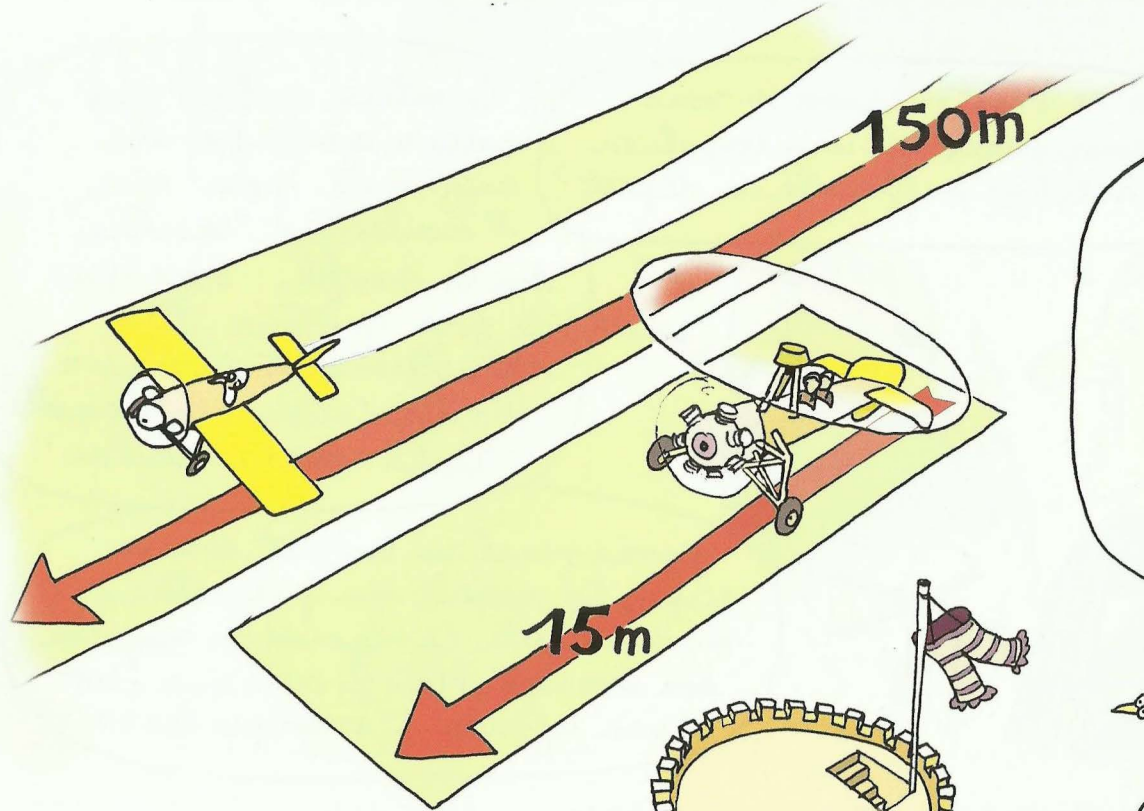
et pourtant il tourne(*)

maintenant que le mystère de l'autorotation de son rotor est élucidé il reste à ajouter à tout cela un zeste d'obliquité. Le rotor se comporte alors comme un disque à porosité décroissant, du centre vers sa périphérie

(*) et pur se muove (Galilée)

En somme l'autogire a un air de parenté avec un cerf-volant dont la toile aurait une porosité décroissante, du centre au bord, avec un gros trou au centre, par lequel passe de l'air turbulent

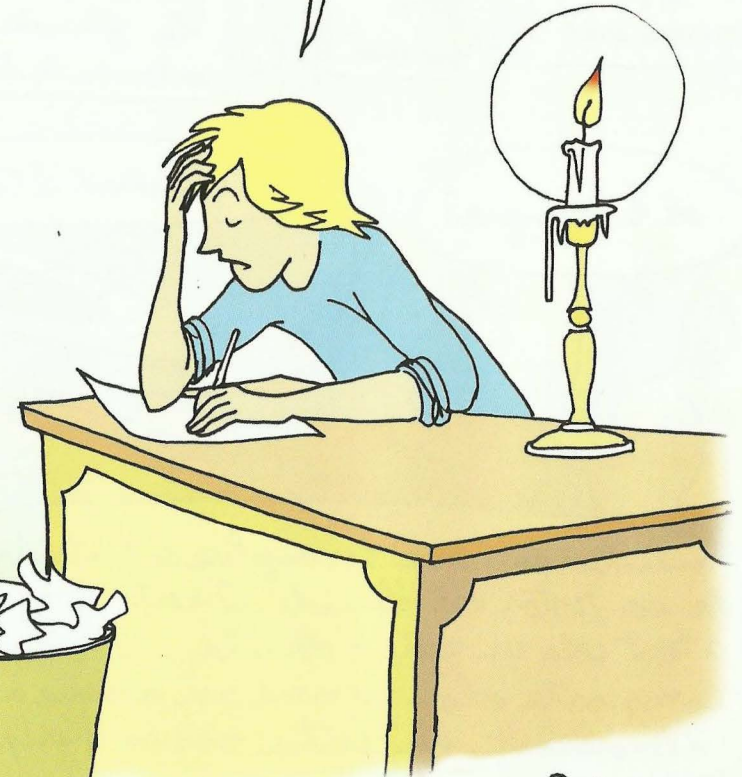
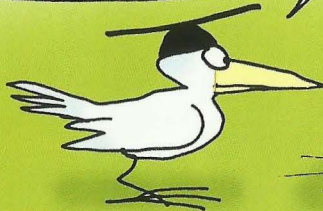


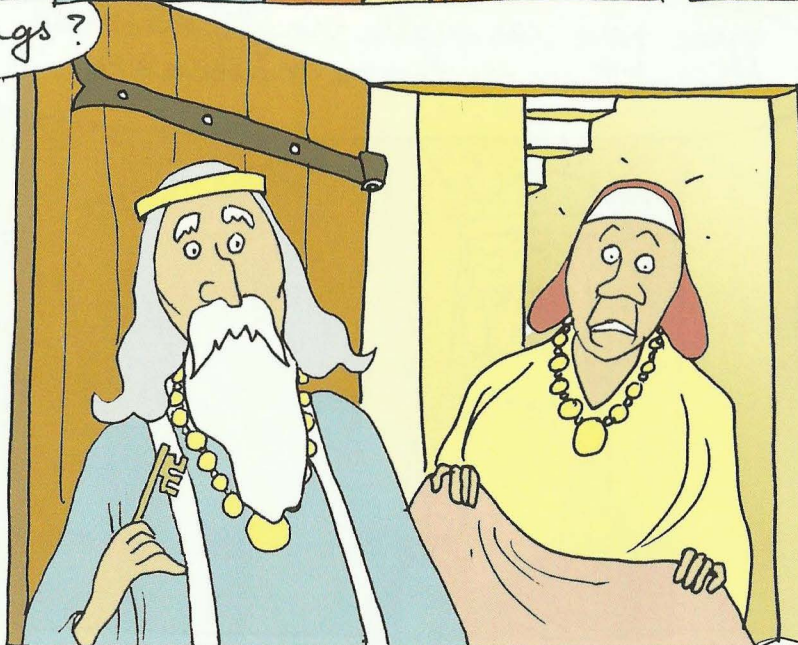


Résumons: l'aéroplane a besoin de 150 mètres pour se poser. L'autogire peut se contenter de 15 mètres. Mais la terrasse de la tour est si étroite que, pour s'y poser, il faut vraiment opérer une descente verticale. Quelle machine volante peut faire une pareille chose?



s'il y a une solution ça n'est pas celle-là



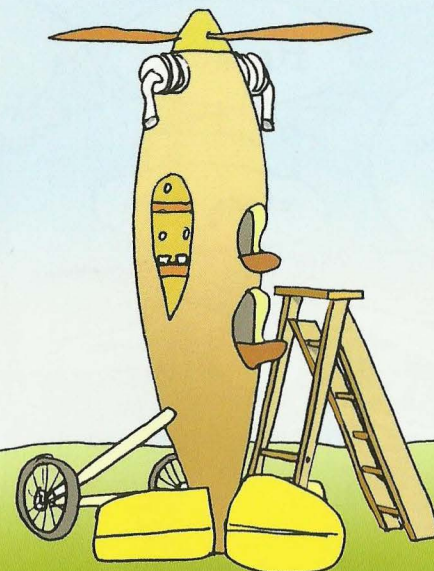




Finalement, ce pilote d'avion n'avait pas tort en voulant cabrer son appareil. Le mieux serait de transformer son hélice tractive en dispositif de sustentation. Et alors, tant qu'à faire, autant enlever carrément les ailes



alors, professeur, que dites-vous de cela ?

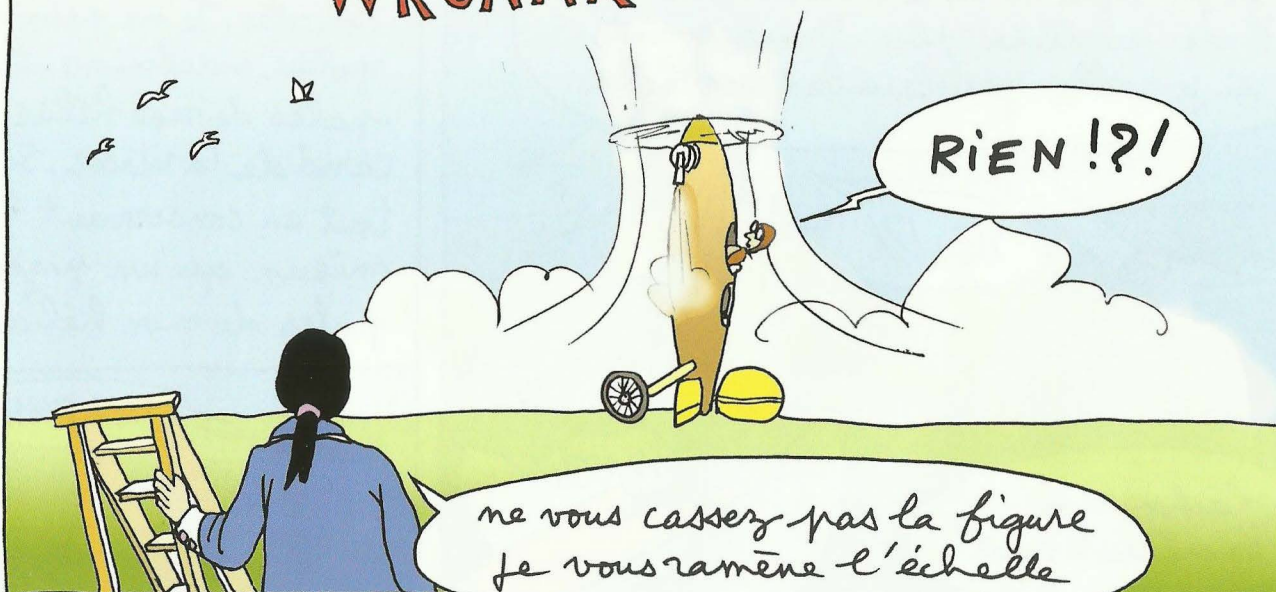


vous pouvez enlever l'échelle
je vais mettre les gaz à fond

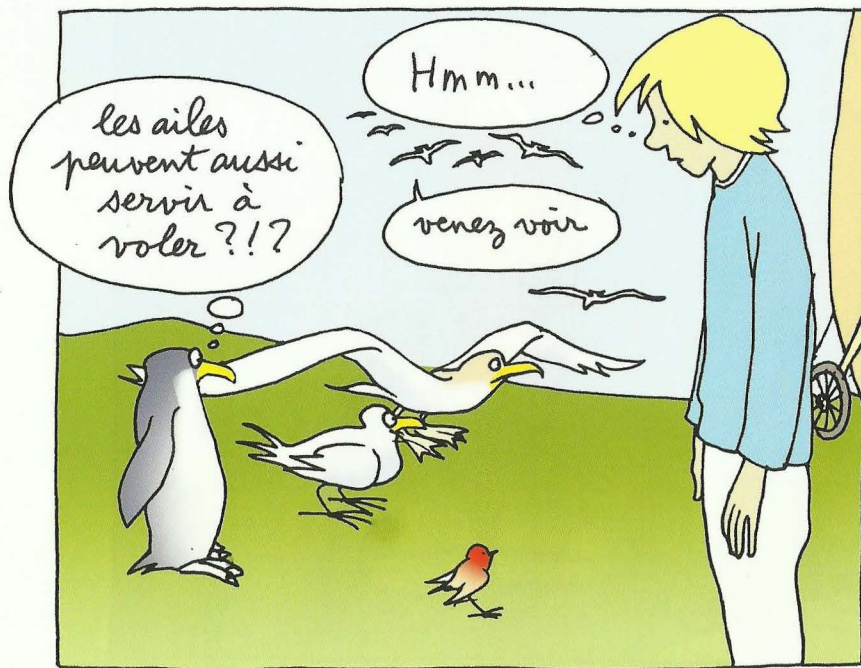


WROOAR

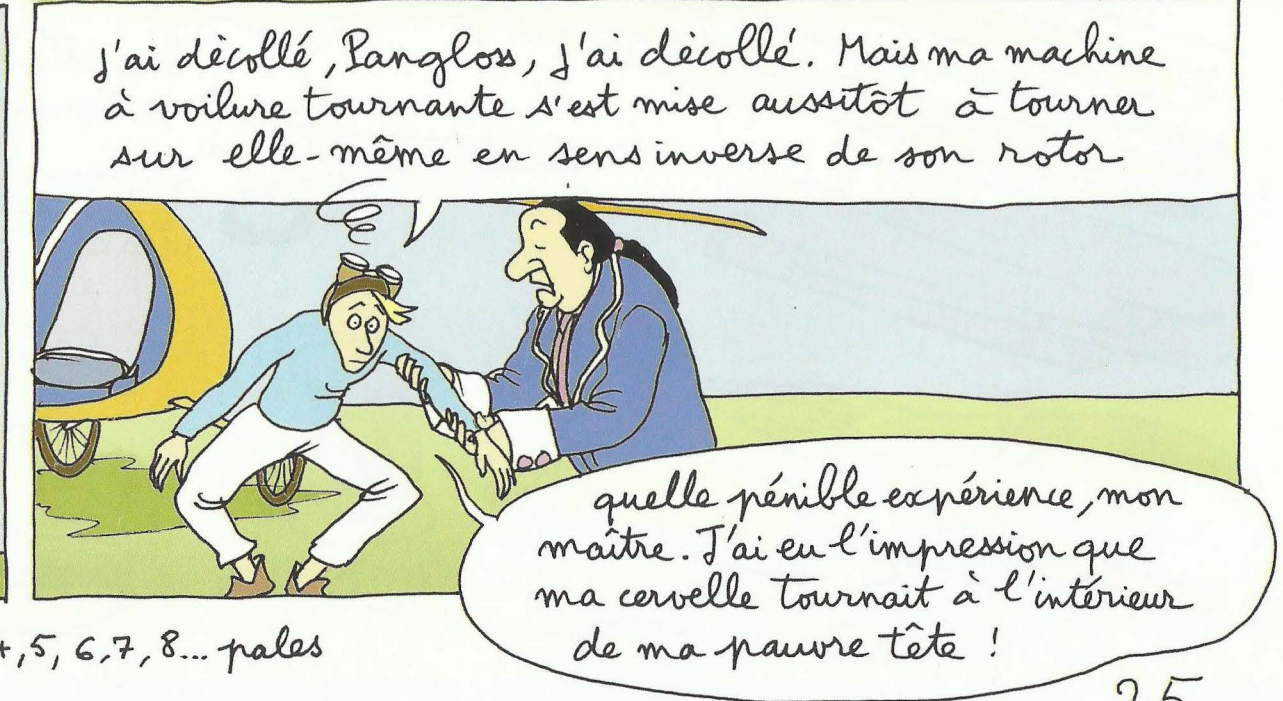
RIEN !?!



ne vous cassez pas la figure
je vous ramène l'échelle



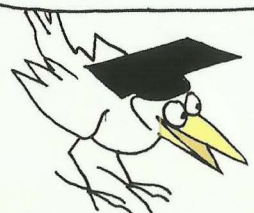
LE COUPLE



(*) mais tout ce qui suit vaut pour 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8... pales



voici un hélicoptère autostable, doté de deux rotors contrarotatifs dont l'un est solidarié du fuselage tournant



feuille de bristol
dérive montée "folle"

corde à piano, acier 5/10°

billes
rondelles

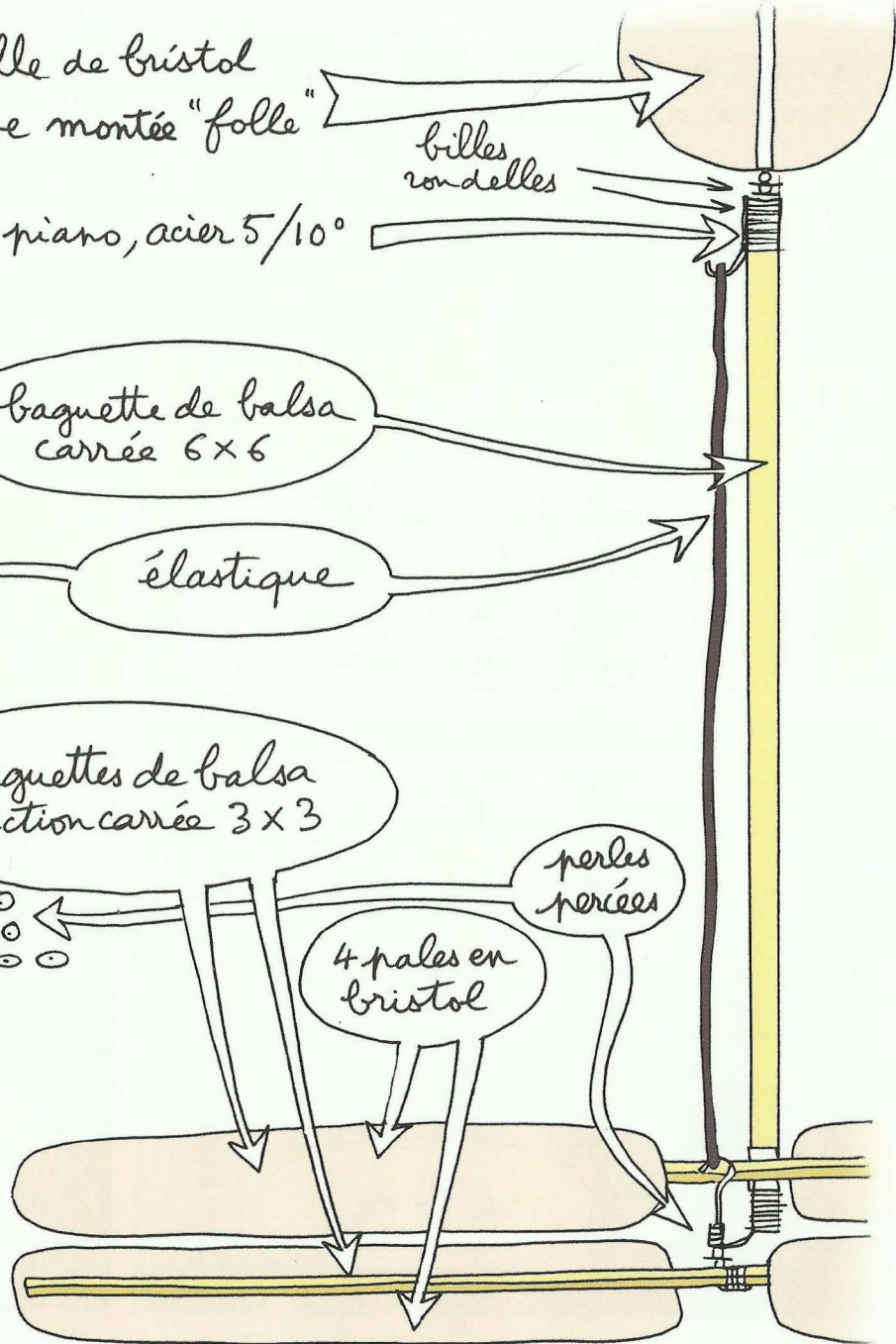
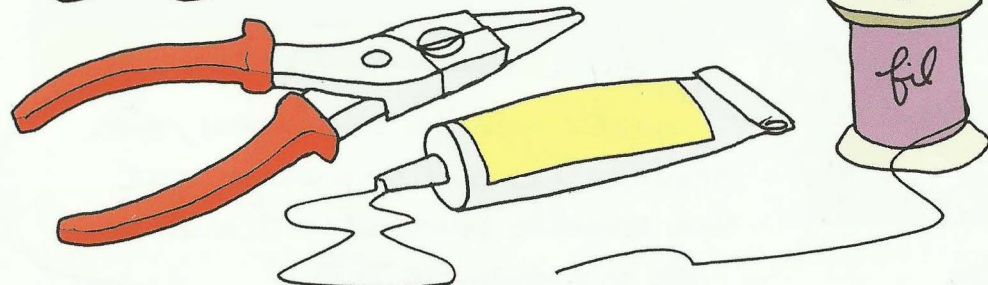
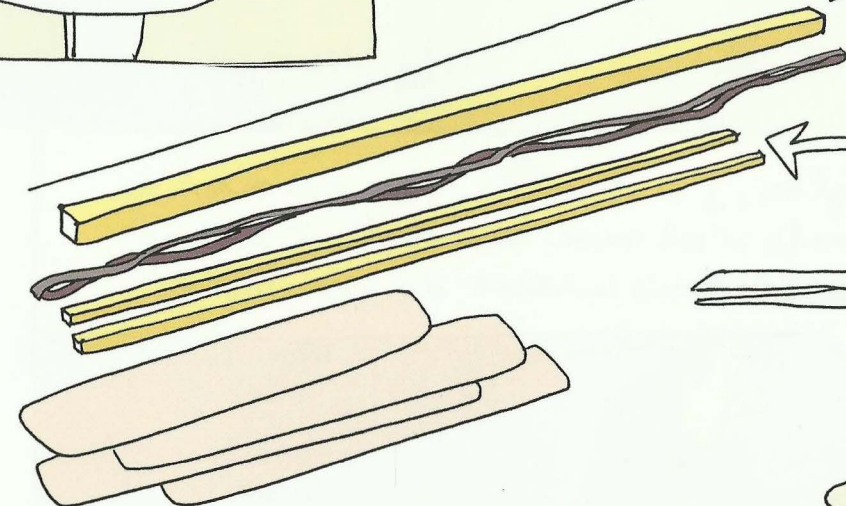
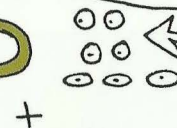
baguette de balsa
carrée 6x6

élastique

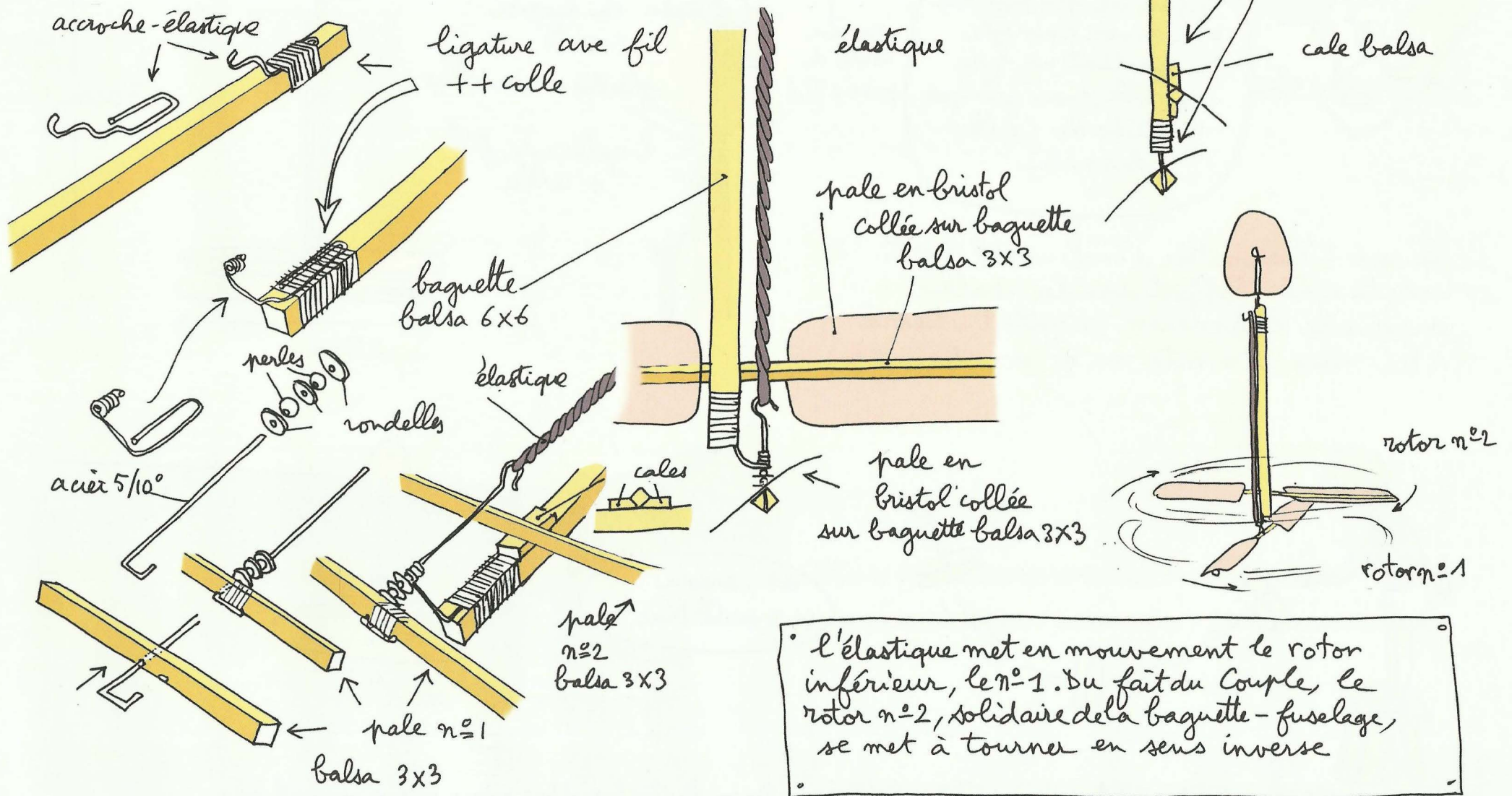
2 baguettes de balsa
de section carrée 3x3

perles
percées

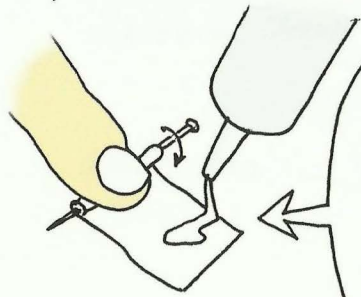
4 pales en
bristol



La partie délicate consiste à tordre la corde à piano en se servant de DEUX pinces, de manière à fabriquer ces éléments :

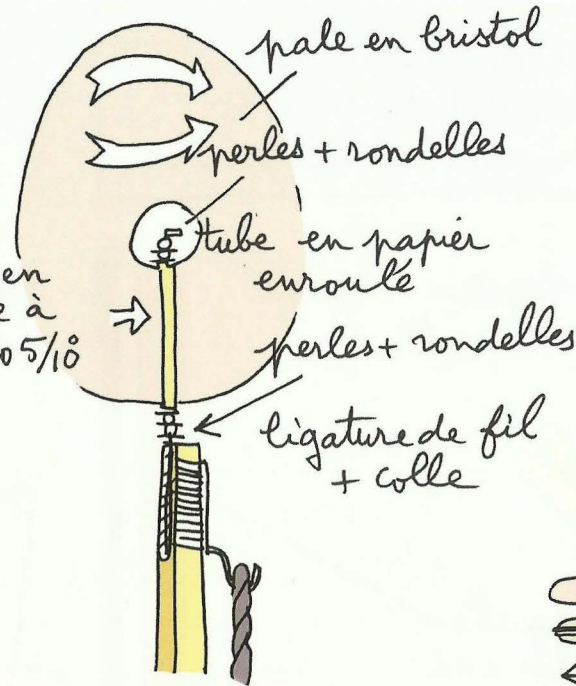


Montage de la pale supérieure,
qui rend l'engin autostable

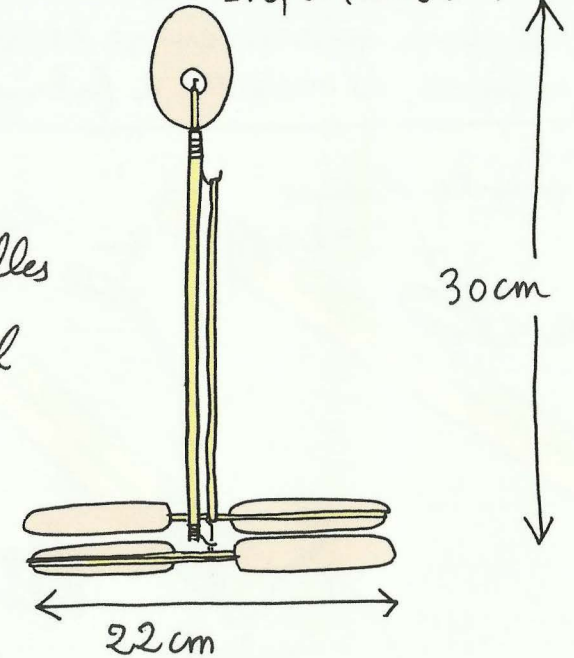


enrouler un
ruban de papier sur
une grosse épingle
en ajoutant un peu
de colle, pour fabriquer
un tube de faible
diamètre

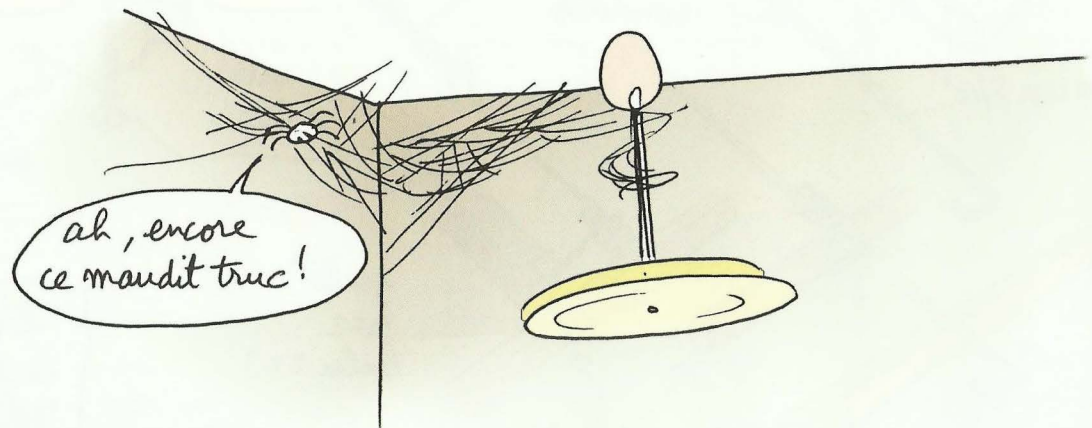
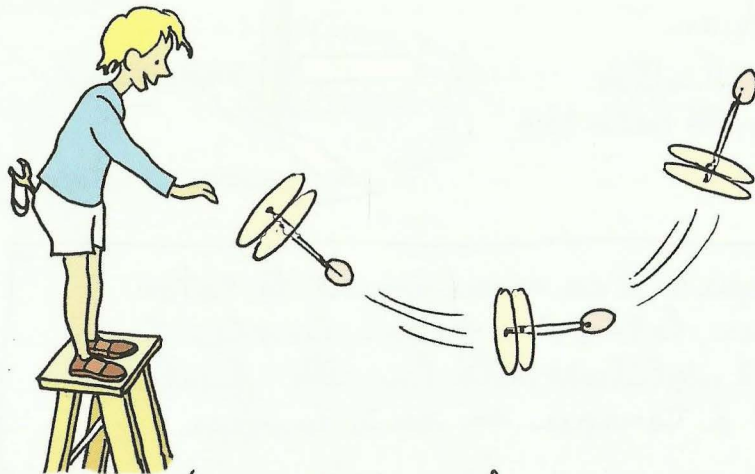
Axe en
corde à
piano 5/10



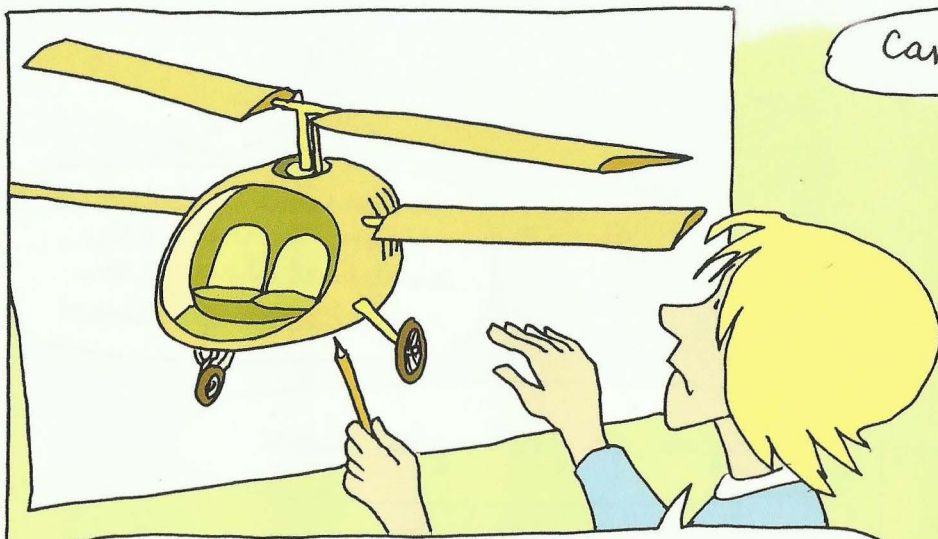
Proportions:



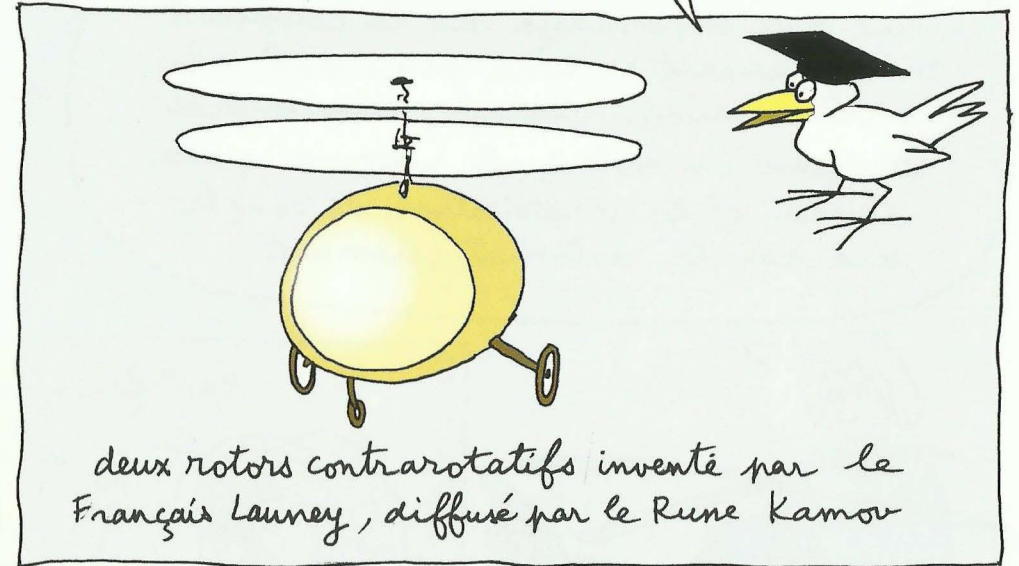
quand l'hélicoptère s'incline, il part.
sur le côté. L'effort sur la pale
supérieure le redresse aussitôt. Livré
à lui-même, il monte en se dandinant (*)



(*) Quand j'étais enfant, j'utilisais cet engin pour enlever les toiles d'araignées accrochées
aux hauts plafonds du château de Thiers, dans les deux-Sèvres (France)

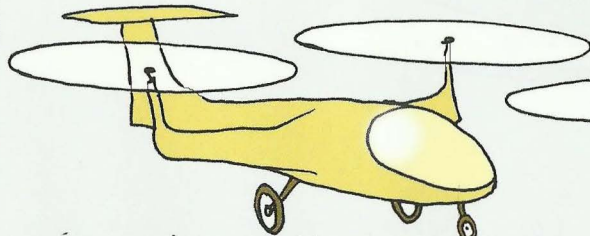


Candide envisagea différentes solutions



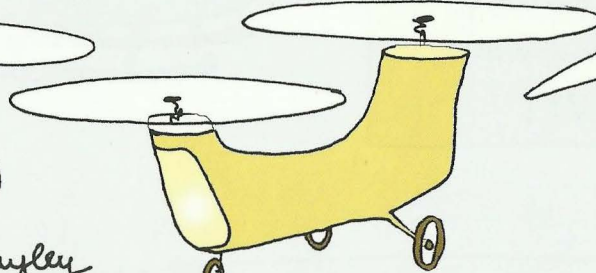
deux rotors contrarotatifs inventé par le Français Launey, diffusé par le Russe Kamanov

rotors latéraux



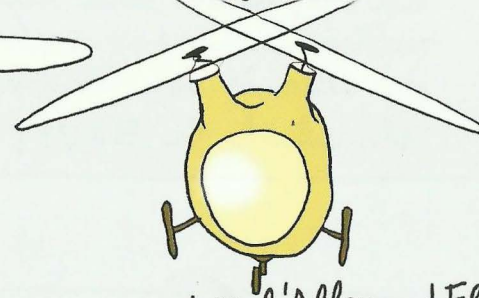
inventé par l'Anglais Cayley
repris par l'Allemand Focke

rotors en tandem



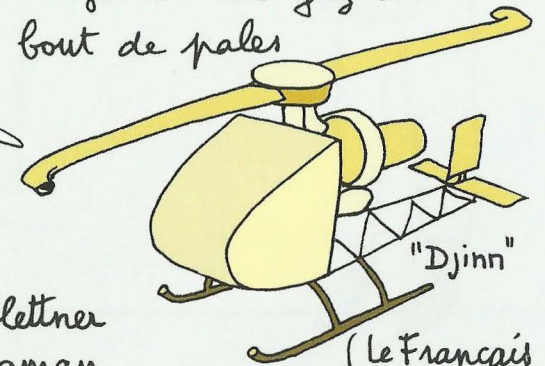
inventé par le Français Cornu
développé par Piasecki

rotors engrenants



par l'Allemand Flettner
développé par Kaman

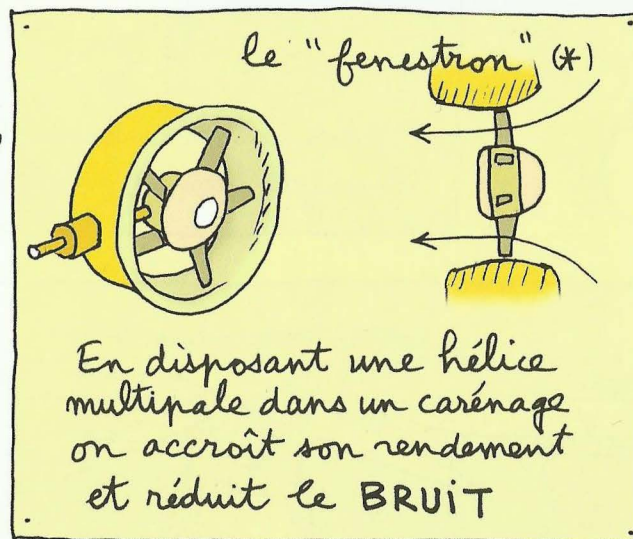
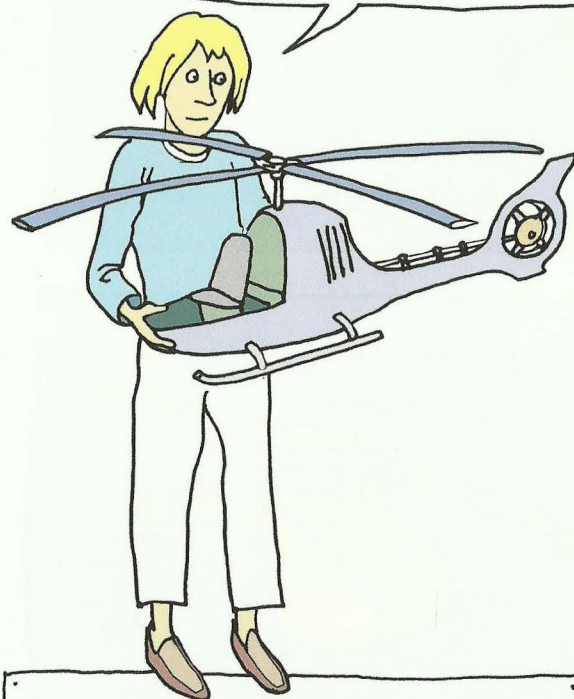
éjection de gaz en
bout de pales



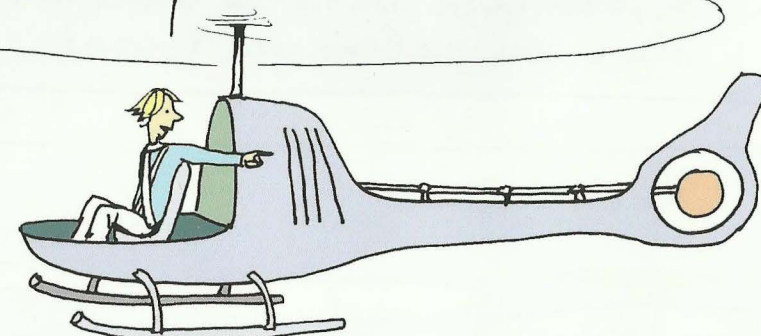
(le Français Morain)

Yves Le Bec a écrit, en l'illustrant d'excellents dessins, un ouvrage intitulé "La véritable histoire de l'hélicoptère, de 1486 à 2005", publié aux éditions Ducret SA, CH-1022 Chavannes-près-Renens ISBN 2-8399-0100-5. Vous y trouverez tous les modèles d'hélicoptères imaginés par les hommes

je vais mettre un rotor anticouple au bout d'un empennage. En le couplant mécaniquement au rotor principal cela devrait marcher. Quand j'augmenterai le régime du moteur, le rotor de queue suivra et la compensation du couple sera assurée automatiquement



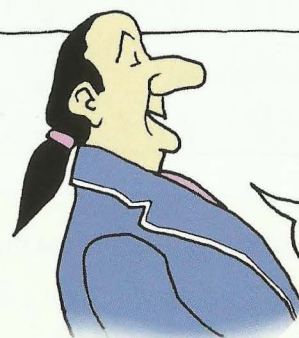
Pangloss, ça y est, j'ai réussi !



reviens immédiatement sinon tu vas être aspiré et changé en rondelles de saucisson



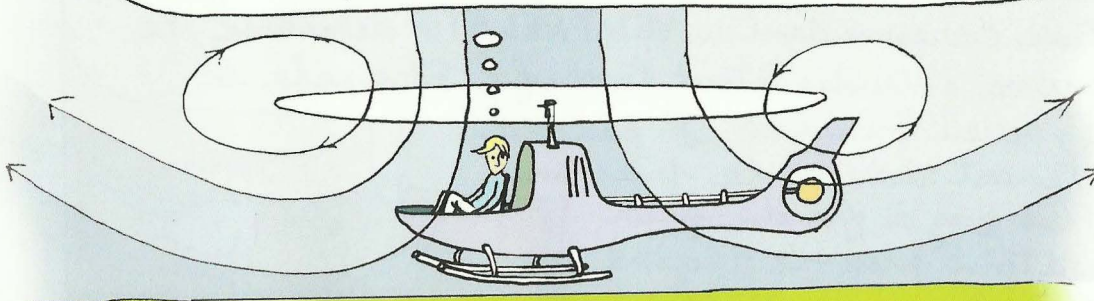
Le rotor de queue anticouple a été imaginé par le russe Yuriev et développé par Igor Sikorski
 (*) le fenestron a été introduit par le Français Mouille



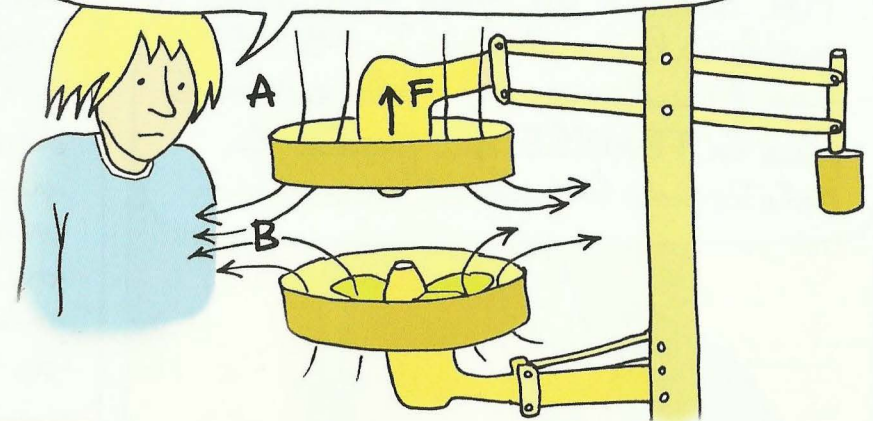
Ceci montre bien que tout est pour le mieux dans la meilleure des aéronautiques possibles

EFFET DE SOL

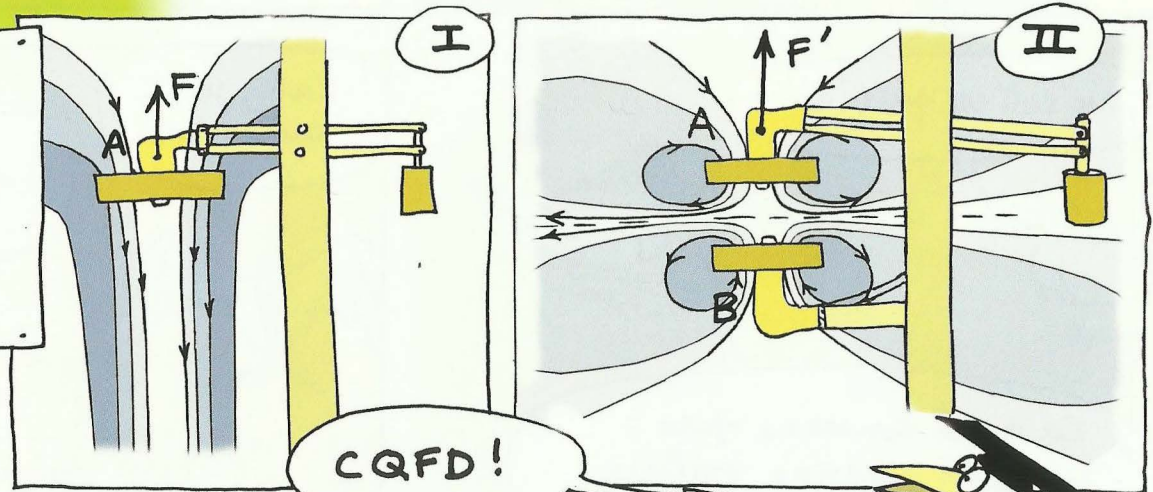
c'est curieux. Près du sol j'arrive à me maintenir avec une puissance sensiblement plus faible (*)



cette machine n'est rien d'autre qu'un bon gros ventilateur. Je vais en faire travailler deux en les mettant face à face



A régime égal la force ascensionnelle qui s'exerce sur le ventilateur A est plus importante quand il travaille face au ventilateur B, qui pousse l'air dans l'autre sens que si le ventilo A est seul



l'écoulement II est le même que si on faisait travailler le ventilateur A face au sol

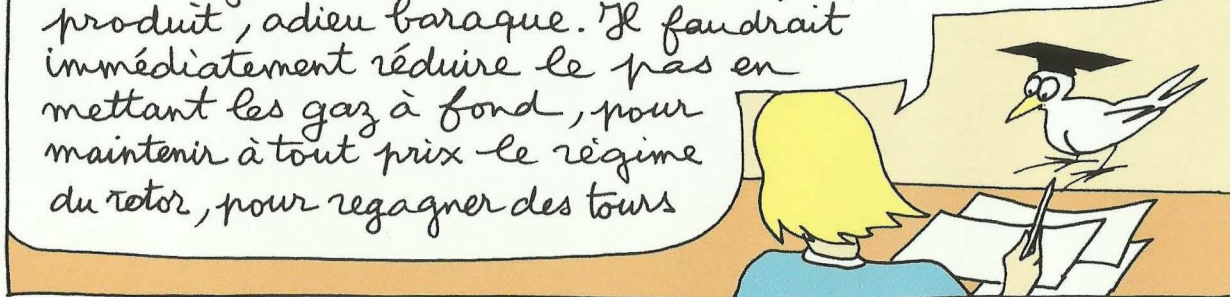
(*) l'effet de sol devient important quand le rotor est à une distance du sol égale ou inférieure à la moitié de son diamètre

"PRENDRE DES TOURS"

Mon rotor a un pas fixe. Mais quelle valeur choisir? Plus le pas, l'incidence des pale est élevée plus la **TRAINÉE** qui freine la rotation de la pale est importante



Si mon moteur, pour une raison quelconque, subit une perte de puissance, la traînée va ralentir sa rotation(*) Si la vitesse correspondant au **VENT RELATIF** diminue, le décrochage va s'étendre à tout le profil. Et si cela se produit, adieu baraque. Il faudrait immédiatement réduire le pas en mettant les gaz à fond, pour maintenir à tout prix le régime du rotor, pour regagner des tours



qu'est ce qu'il dit?

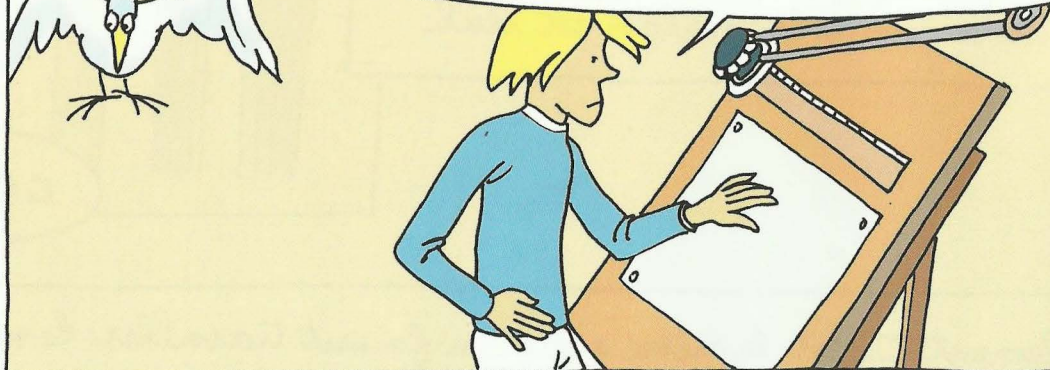


ça ne te concerne pas. Tu n'as pas une voilure tournante, que je sache?

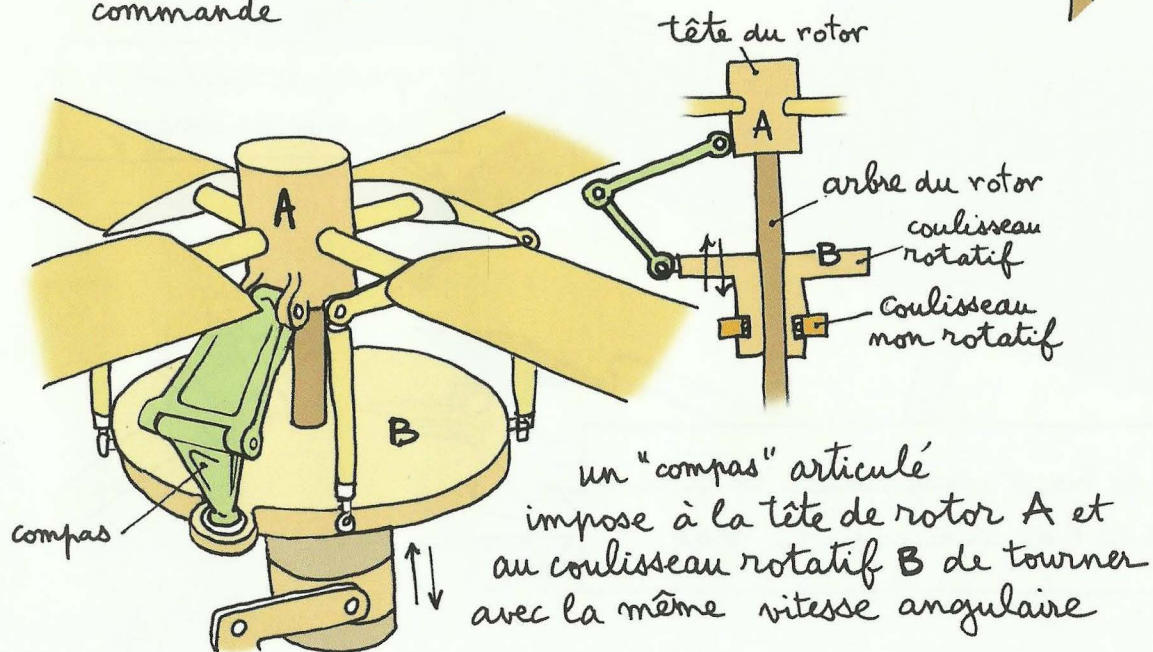
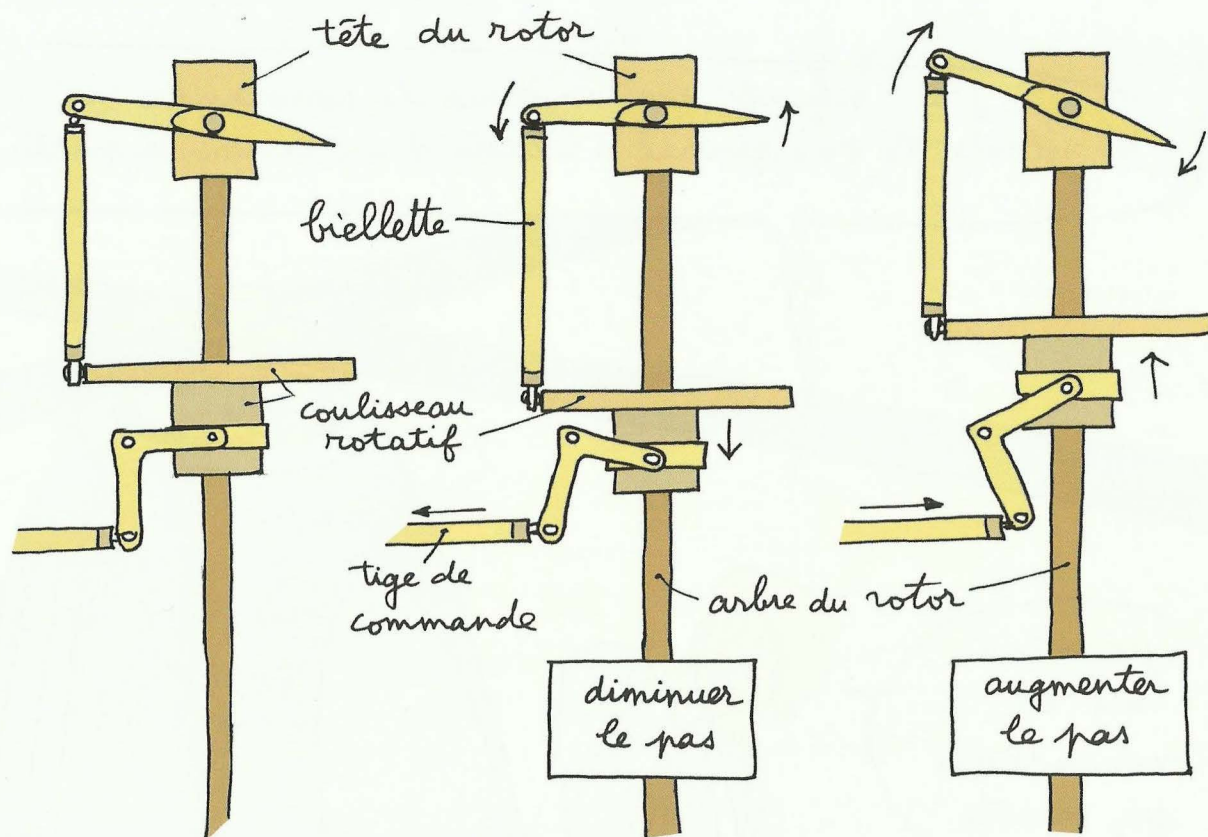
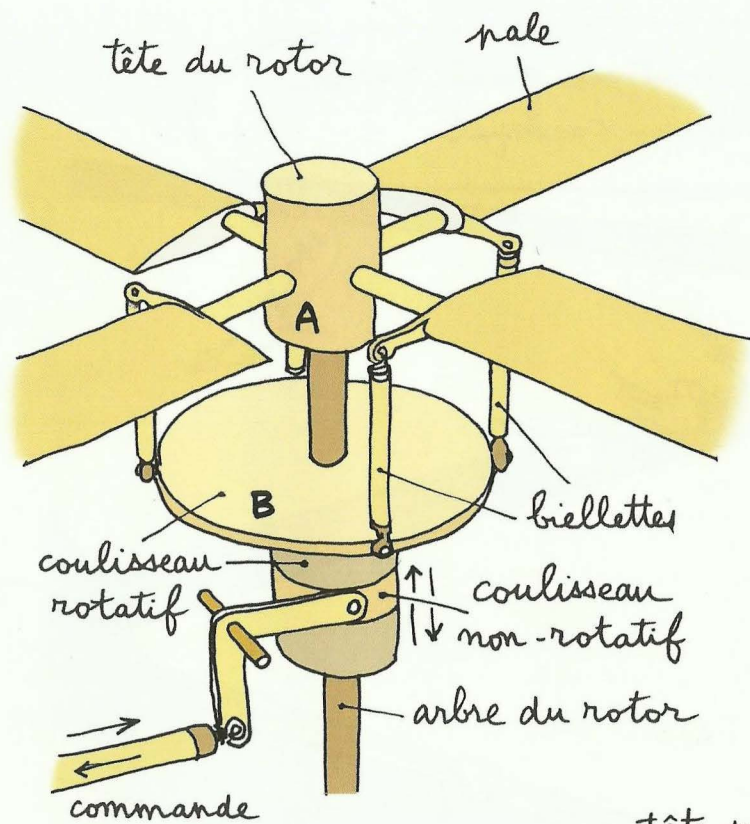
Euh, je ne crois pas...



il faut que je puisse modifier le pas, c'est-à-dire l'angle d'attaque des pales quand je serai en vol



(*) un rotor dont le moteur cesserait brutalement de fonctionner serait dangereusement ralenti en ... une seconde !



avec un système de ce genre on peut faire varier collectivement le pas des pales d'un rotor en agissant sur un coulisseau non rotatif B, lié par un palier à billes à un coulisseau rotatif A, lequel retransmet l'ordre aux pales par l'intermédiaire de bielles

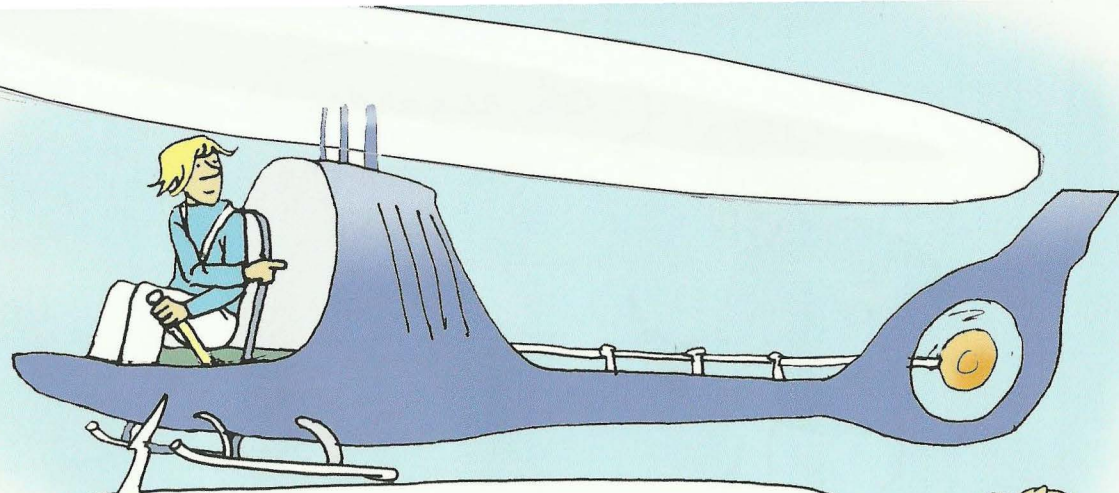
La Direction

J'ai adapté une tringlerie de commande qui me permet de faire varier à volonté le pas général à l'aide d'un levier, à partir de mon cockpit

J'ai même mis la commande des gaz dessus

poignée rotative :
commande des gaz

levier vers le haut : augmenter le pas
levier vers le bas : diminuer le pas



j'ai adapté le même système sur le rotor de queue, anticouple, pour éviter de faire des embardées quand je modifie le pas général. Et j'ai adjoïnt une commande aux pieds, par palonnier, qui me permet de tourner sur place



quoi ?
j'entends rien ...

Bien. J'ai conçu cette machine volante capable de nous emporter, Curiégonde et moi. Je peux monter, descendre, tourner sur moi-même à volonté. Reste une question : Comment avancer ?



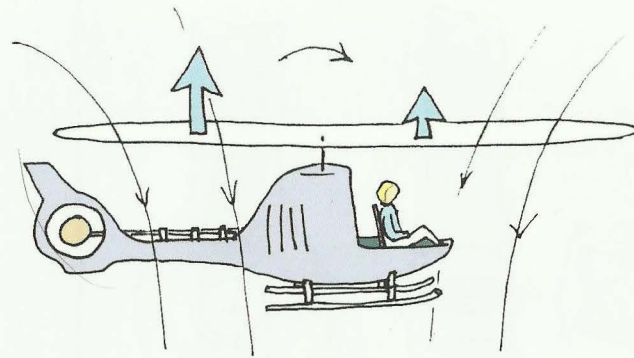
Pourquoi ne pas ajouter une hélice, des gouvernes ?

tout cela me paraît bien compliqué

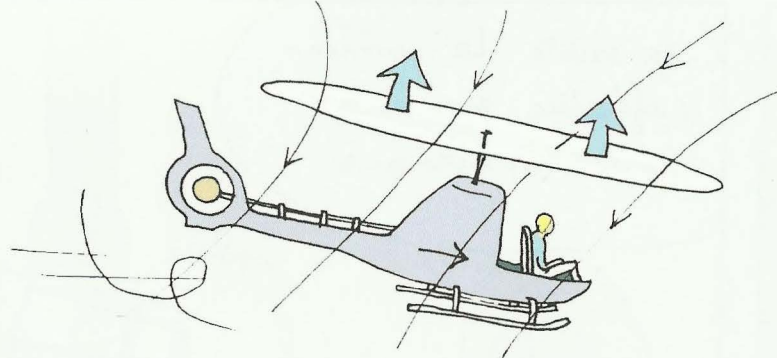




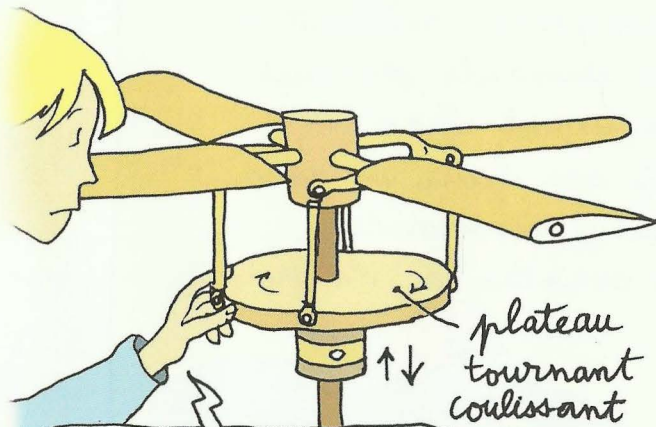
STATIONNAIRE



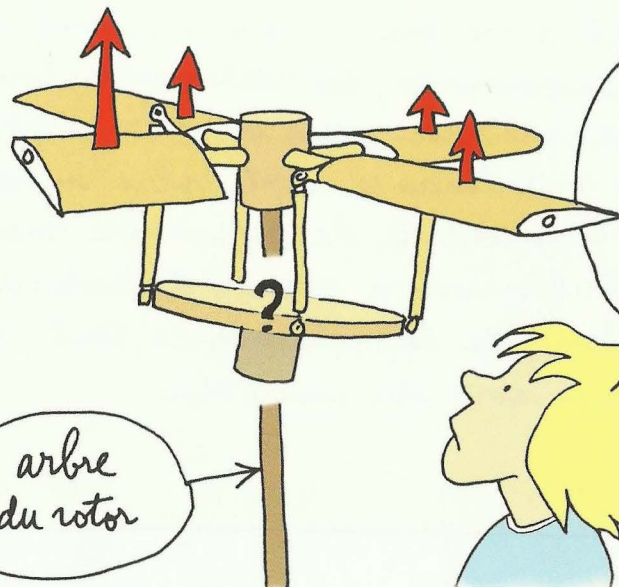
TRANSLATION



Si je pouvais accroître la portance des pales de mon rotor quand celles-ci sont vers l'arrière et la diminuer quand elles sont vers l'avant, à l'aide d'une **VARIATION CYCLIQUE DU PAS** je pourrais provoquer le basculement de ma machine et l'engager dans un mouvement de **TRANSLATION**



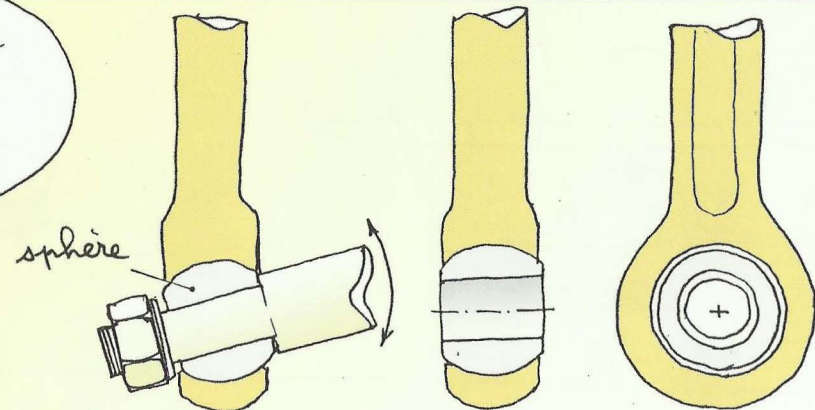
le pas de mes pales est donné par la position d'un plateau rotatif coulissant sur l'arbre du rotor



arbre du rotor

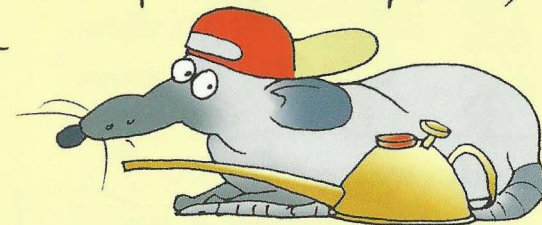
Si je pouvais faire en sorte que ce plateau présente une inclinaison, tout en tournant, je pourrais créer cette variation cyclique du pas(*) des pales. Mais comment articuler et commander tout ce bazar !?!

(*) inventée par l'Espagnol **PESCARA** qui introduit le concept d'**AUTOROTATION**

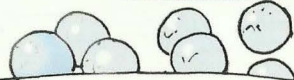
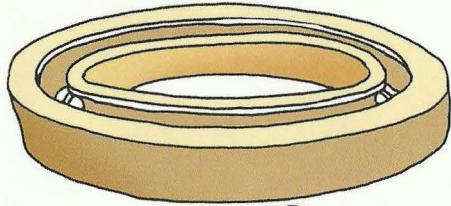
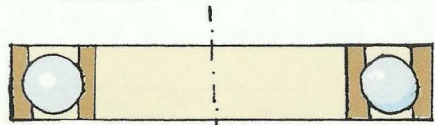
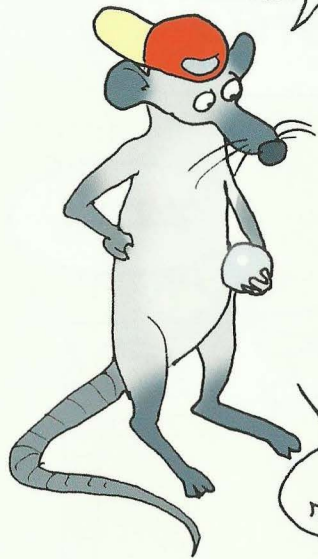


L'un des éléments se termine par une rotule sphérique qui est maintenue dans un logement par sertissage, ce qui autorise un certain débattement.

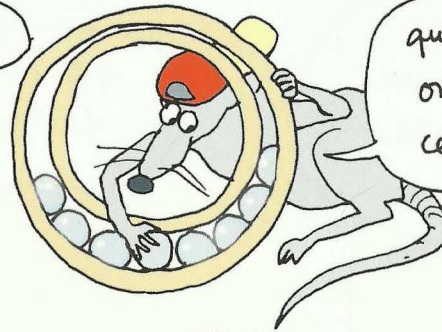
La vie d'un pilote d'hélicoptère est accrochée à une mécanique complexe, mettant en jeu des biellettes de ce genre, des engrenages, des roulements, tous ces éléments devant être usinés avec la plus grande précision, puis surveillés et périodiquement changés. Les coûts de fabrication et de maintenance sont plus importants que pour un avion. Depuis les années soixante dix le recours à de nouveaux matériaux : composites, élastomères, composants à auto-lubrification a permis de réduire la complexité le poids, les coûts de fabrication, le rythme de la maintenance, tout en gagnant en fiabilité, mais ceci sort du cadre du présent ouvrage.



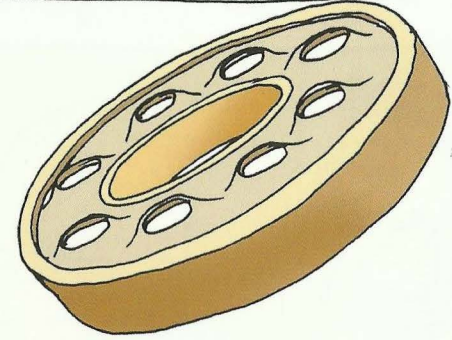
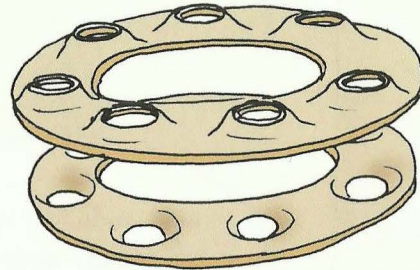
un élément important est le roulement à billes



mais, comment fait-on rentrer ces fichues billes ?

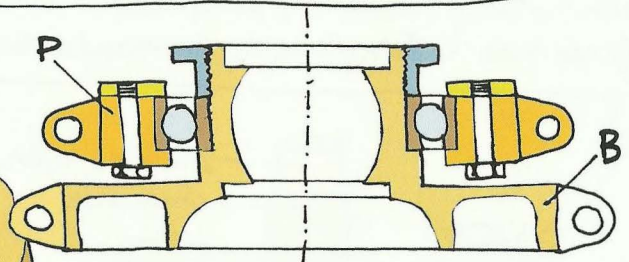
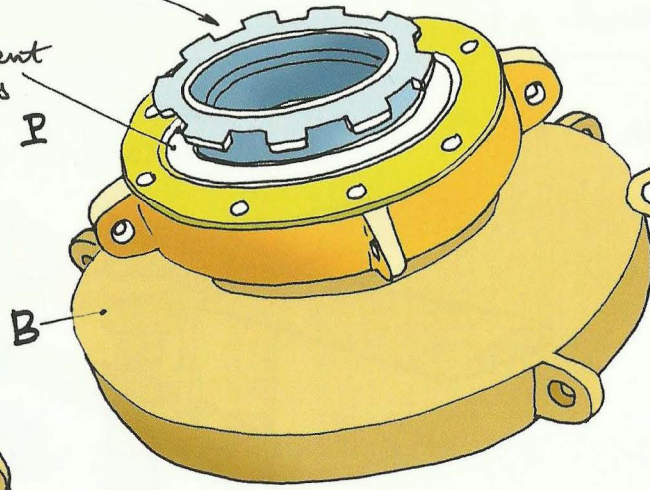
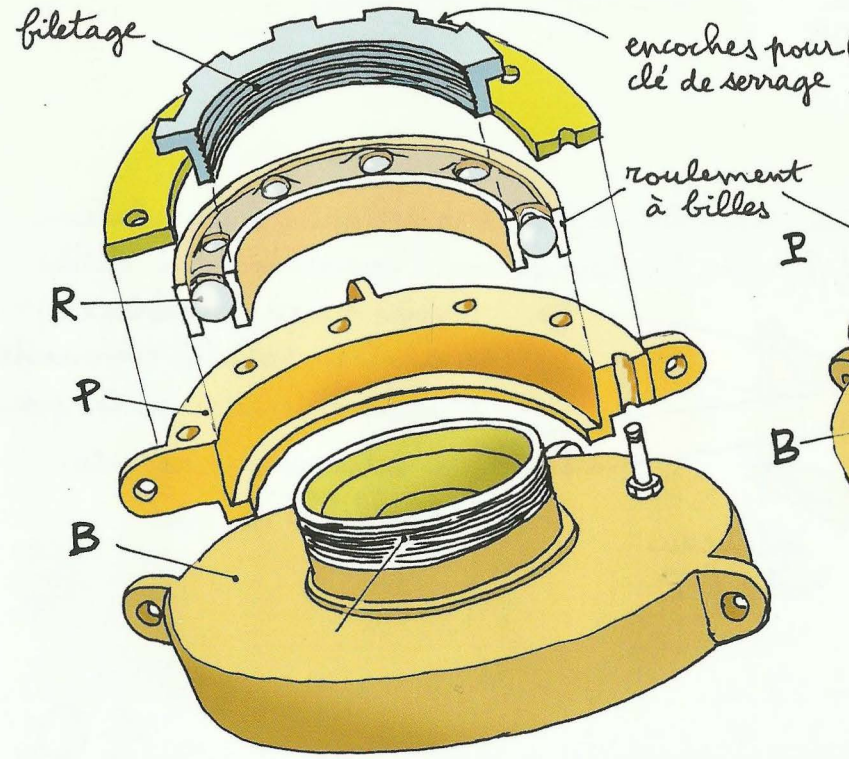


quand on décentre les bagues on peut introduire un certain nombre de billes



celles-ci sont ensuite maintenues

en place par une cage constituée par deux éléments qui sont soudés, sertis ou collés

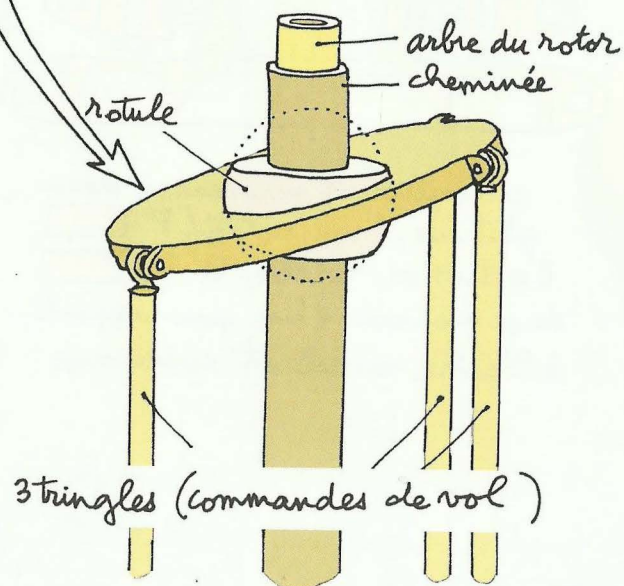


ce roulement permet à deux plateaux, l'un rotatif P l'autre non-rotatif B de se mouvoir l'un par rapport à l'autre en restant coaxiaux

je ne voudrais pas vous faire de peine, mon vieux, mais votre avion sur le plan mécanique, à côté c'est de la rigolade



Sur cette rotule pivotera un plateau B, non rotatif, dont l'orientation sera fixée par la tringlerie des commandes de vol

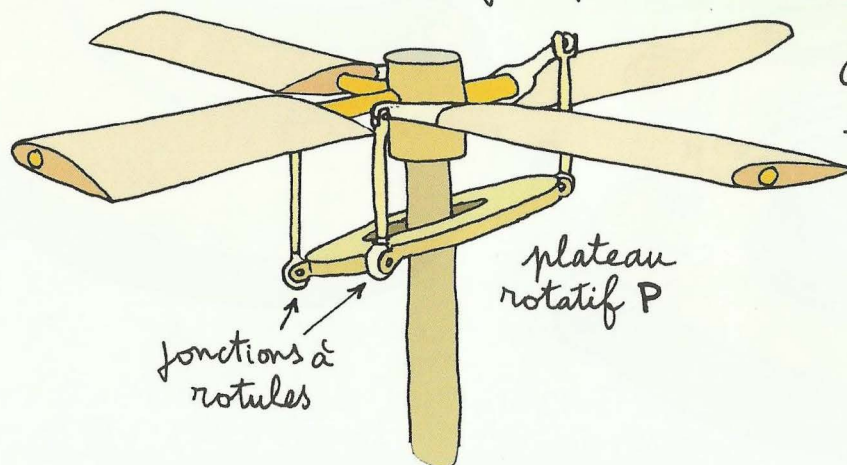


pour faire tourner droit un truc qui est de travers, la solution, c'est la **ROTULE**

une rotule qui coulissera sur une **CHEMINÉE** à l'intérieur de laquelle tournera l'**ARBRE DU ROTOR**



le plateau non-rotatif B sera solidaire d'un plateau rotatif P par l'intermédiaire d'un roulement à billes (voir page précédente) le plateau rotatif commandera l'inclinaison des pales par l'intermédiaire de biellettes de pas

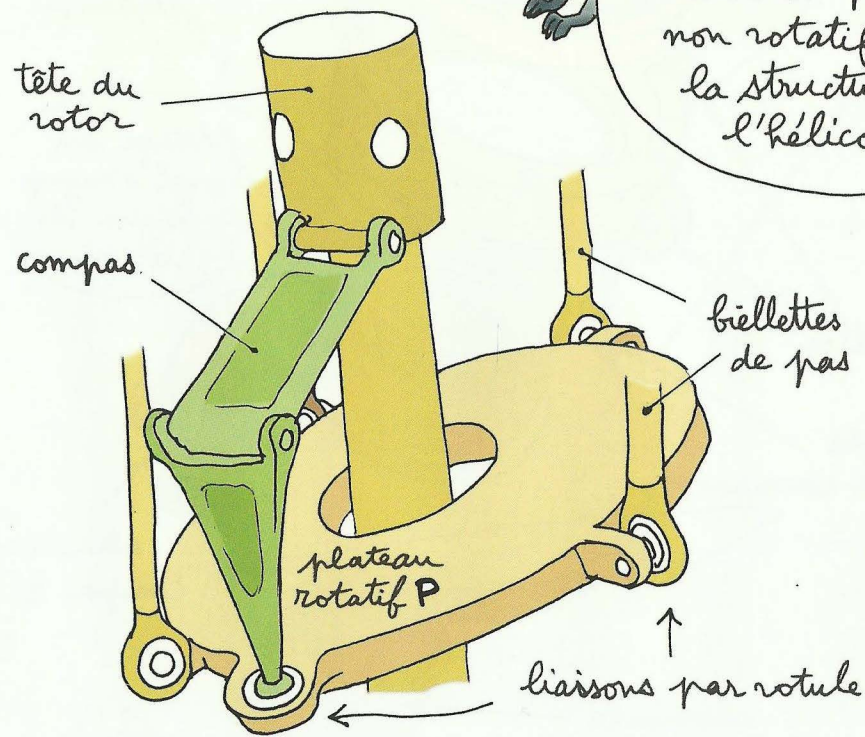
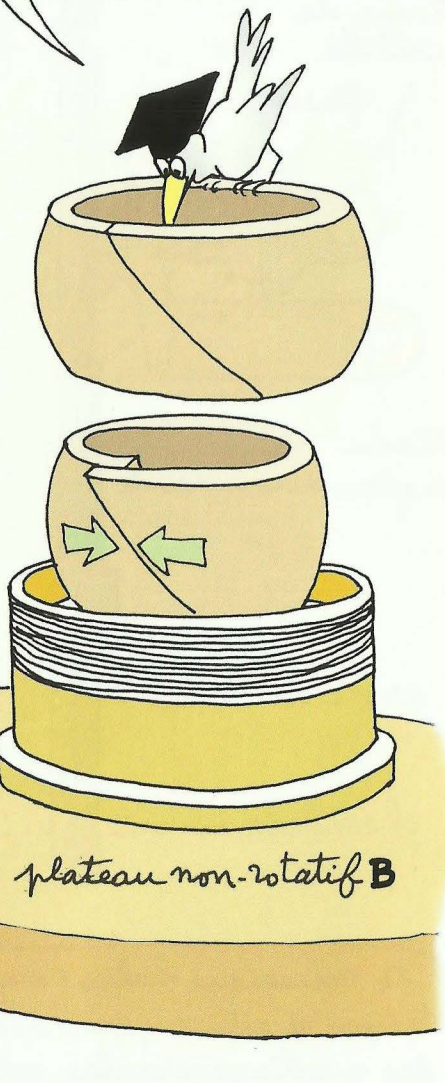


avant de conclure cette étude de plateau cyclique il reste quelques problèmes. Primo, comment solidariser le plateau rotatif **P** de la tête du rotor. On ne va pas confier cette tâche aux fragiles biellettes ?

Seconde question = comment placer la rotule dans son logement, situé dans le plateau **B** ?

non, un ciseau s'en chargera. Et on mettra le même dispositif entre le plateau non rotatif **B** et la structure de l'hélicoptère

la rotule est une bague en téflon, auto-lubrifiante, fendue dont la portée intérieure est cylindrique et la portée extérieure sphérique. En la déformant comme indiqué on peut la glisser dans son logement sans difficulté. On peut ensuite enfile le tout dans la cheminée à l'intérieur de laquelle tourne l'axe du rotor



SYNTHÈSE PAGE SUIVANTE →

PLATEAU CYCLIQUE

attache de bielle
flasque
attache de tringlerie de commande

arbre du rotor

cheminée

arbre rotor
collier de fixation du ciseau I
Compas II
filetage
bague de serrage
flasque boulonnée
plateau rotatif
plateau non-rotatif
Compas I

attaches des bielles de pas

attaches de tringlerie de commande

cheminée

attache du compas II
bague en téflon, fendue pour permettre le montage avec portée sphérique (rotule)

encoches permettant l'adaptation d'un outil de serrage

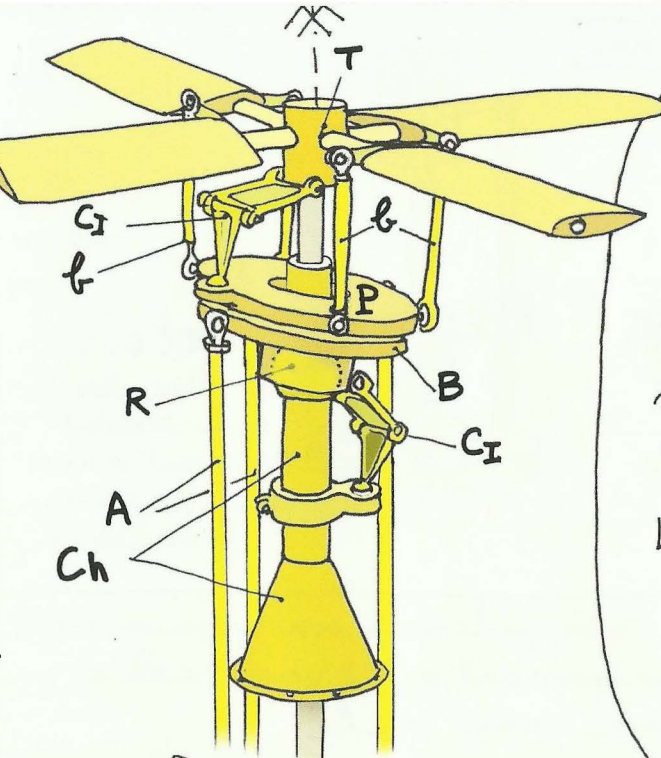
portée sphérique

filetage sur lequel s'engage la bague de serrage

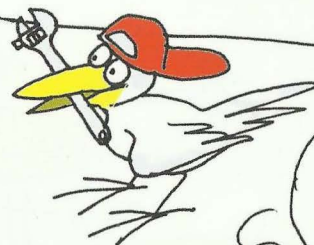
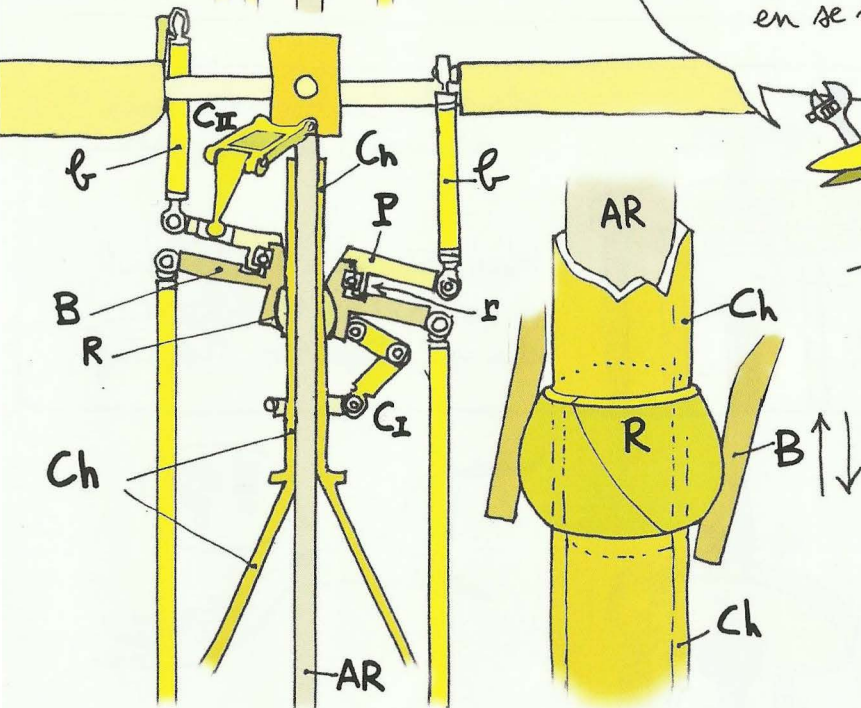
attache compas I

la mécanique hélico requiert des trésors d'astuce pour déboucher sur des montages simples, solides, légers, résistants, ne comportant qu'un nombre minimal de pièces

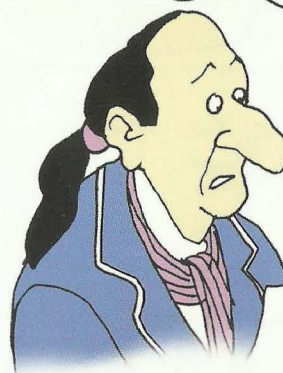




Revenons à une description schématique, plus lisible.
 Une tringlerie de commande **A**, constituée de trois barres, fait monter, descendre et basculer en tous sens un plateau non-rotatif **B**, guidé par la rotule **R**, laquelle coulisse librement sur la cheminée **Ch**, solidaire de la structure de l'hélicoptère. Un premier **COMPAS CI**, fixé sur la cheminée **Ch** s'oppose à tout mouvement de rotation du plateau **B** par rapport à la structure de l'hélicoptère (cheminée **Ch**). Le plateau cyclique rotatif **P** est lié par un roulement à billes **r** au plateau non-rotatif **B**. L'attitude du plateau **B** est fixée par le pilote par l'intermédiaire de la tringlerie de commande **A**. Le plateau **P** répercute cet ordre aux pales par l'intermédiaire des biellettes **f**. Un second compas **CII** rend solidaires la tête de rotor **T** et le plateau cyclique rotatif **P** faute de quoi les biellettes de pas **f** en se voyant confier ce rôle se briseraient immédiatement.

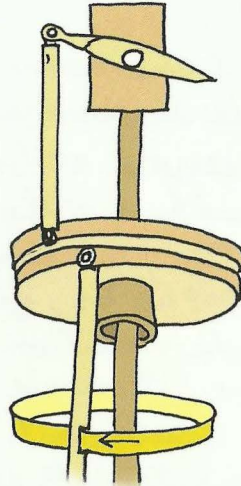
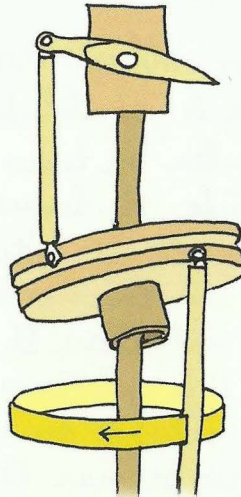
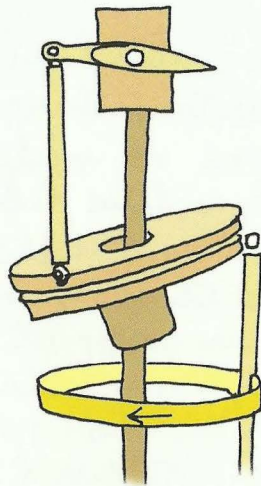
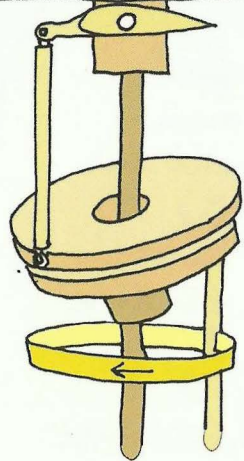


Il me faut maintenant concevoir des **COMMANDES DE VOL** me permettant d'actionner mes trois barres verticales

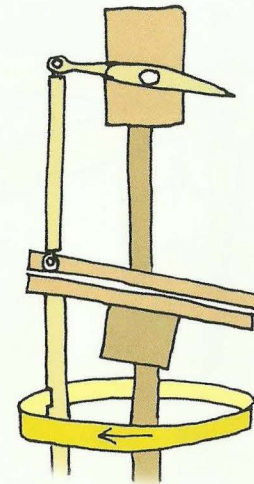
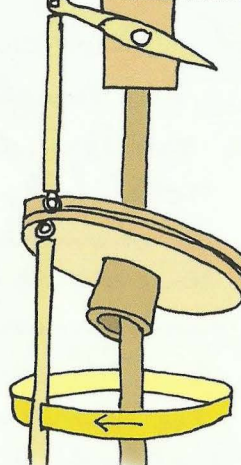


et le tour sera joué

incidence min



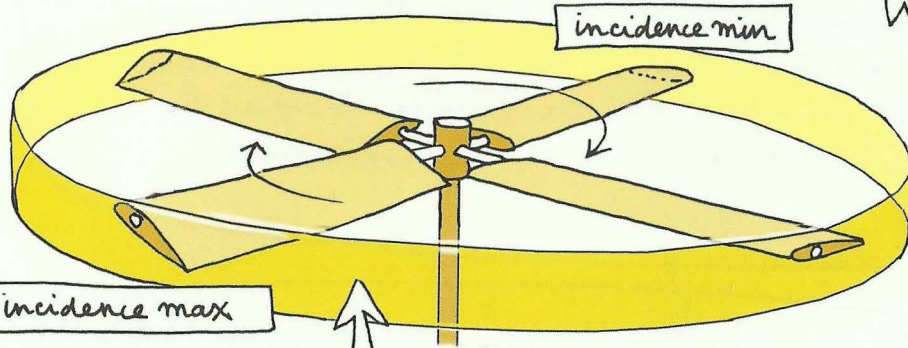
incidence max



etc...
en bas, le mouvement apparent d'une des tringles de commande

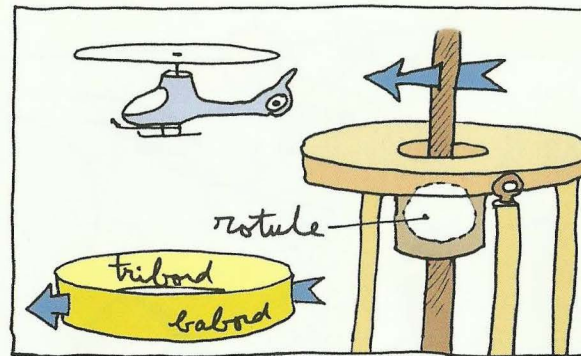


en haut on accompagne une pale dans son mouvement. Son incidence varie périodiquement entre une valeur minimale et une valeur maximale.



incidence max

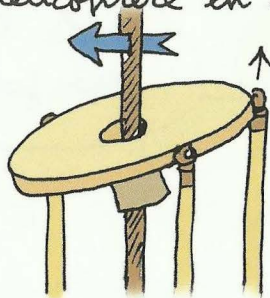
Ici, les pales occupent quatre positions différentes dans le plan de rotation



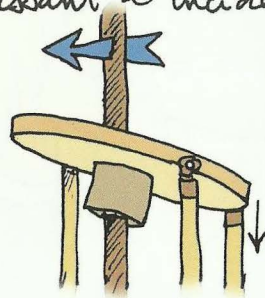
la flèche pointe vers l'avant de l'appareil

trois tringles suffisent à contrôler l'attitude du plateau non-rotatif

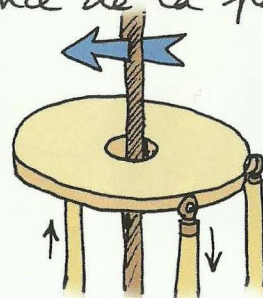
Piloter l'hélicoptère en accroissant l'incidence de la pale =



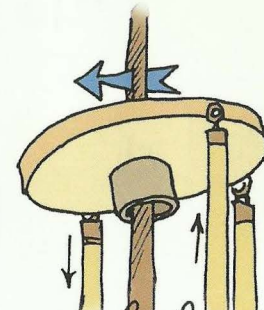
arrière



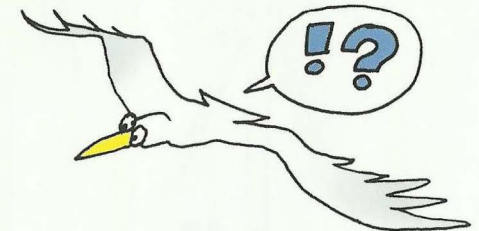
avant

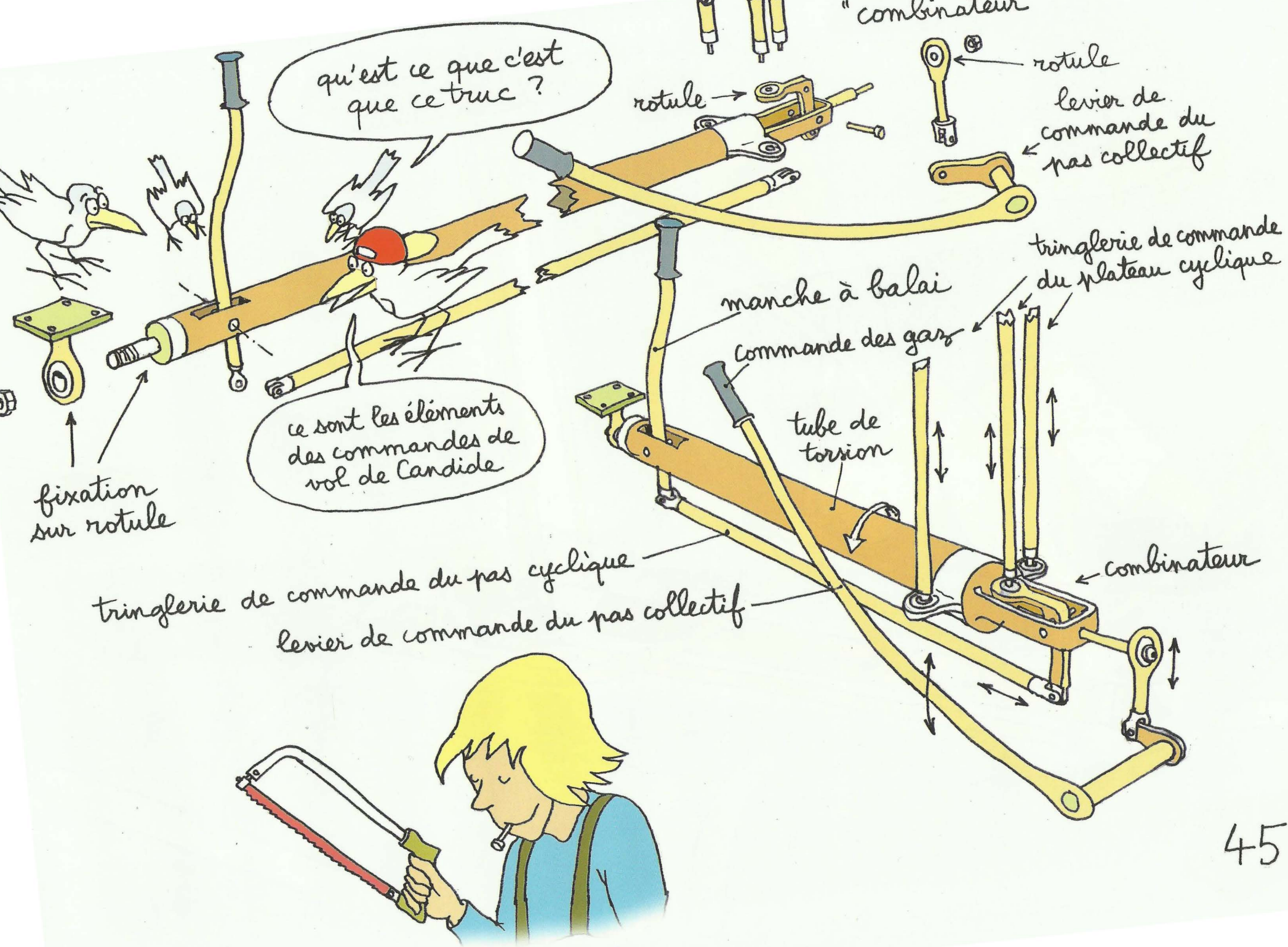


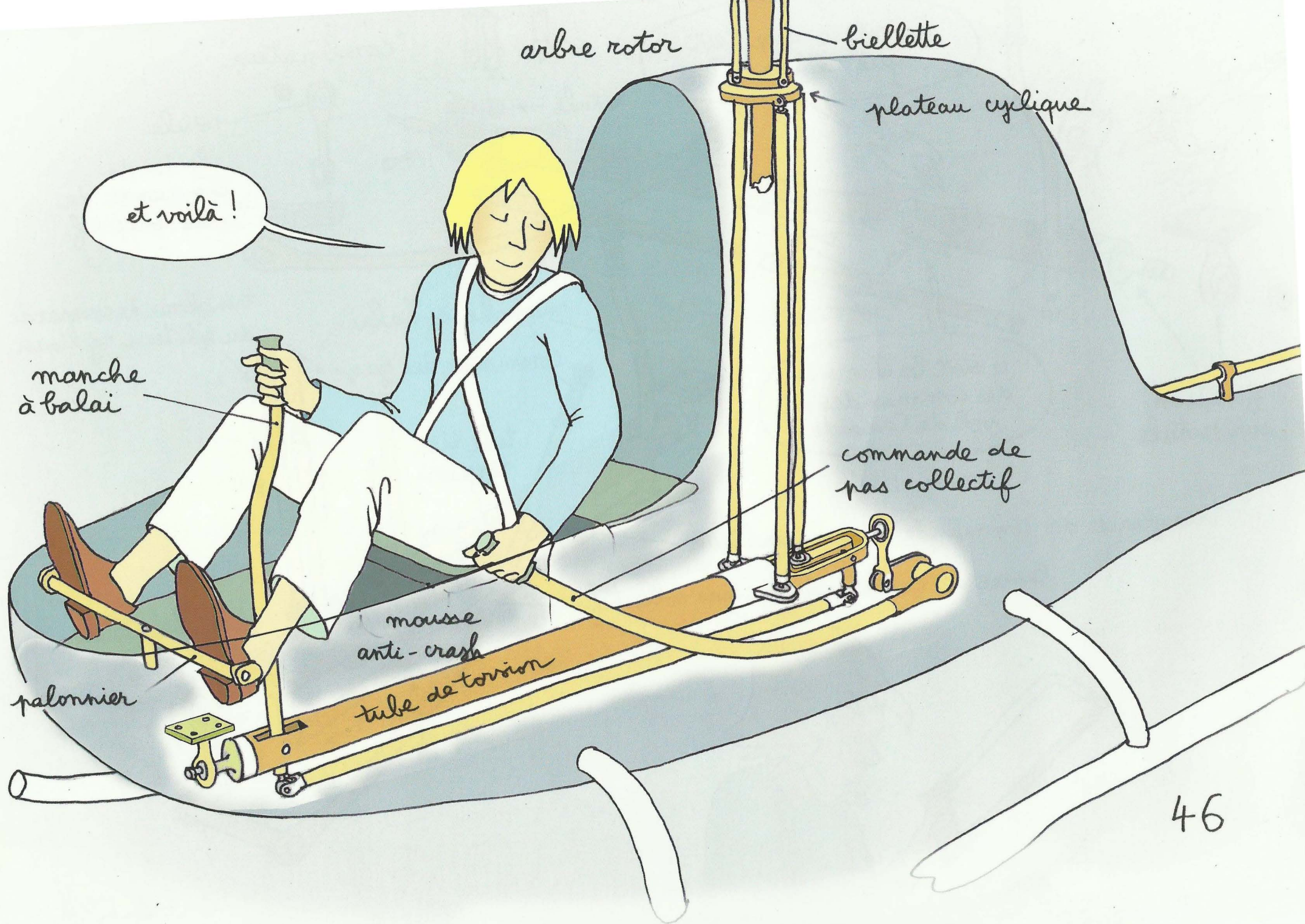
tribord



babord







cette fois, Pangloss, tout est prêt
Je vais de ce pas délivrer
mademoiselle Cunégonde

En avant !

**PATAKLONK
PATAKLONK**

maître, c'est terrible. Il y
avait tellement de vibrations
que j'ai craint que ma machine
ne se brise en mille morceaux

mais ça n'est
pas le pire ...

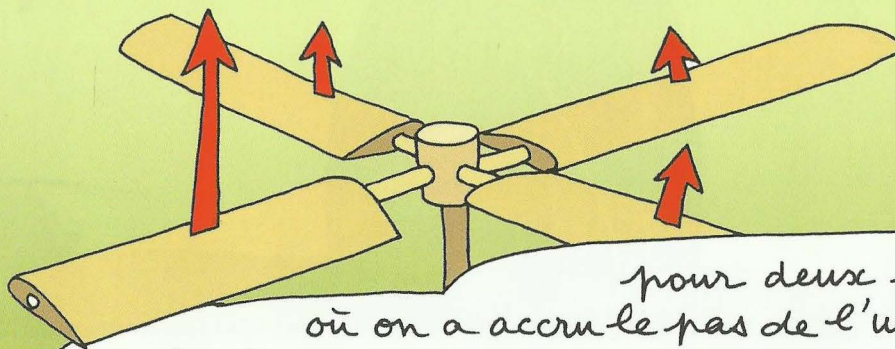
je croyais avoir mis en œuvre la meilleure
des mécaniques des fluides possibles

quoi donc
mon bon
Candide ?

figurez-vous, mon bon maître, que quand j'ai mis le manche en avant ...

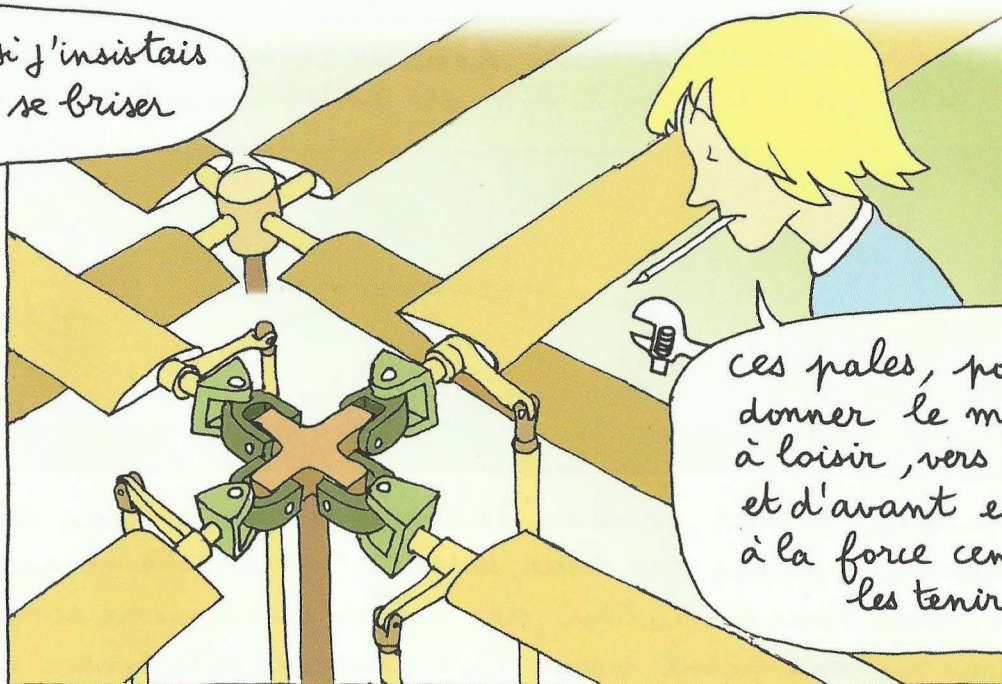


j'ai bien senti que la machine était secouée dès que j'ai mis en œuvre la variation cyclique du pas. C'était comme si une main invisible avait saisi le moyeu du rotor. Mais, à y regarder de plus près il me semble deviner la raison suffisante de ce phénomène



pour deux pales diamétralement opposées où on a accru le pas de l'une et diminué celui de l'autre les forces aérodynamiques diffèrent en intensité et en direction ce qui explique ces vibrations à tout casser

J'ai bien senti que si j'insistais
mon rotor pourrait se briser



ces pales, pourquoi ne pas leur
donner le moyen de s'ébattre tout
à loisir, vers le haut, vers le bas
et d'avant en arrière, en laissant
à la force centrifuge le soin de
les tenir avec fermeté



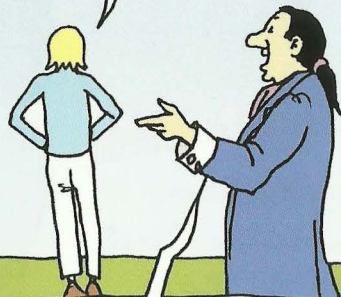
Ça marche, Pangloss, ça marche !
La machine s'ébroue toujours
mais pas de façon intolérable.
Par contre sa réponse au manche
reste toujours incompréhensible.
Manche en avant : elle embarque
sur sa droite. Manche à droite :
elle se cabre et part à reculons.
Manche à gauche, elle pique du
nez et se déplace vers l'avant.
Manche en arrière, elle
embarque sur sa gauche



ce qui veut dire que votre machine obéit à vos
ordres, mais en exerçant les effets à ... 90°

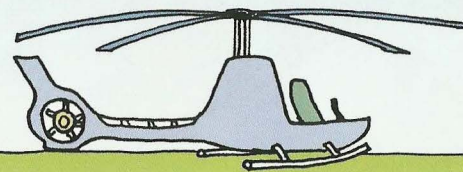


c'est incompréhensible mais
c'est tout à fait exact



Eh bien, la solution,
vous l'avez. Modifiez
vos commandes en
conséquence !

Je ne saurais m'asseoir dans une machine dont le comportement
échappe à ce point à mon entendement, mon bon maître



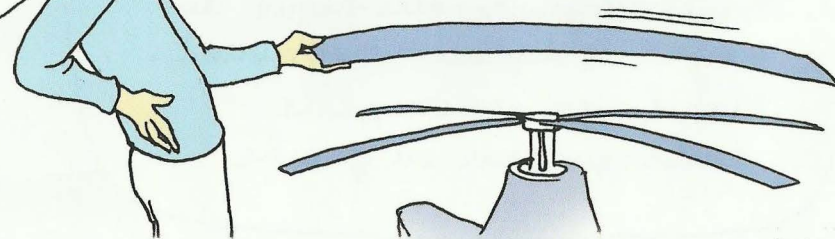
Candide, Candide, combien de choses ont pour nous des apparences
familières alors que leur essence nous reste étrangère - Voyez :
Le Soleil tourne autour de la Terre et nous ne savons pas pourquoi.
Nous n'avons point percé la nature de cette horreur du vide qui
fait monter le mercure dans les baromètres. La raison suffisante
de cette énergie noire qui provoque la réaccélération de notre
Cosmos nous reste étrangère. Devons-nous pour cela nous abstenir
d'observer et de mesurer tous ces phénomènes que la Nature nous offre ?



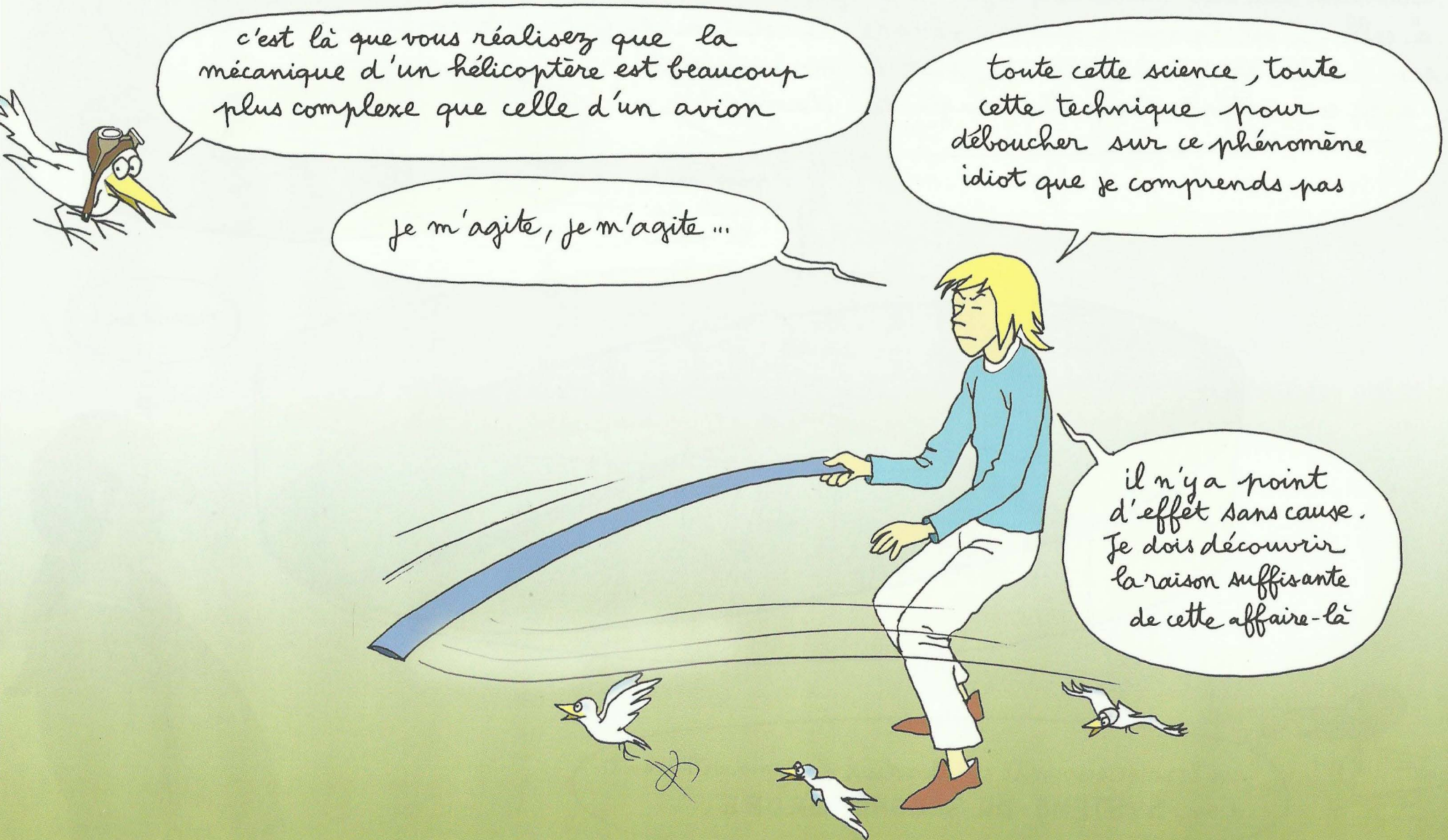
et l'amour, Candide, les tendres sentiments
que vous portez à mademoiselle Cunégonde ?



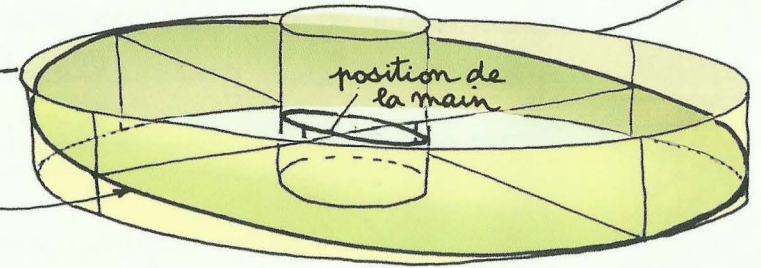
si cette mécanique du vol est la
meilleure des mécaniques du vol
possibles, que sont donc les autres...



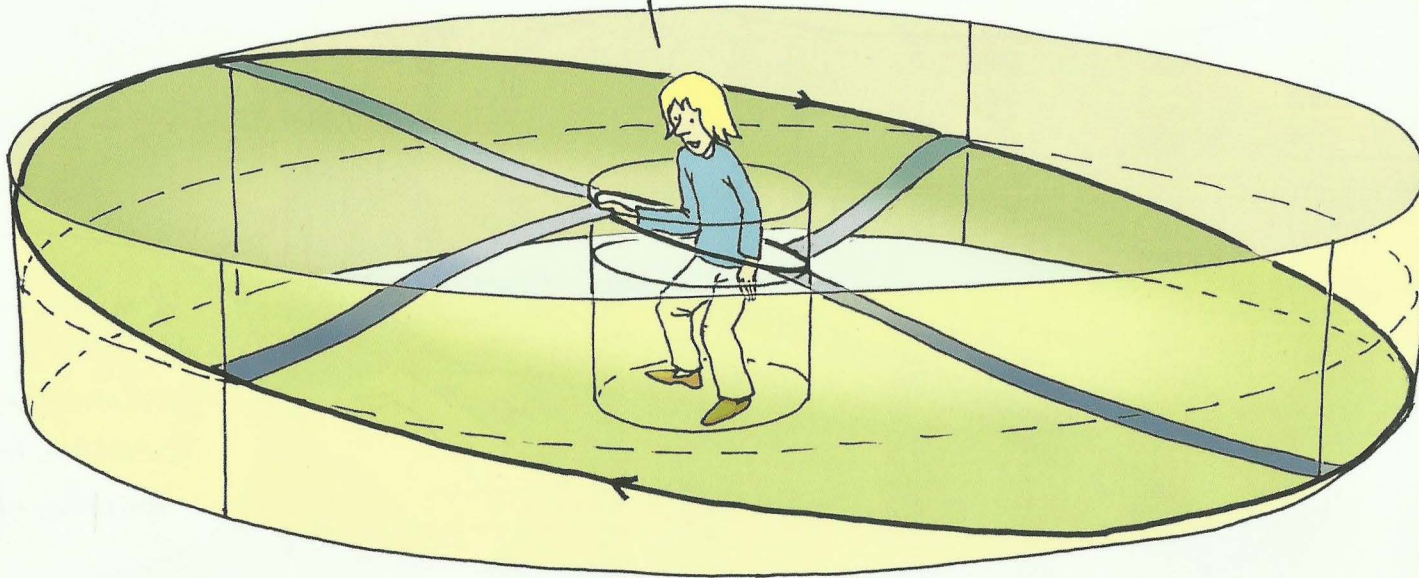
DÉCALAGE DU CYCLIQUE



Pangloss, je crois que j'ai compris. Quand j'agite cette pale de haut en bas, tout en tournant sur moi-même et que je m'arrange pour que la période d'oscillation que j'impose à celle-ci est la même que ma période de rotation, du fait de la combinaison de son inertie et de son élasticité, suit le mouvement avec un retard de quatre-vingts-dix degrés !



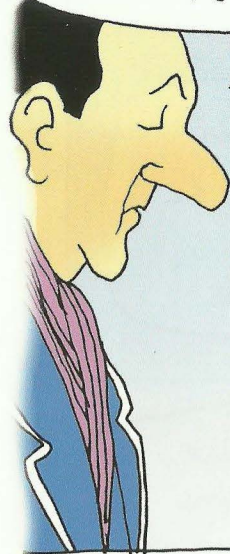
position du
bout de
la pale



mon Dieu !

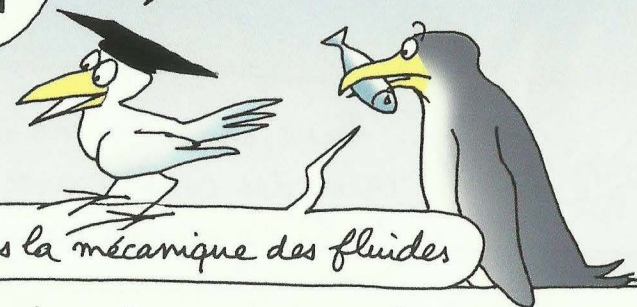
en termes savants ceci traduit le comportement
d'un **SYSTÈME DU SECOND ORDRE**

cette raison suffisante me semble se situer, j'avoue, au delà de mon entendement



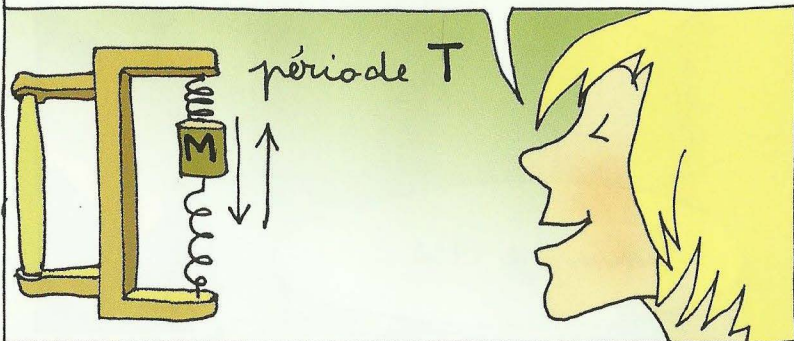
Vous allez comprendre, mon maître, grâce à cet appareil qu'on appelle un **ELASTOTRON**

ne cherchez pas l'usage pratique de cet appareil dont la seule fonction est d'expliquer le comportement singulier des pales des hélicoptères

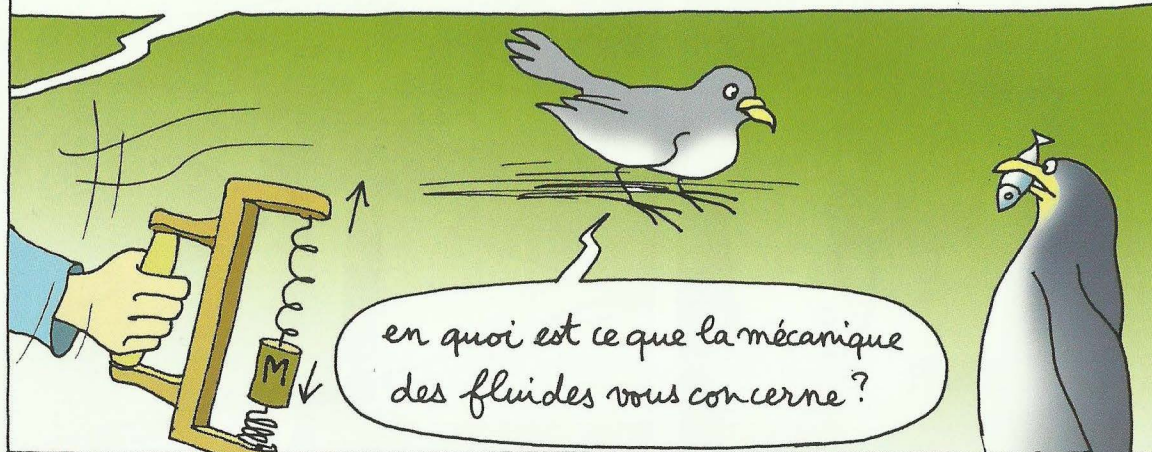


Je croyais qu'on était dans la mécanique des fluides

J'explique : si j'écarte la masse **M** de sa position d'équilibre, elle va osciller avec une certaine période qu'on appelle la **PÉRIODE PROPRE DU SYSTÈME**

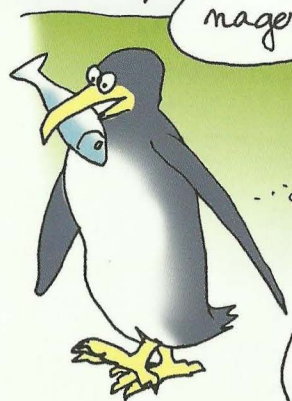


si je sollicite l'appareil en le secouant de haut en bas avec la même période **T** la masselotte **M** va "répondre" **À CONTRE-TEMPS**



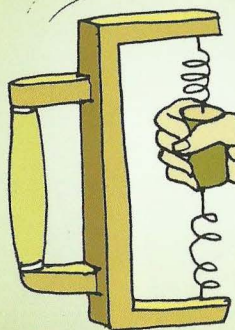
Je suis sûr que vous devez nager comme un pied !

nager?



laisse, chéri. On ne va pas se créer des conflits avec ce pingouin le livre est déjà assez compliqué !

le bâti répond alors, lui aussi à **CONTRE-TEMPS**

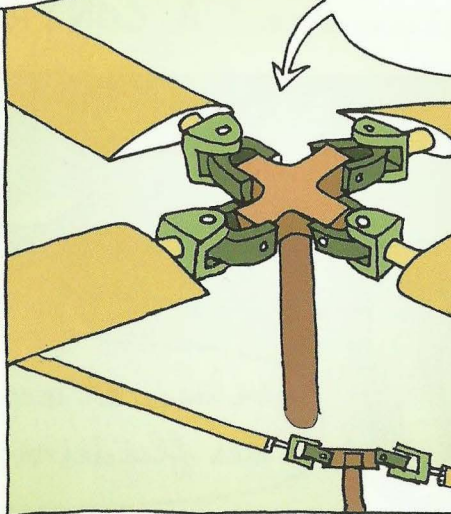


prenez l'Elastotron par sa masselotte et secouez-le selon sa période propre T

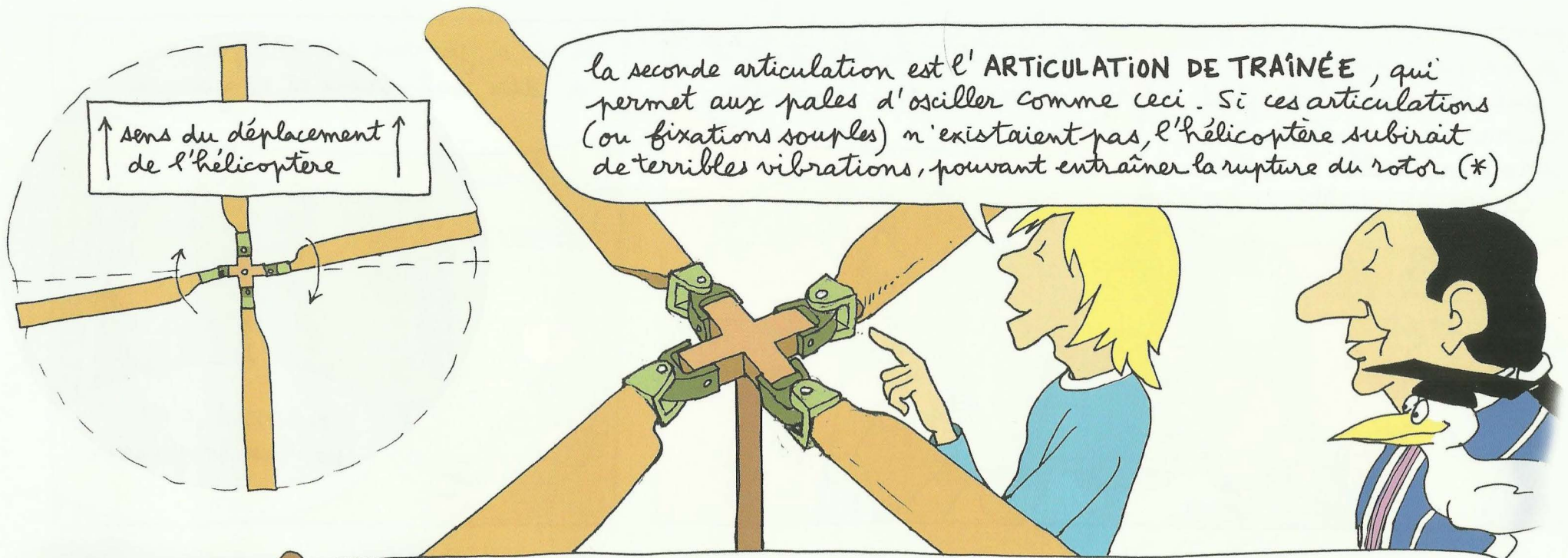


Bon, je le saisis comme cela et je le secoue selon sa ... période propre

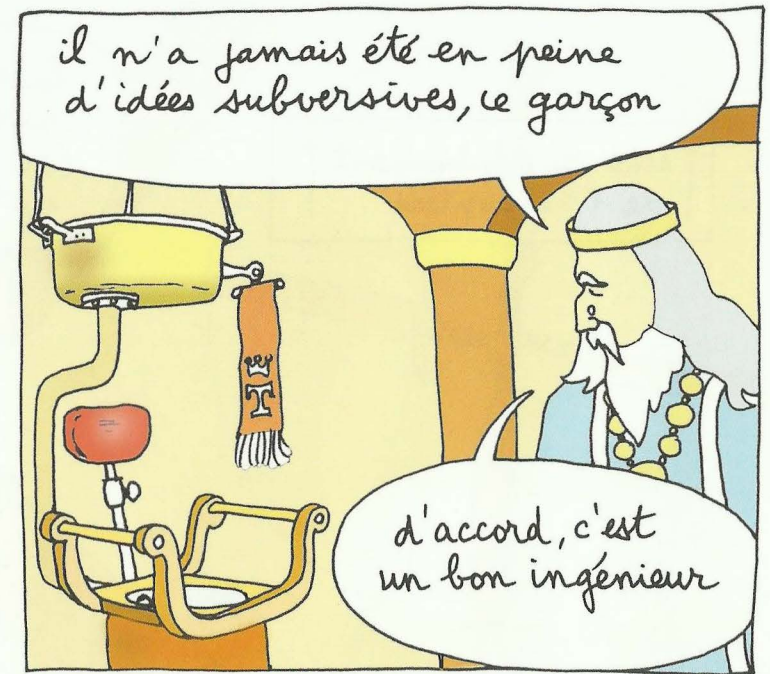
transposez à l'hélicoptère. Tout à l'heure je secouais les pales **EN PHASE** avec mon mouvement de rotation sur moi-même. En vol ce sont les pales qui "secouent" la machine. D'où cette nécessité de disposer sur chacune une **ARTICULATION DE BATTEMENT**



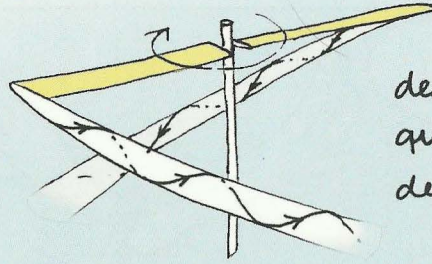
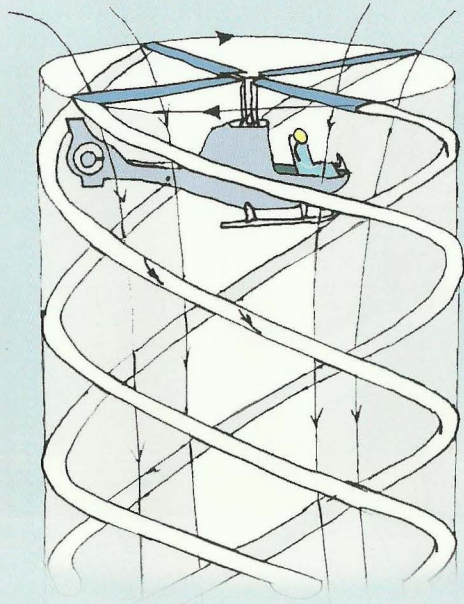
hmm, je vois...



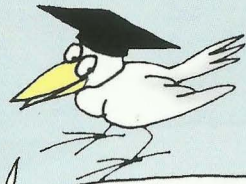
(*) dès ses premiers essais d'AUTOGIRE, l'espagnol DE LA CIERVA dut au plus vite introduire ce système "pales articulées plus amortisseurs" sous peine de voir son rotor se briser net



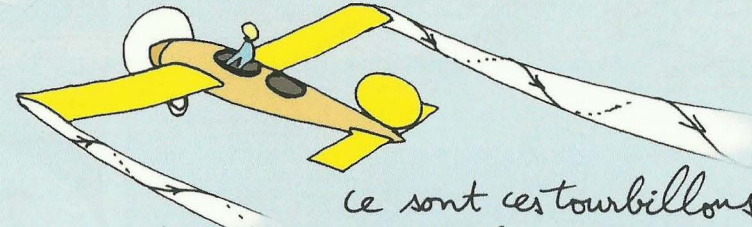
TRANSITION



les pales de l'hélicoptère sont des ailes de très grand allongement qui laissent dans leur sillage des **TOURBILLONS MARGINAUX**



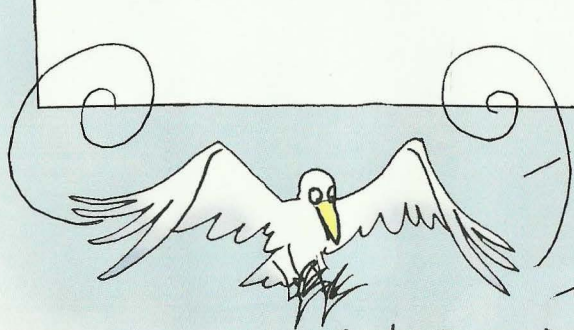
cette turbulence inutile représente une perte d'énergie



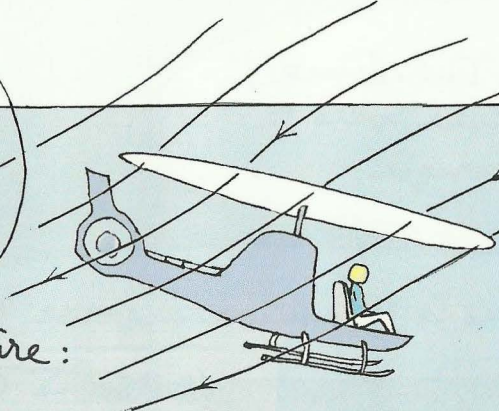
Ce sont ces tourbillons qui se créent en bout d'aile qui provoquent en haute altitude des condensations de vapeur d'eau (traînées de condensation)

Lorsque l'hélicoptère entre en translation l'allure de l'écoulement en vient à se trouver totalement modifiée. Les tourbillons perdent de leur importance et, de ce fait la machine peut se sustenter au prix d'une moindre dépense d'énergie.

La Direction



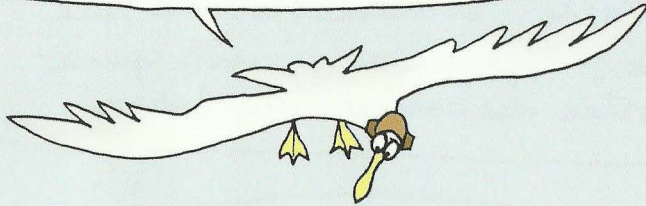
oiseau en vol stationnaire :
forte turbulence



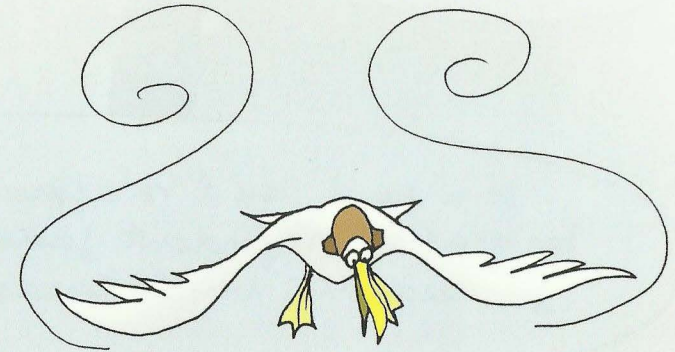
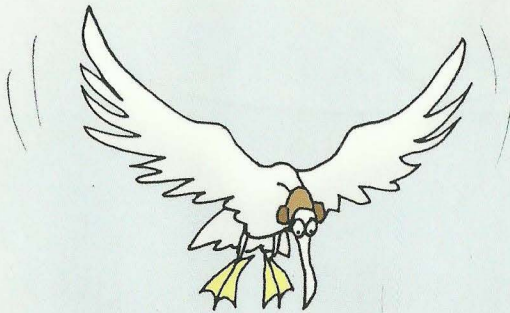
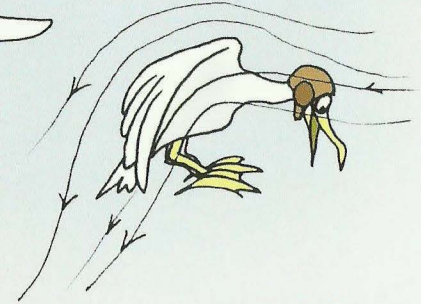
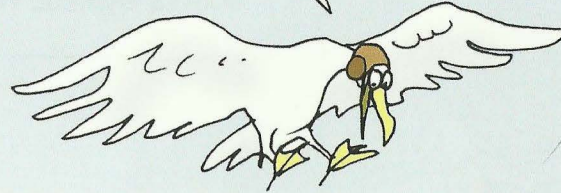
oiseau en translation



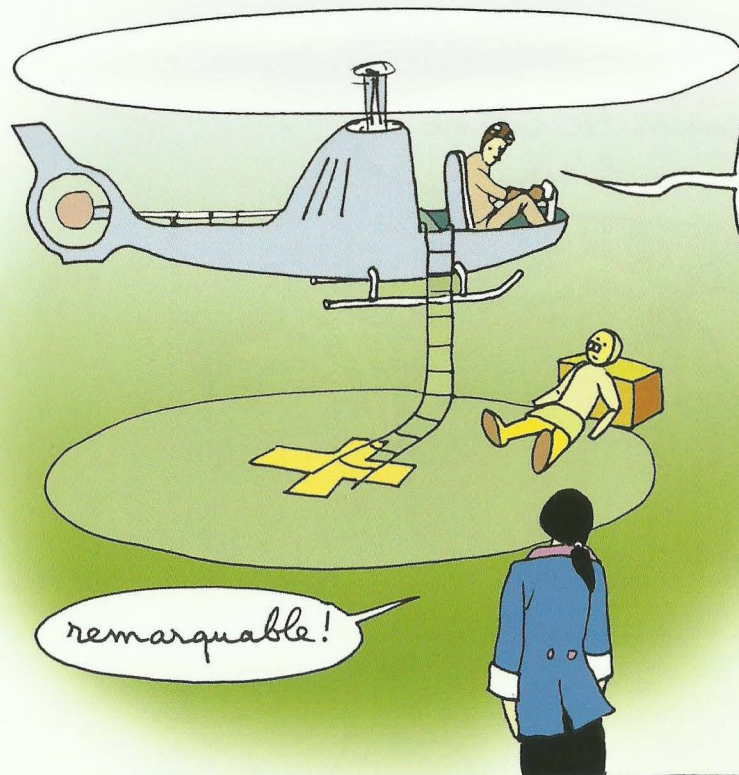
c'est pas dur. Tu vois un truc
intéressant en bas, un poisson ...



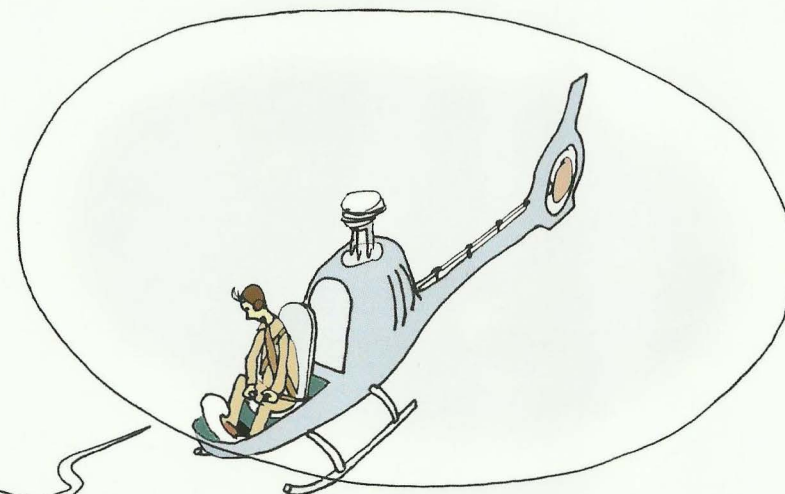
tu cabres pour casser ta vitesse
et t'immobiliser en l'air



et là tu reviens en régime de vol stationnaire, en créant une
forte turbulence, donc en consommant plus d'énergie

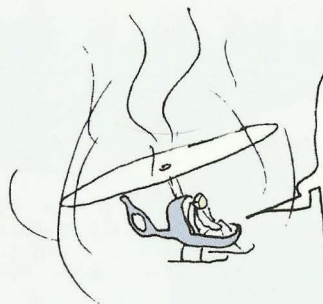


Pangloss, maintenant je suis fin prêt. Cette machine est extraordinairement stable et maniable. Dès que Cunégonde sera montée, je dégagerai au plus vite pour nous mettre hors de portée des archers du baron



Je n'aurai qu'à m'approcher, assez haut. Les gens ne regardent jamais en l'air. Puis je descendrai vers la terrasse à vive allure





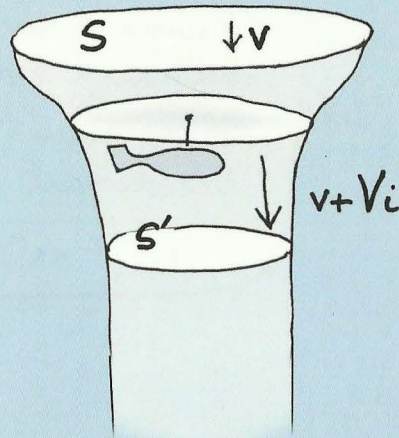
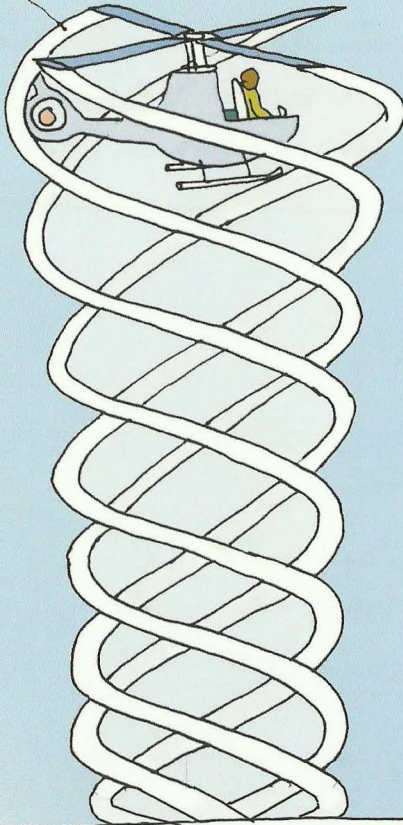
J'ai l'impression que mon hélicoptère s'appuie sur une sorte de masse informe, complètement instable. Il me faut sortir de là au plus vite. Décidément, la descente verticale rapide, ça n'est pas bon du tout!



VITESSE INDUITE

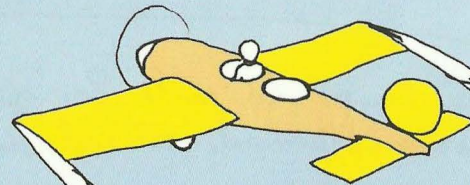
tourbillons de
bouts de
pales

6m/s



$$\rho v S = \rho (v + V_i) S' (*)$$

le fait qu'un hélicoptère se sustente en "brassant de l'air vers le bas" implique de lui communiquer une **VITESSE INDUITE** V_i qui est de l'ordre de 6 mètres par seconde. En émettant de la fumée en bout de pales on verrait se matérialiser ce phénomène

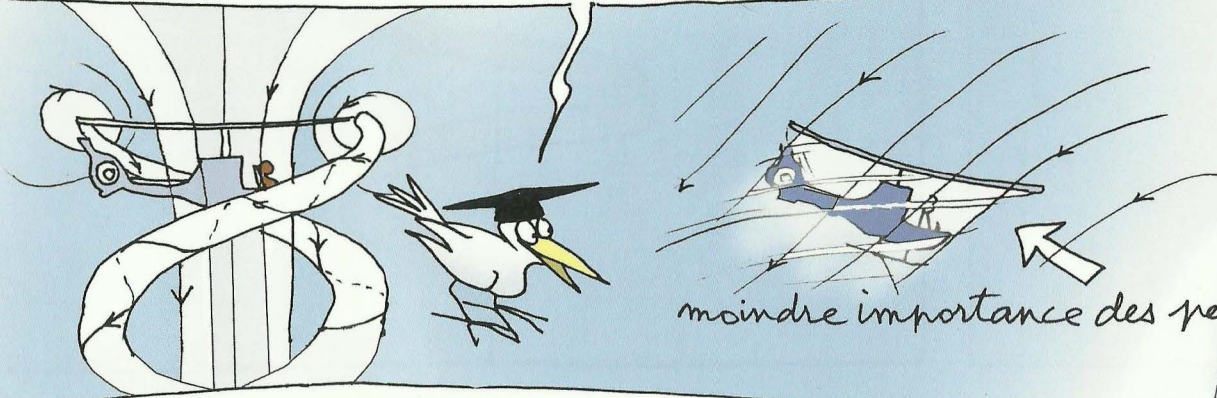


un avion vole aussi "en chassant de l'air vers le bas" bien que cet effet de vitesse induite soit moins apparent

tourbillon
marginal

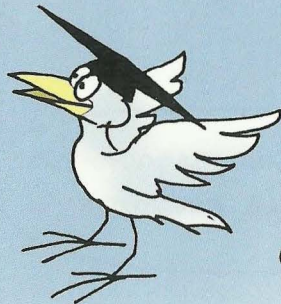
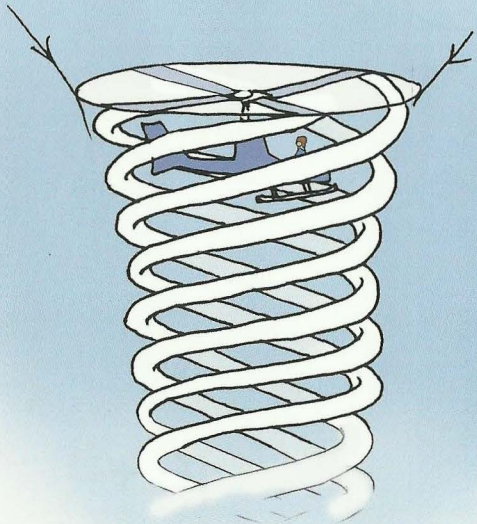
(*) cette relation exprime la conservation du flux d'air à masse volumique ρ constante. Ceci implique que la section S' soit plus petite que la section S

tout ce qui est **TOURBILLONNAIRE** représente une perte d'énergie. le vol en translation contrarie l'établissement du régime tourbillonnaire. Cette façon de se maintenir à altitude constante est donc moins consommatrice en énergie



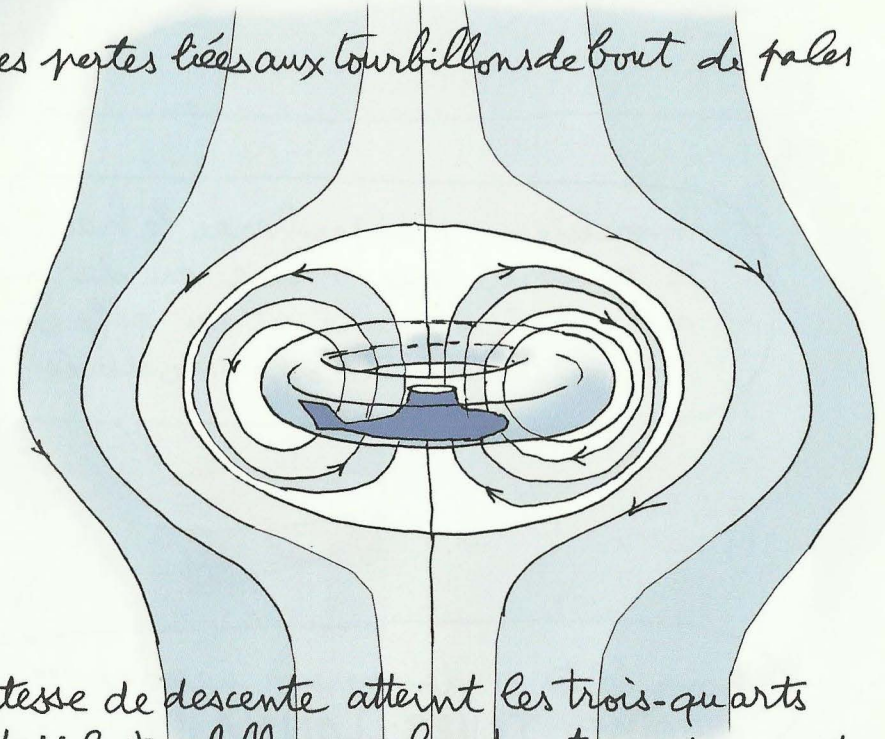
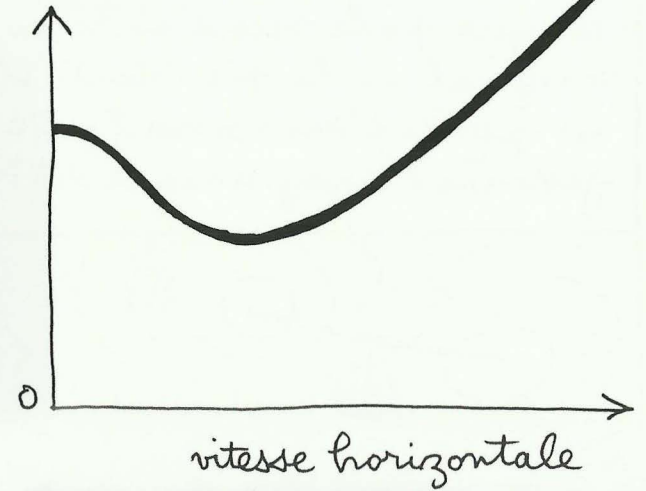
moins importance des pertes liées aux tourbillons de bout de pales

lorsque l'hélicoptère amorce une descente verticale les tourbillons marginaux interagissent quand la vitesse verticale atteint $\frac{1}{4}V_i$

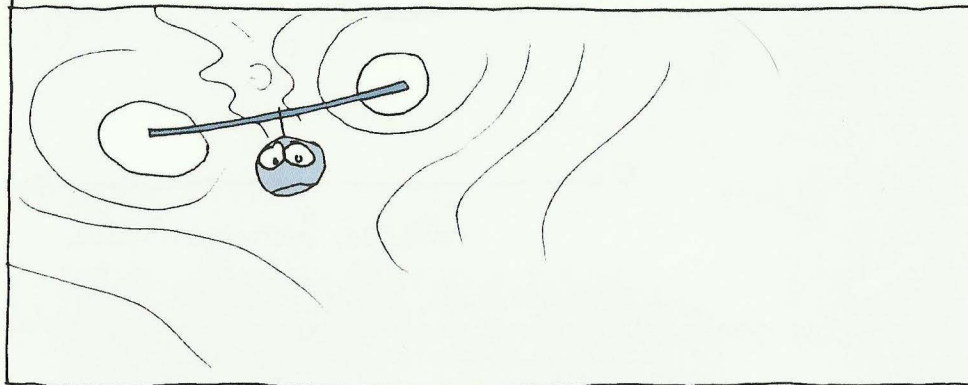


quand la vitesse de descente atteint les trois-quarts de la vitesse induite V_i les tourbillons se fondent en donnant naissance à un gros **VORTEX** de forme torique

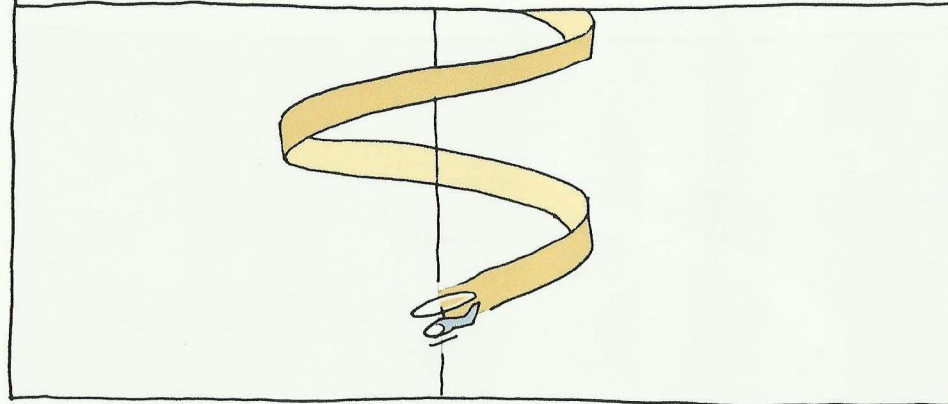
Puissance nécessaire au vol



chaque pale prend en relai le tourbillon marginal de la précédente et l'amplifie. les pertes s'accroissent. De plus cette géométrie aérodynamique est très instable



aussi, pour plonger vers un site d'atterrissage, les pilotes préféreront adopter une approche en spirale en conservant un régime de translation



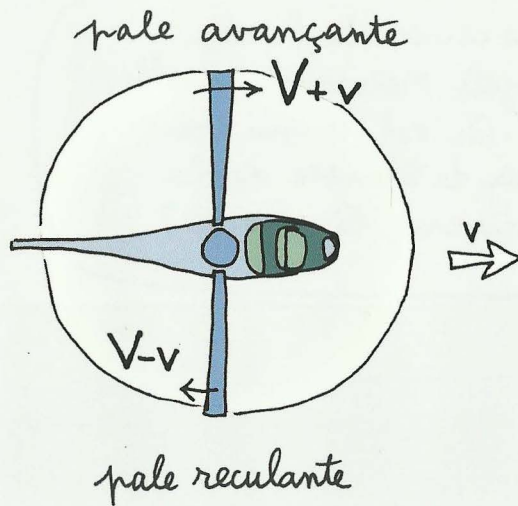
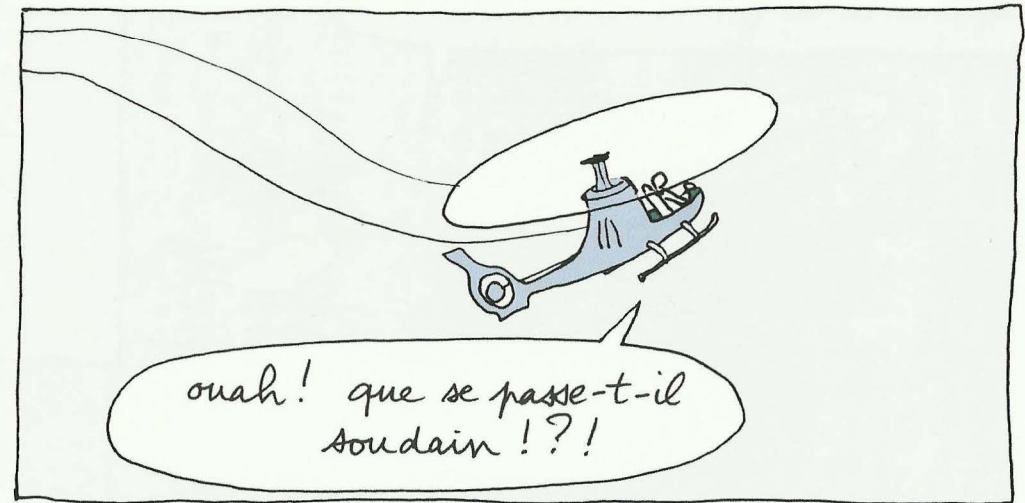
moralité = j'approcherai le haut de la tour en vol horizontal. Je casserai ma vitesse au dernier moment, en passant en vol stationnaire et en effectuant une dernière descente à vitesse verticale modérée, disons à un mètre par seconde



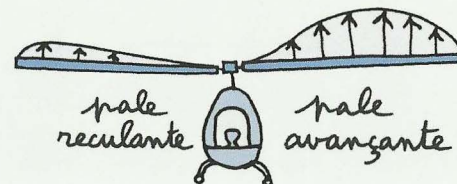
pour éviter ce dangereux passage en
RÉGIME TOURBILLONNAIRE

maintenant, reprenons
nos essais en vol

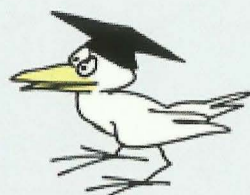
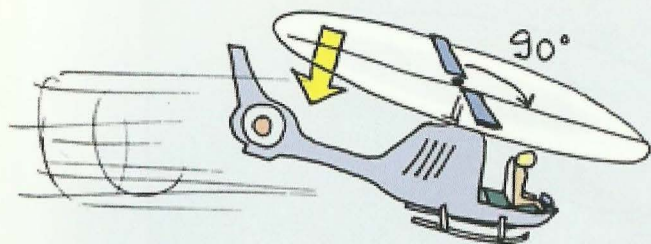
DÉCROCHAGE SUR PALE RECVLANTE



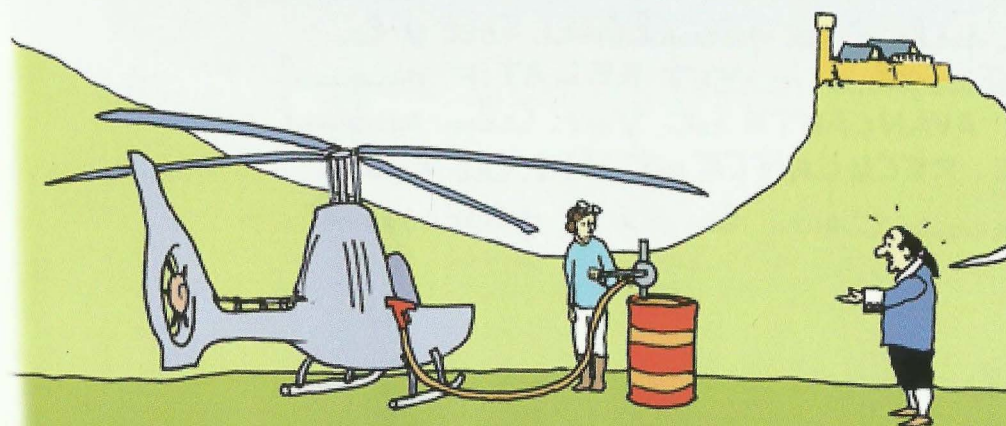
soit V la vitesse de la pale à sa périphérie. Soit v la vitesse de vol de l'hélicoptère. le VENT RELATIF auquel est soumise la PALE AVANÇANTE est $V+v$. celui auquel est soumise la PALE RECVLANTE est $V-v$. Les forces de pression qui s'exercent sur les deux pales sont donc différentes



on serait tenté de penser qu'à grande vitesse l'hélicoptère devrait avoir tendance à basculer sur le côté. Mais, du fait du retard de 90° de la "réponse" de l'engin ceci tend à le faire se cabrer



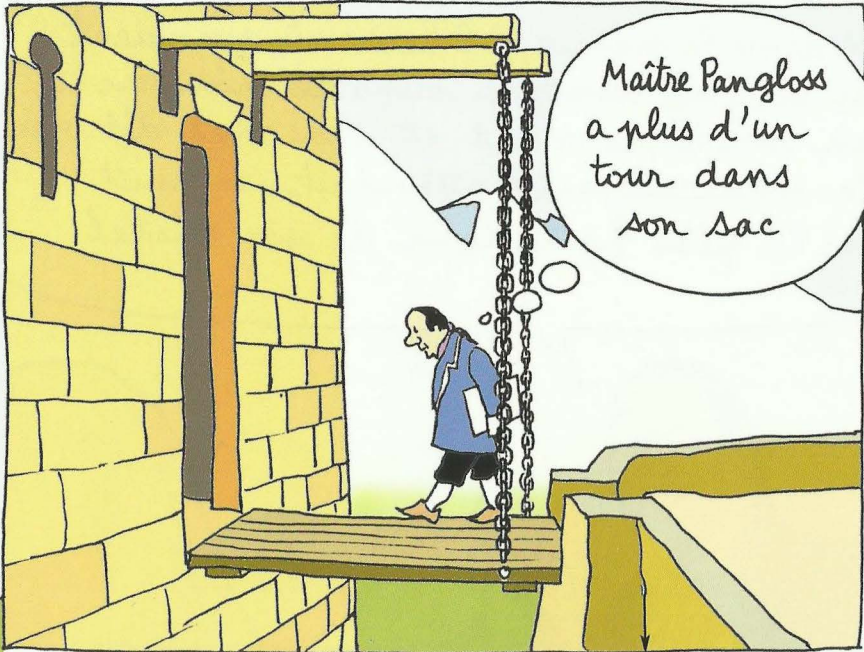
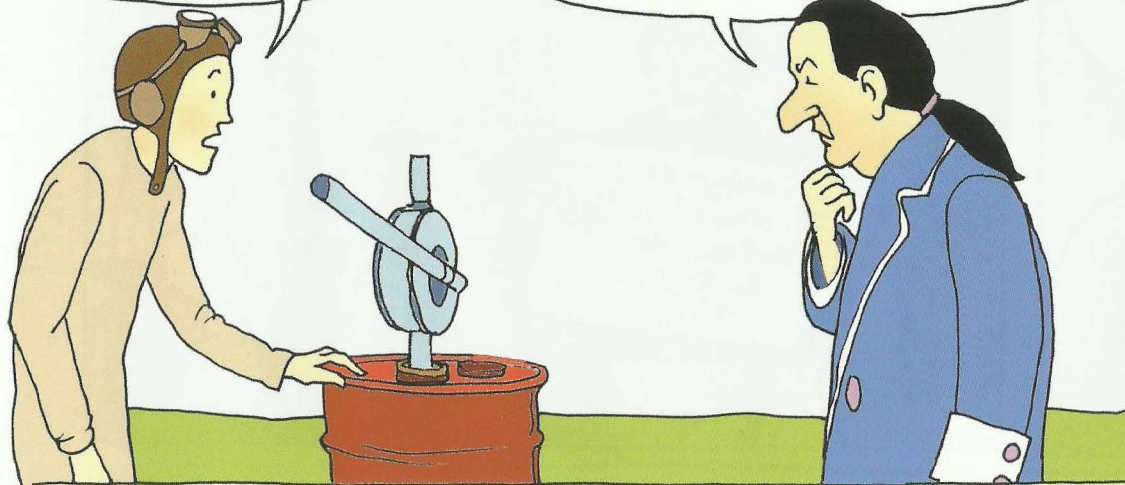
les sens de rotation des rotors différent selon les pays -
Ainsi, pour les hélicoptères français la pale avançante est à gauche alors qu'elle est à droite sur les machines américaines. Mais cela ne change rien à tout ce qui a été dit ici - la Direction



Candide, je pense à une chose. Le baron ignore tout de vos projets. Mais mademoiselle Cunégonde également. Qui est-ce qui vous assure qu'elle sera sur la terrasse de la tour quand vous arriverez là-haut ?

vous avez raison,
Maître Pangloss
Mais, que faire?

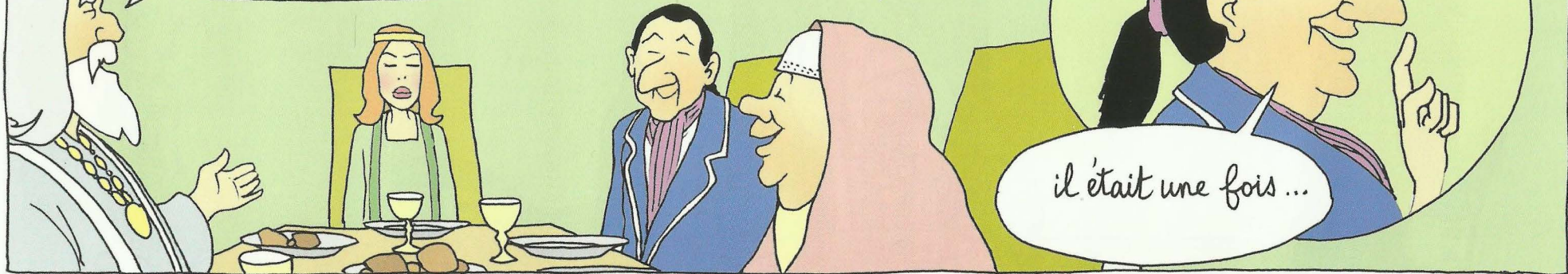
je dois dîner au château
ce soir. Je trouverai bien
un moyen de la prévenir



Maître Pangloss
a plus d'un
tour dans
son sac

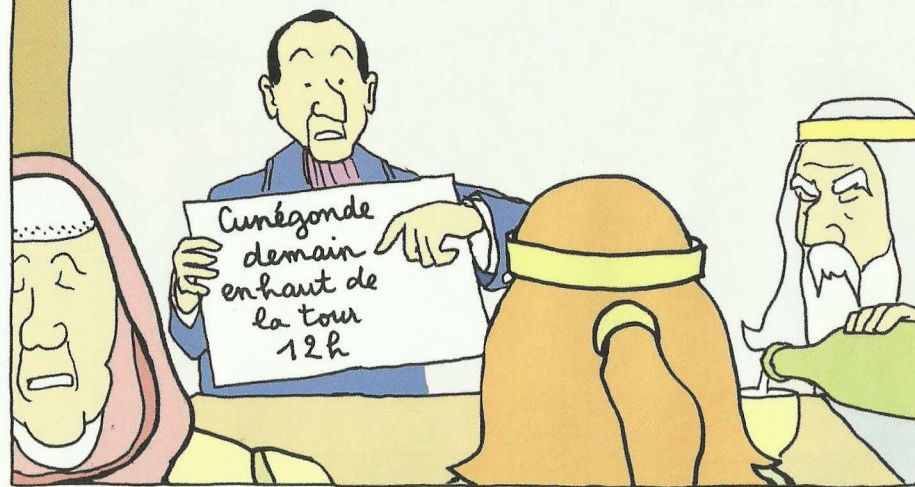
Ah, Maître Pangloss, que ne nous contez-
vous pas une belle histoire, pleine de
philosophie, dont notre écervelée de fille
puisse faire le plus sage des profits

oh oui, maître, ici nous prisons
fort vos contes philosophiques

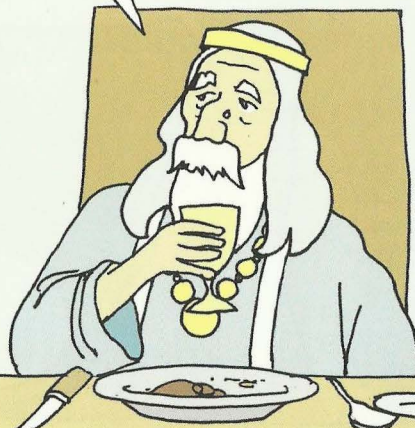
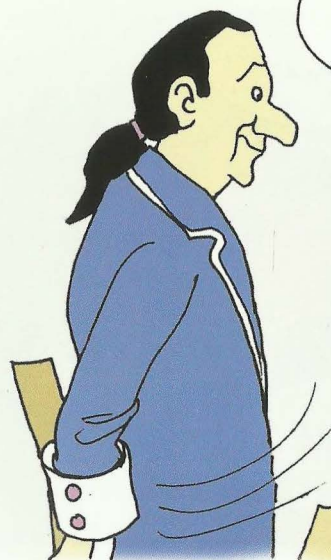


il était une fois ...

...et alors le prince, à l'heure où sonnaient
au beffroy les douze coups de midi, monta
sur son tapis volant et s'en vint délivrer
la princesse, qui l'attendait en haut
de la plus haute tour de son castel

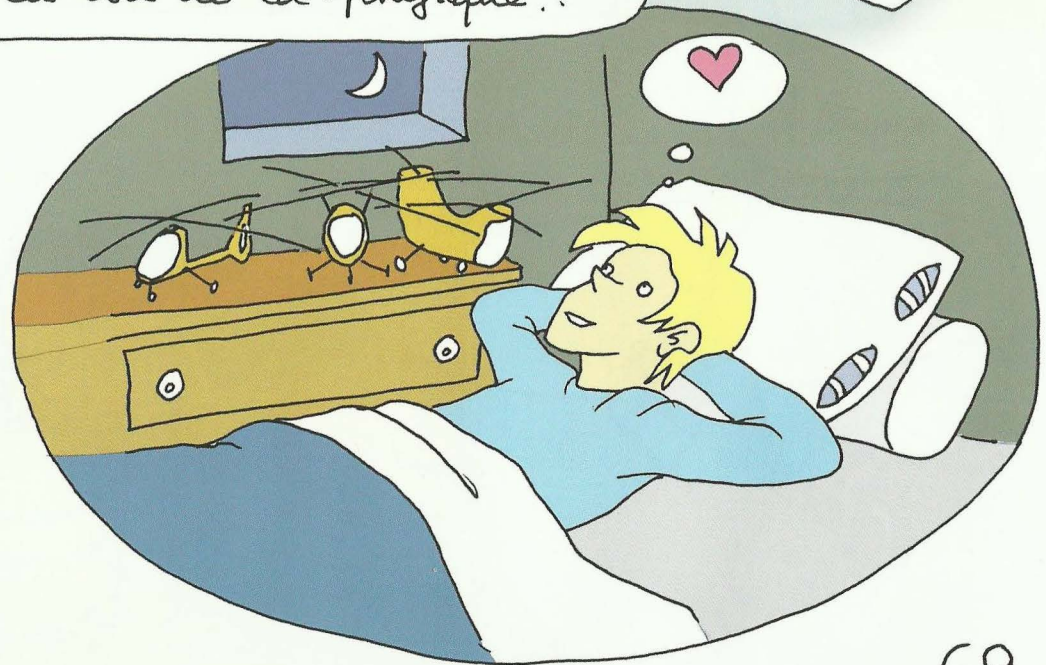
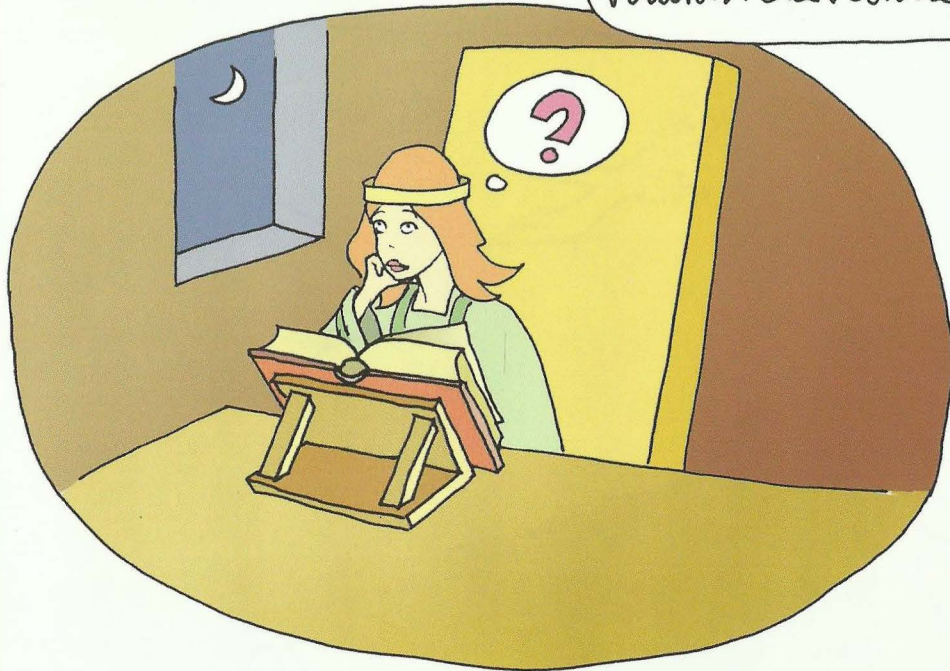
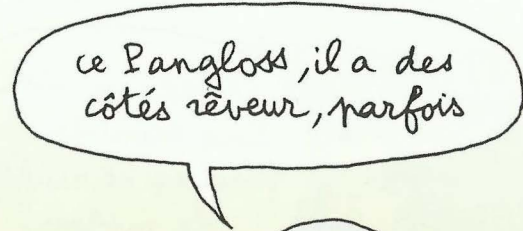


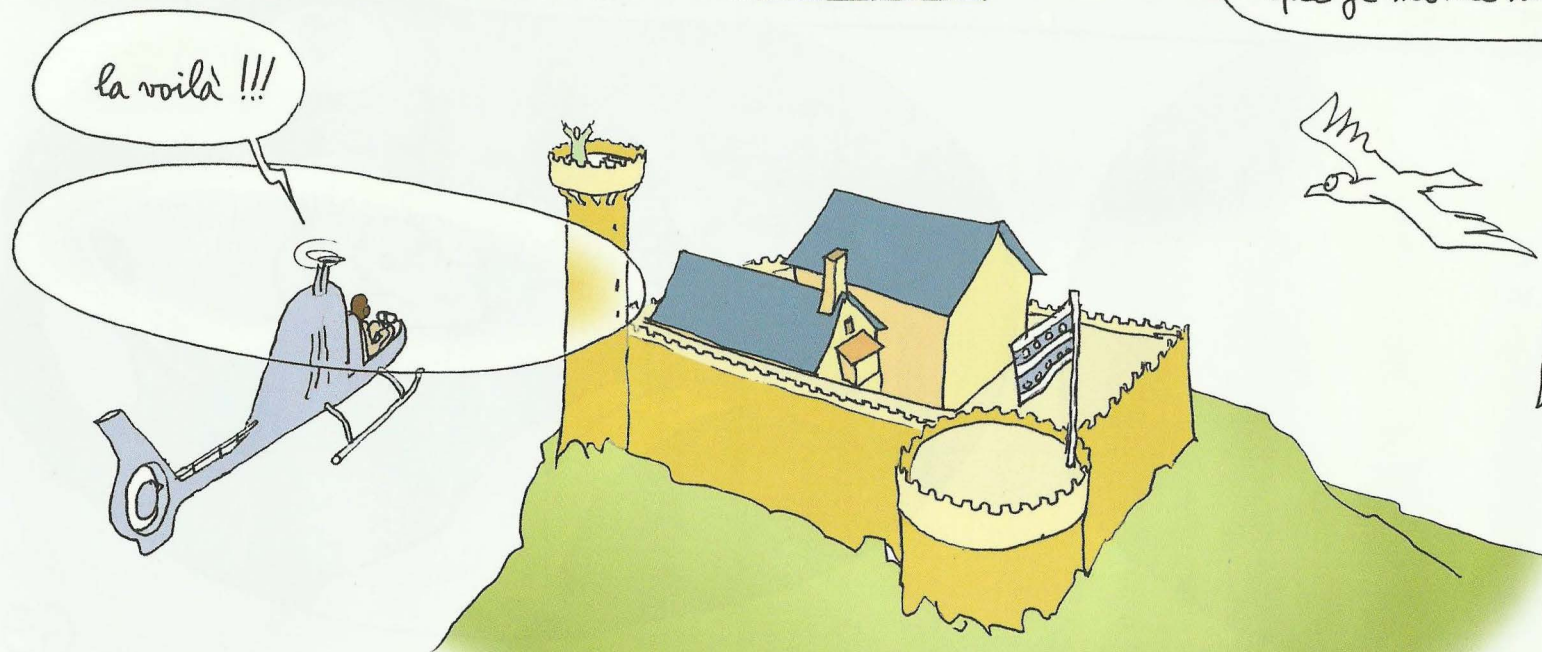
c'était une belle histoire, Pangloss, bien que je n'aie pas saisi...
hum... toutes les implications philosophiques

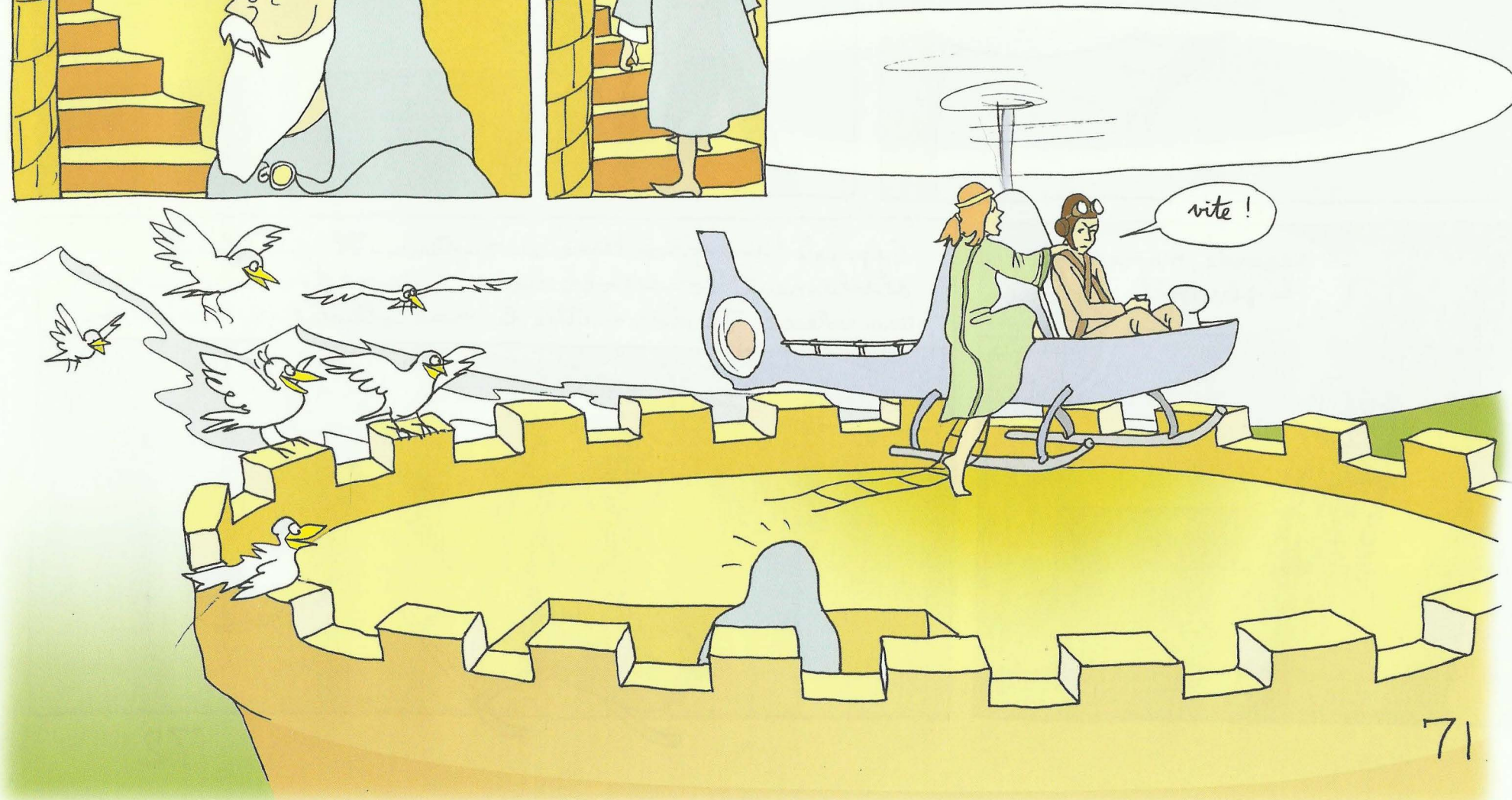
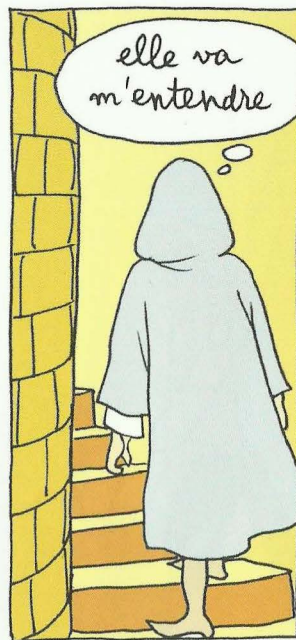


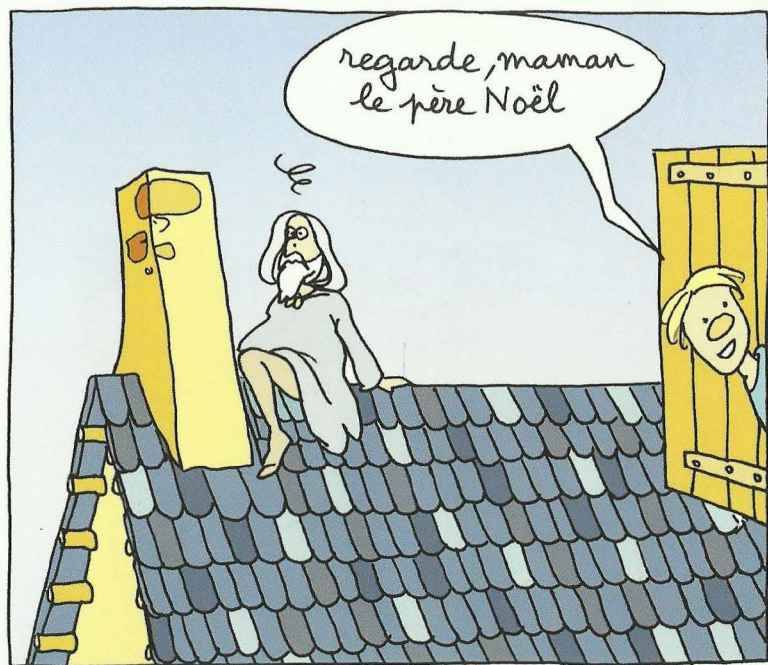
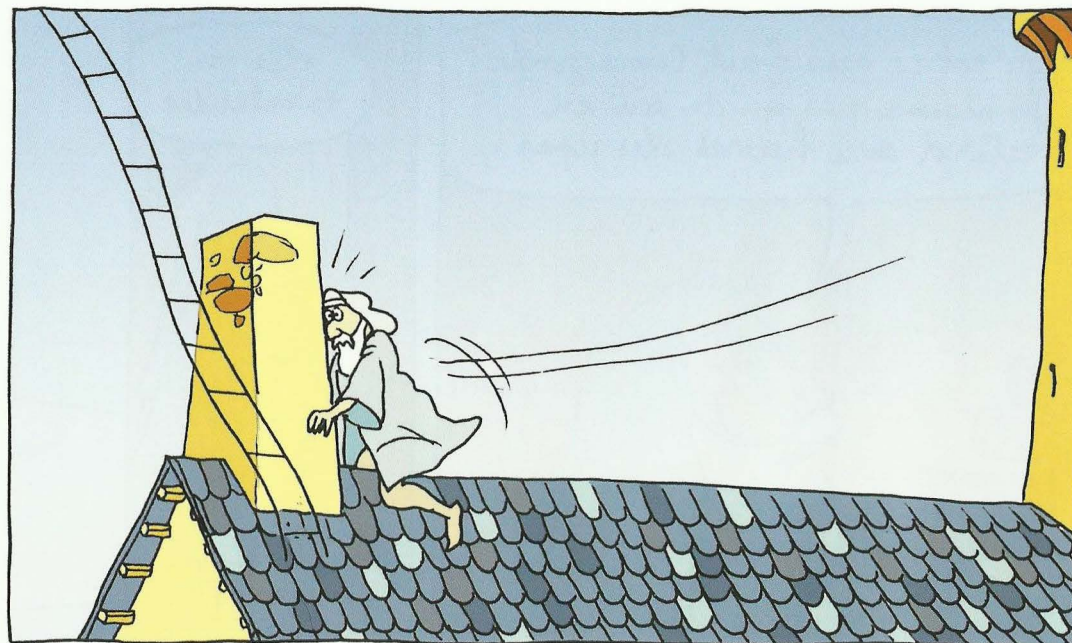


des princes qui viennent avec des tapis volants! C'est contre les lois de la physique!!











ça y est, l'air est maintenant en flux inversé. Il passe de bas en haut. Nous sommes passés en régime d'**AUTOROTATION**. Mon hélicoptère s'est transformé en autogire. La portion motrice, autorotative de mon rotor entraîne le reste



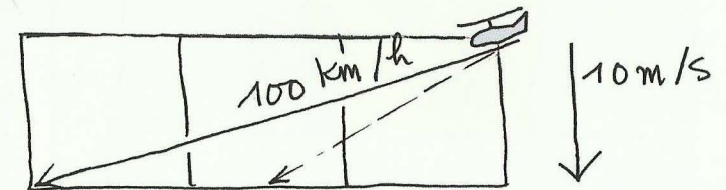
alors, un hélicoptère, ça peut ... planer ?

faut croire

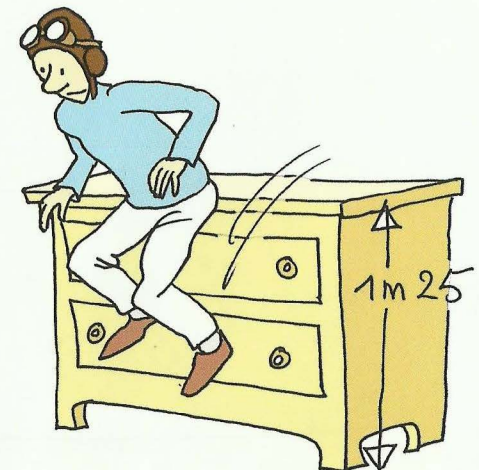
on descend quand même sacrément vite : 10 m/s
c'est pas comme un caillou, mais c'est pas loin

En régime d'autorotation un hélicoptère a une vitesse de 100 km/h, ce qui correspond à une **FINESSE** de 3. En autorotation verticale la vitesse de chute serait de 20 m/s. et l'impact à cette vitesse tuerait les passagers. Pour fixer les idées, un homme peut encaisser un impact à 5 m/s ce qui équivaut à sauter d'un buffet (*). Un impact à 10 m/s correspond à un saut d'une hauteur de 5 mètres.

la Direction



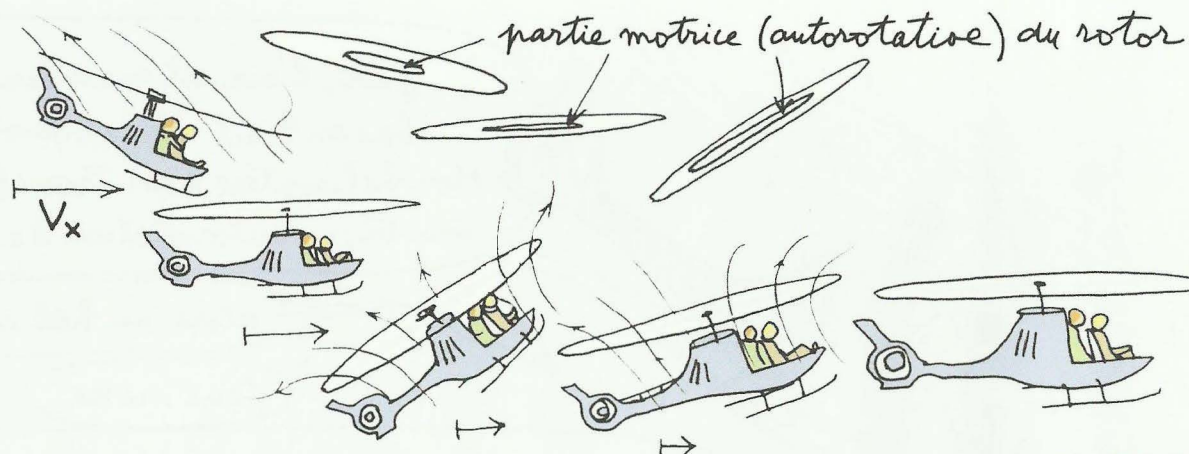
impact à 5 m/s



$$(*) V_{(m/s)} = \sqrt{2gz} = \sqrt{20z} \text{ (mètres)}$$

LE FLARE

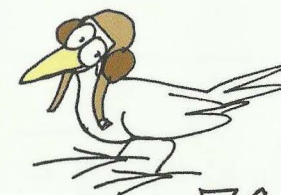
il va falloir que j'improvise
une manœuvre de dernier moment



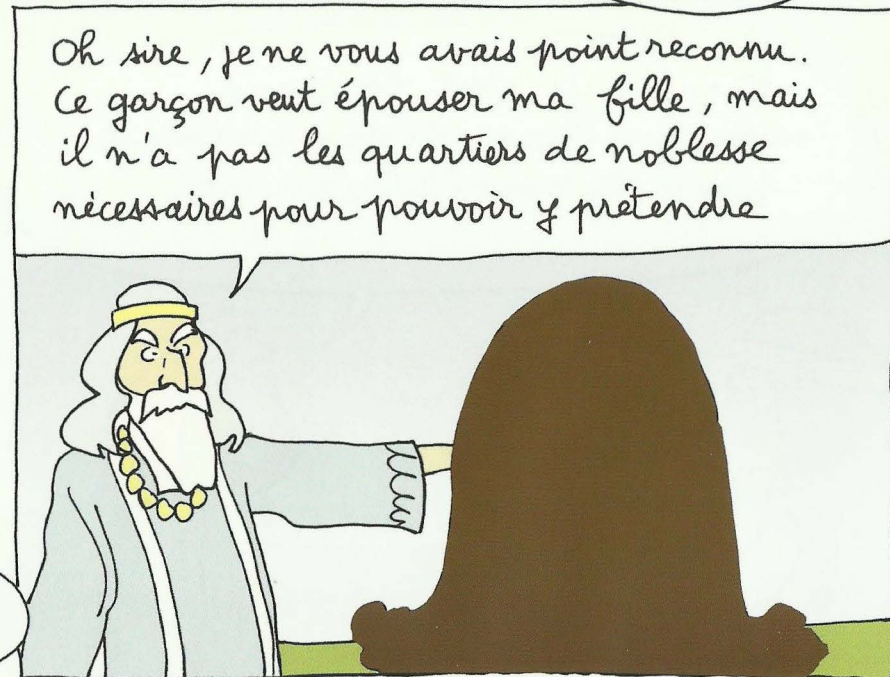
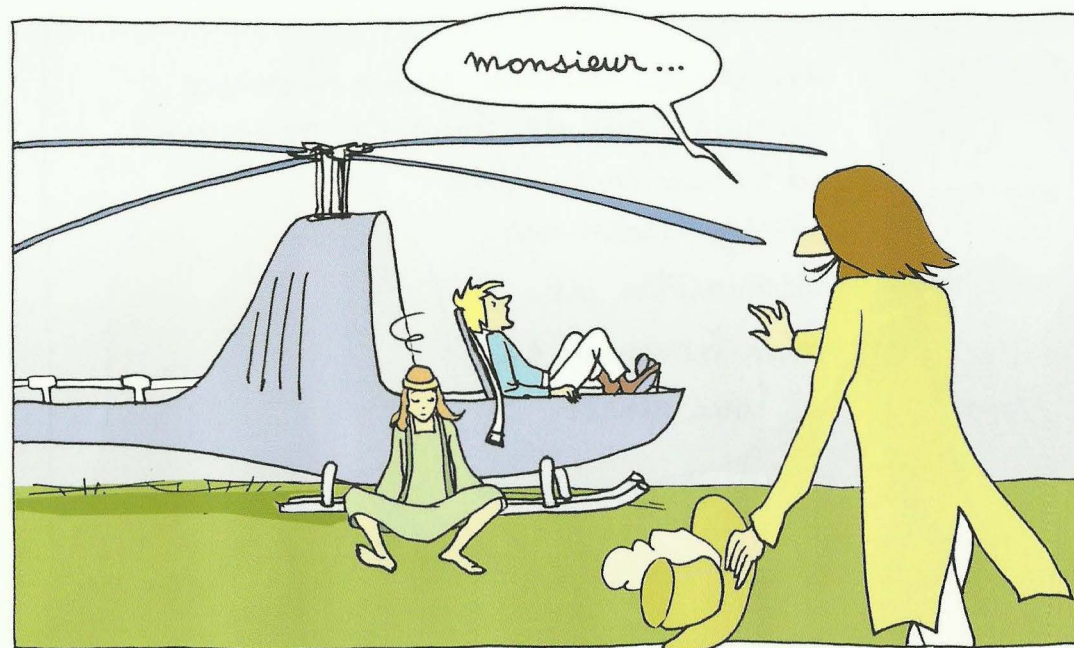
A dix mètres de hauteur Candide tire franchement sur son manche en maintenant le pas collectif au minimum. La machine se cabre et les pales sont attaquées avec une incidence de vent relatif plus forte, ce qui accroît la partie du rotor qui est "motrice" autorotative. Le faisant il convertit l'énergie cinétique de translation $\frac{1}{2} M V_x^2$ en énergie de rotation. Puis il pousse sur le manche



il tire alors sur le levier de pas collectif. le flux d'air s'inverse. le rotor passe alors du régime "autogire" au régime "hélicoptère". Profitant de l'effet de sol il utilise l'énergie cinétique emmagasinée par le rotor(*)



(*) Cette manœuvre est fortement consommatrice d'adrénaline



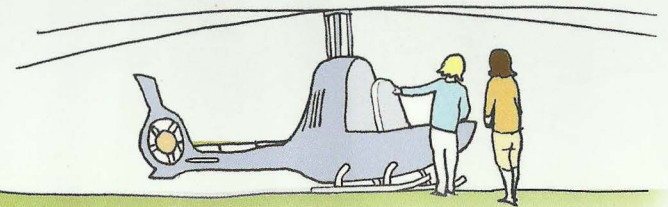
Comme ce baron est ennuyeux.
Pour une fois qu'apparaît
quelque chose d'un peu amusant
il veut mettre l'inventeur sous
les verrous. Nous allons arranger
cela. Plissonneau, passez-moi
mon épée, je vous prie



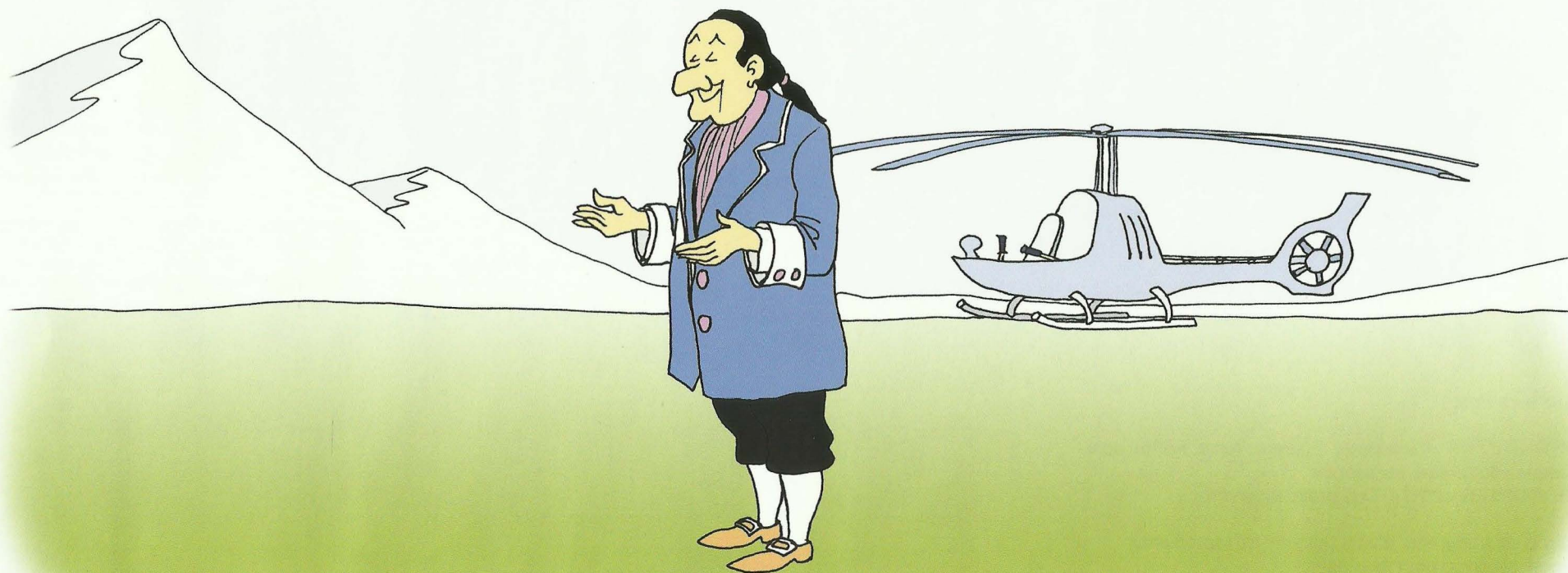
Un genou en terre, jeune homme.
Je vais faire de vous le marquis
d'hélicoland. Vous
serez désormais
le ministre de
mes transports en
tous genres



et marquis, c'est beaucoup
mieux que baron. Alors maintenant
papa, tu nous lâches un peu




vous voyez donc, mon cher Candide, que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles. Car, si vous n'aviez pas été jeté à la porte du château par monsieur le baron à grands coups de pied dans le derrière vous n'auriez pas inventé l'hélicoptère



Un grand merci à Pascal Chrétien pour ses précieux conseils techniques

© Jean-Pierre Petit

 **EUROCOPTER**, Eurocopter, Ecureuil, Astar, AS350 sont
des marques du groupe Eurocopter.
© EUROCOPTER - 2011 - Tous droits réservés.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
strictement réservés pour tous pays.

Coloriste : Jean-Stéphane Beetschen

Impression : Hemisud - 83 - France

Dépôt légal : Juin 2011

Numéro ISBN en cours

