

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.

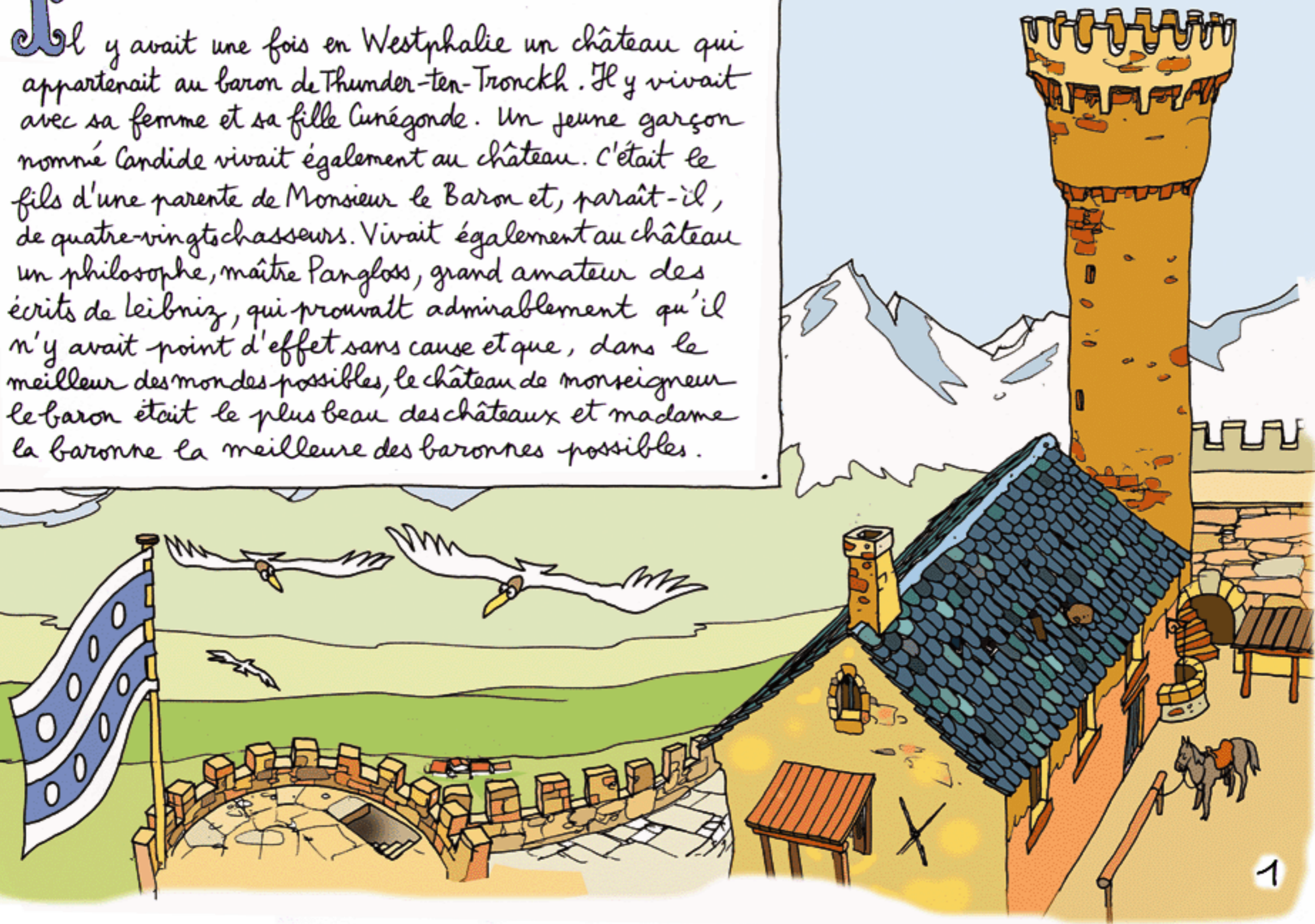
En même temps, le sérieux du point de vue technique et théorique fait de cet ouvrage un livre de base pour les futurs pilotes

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

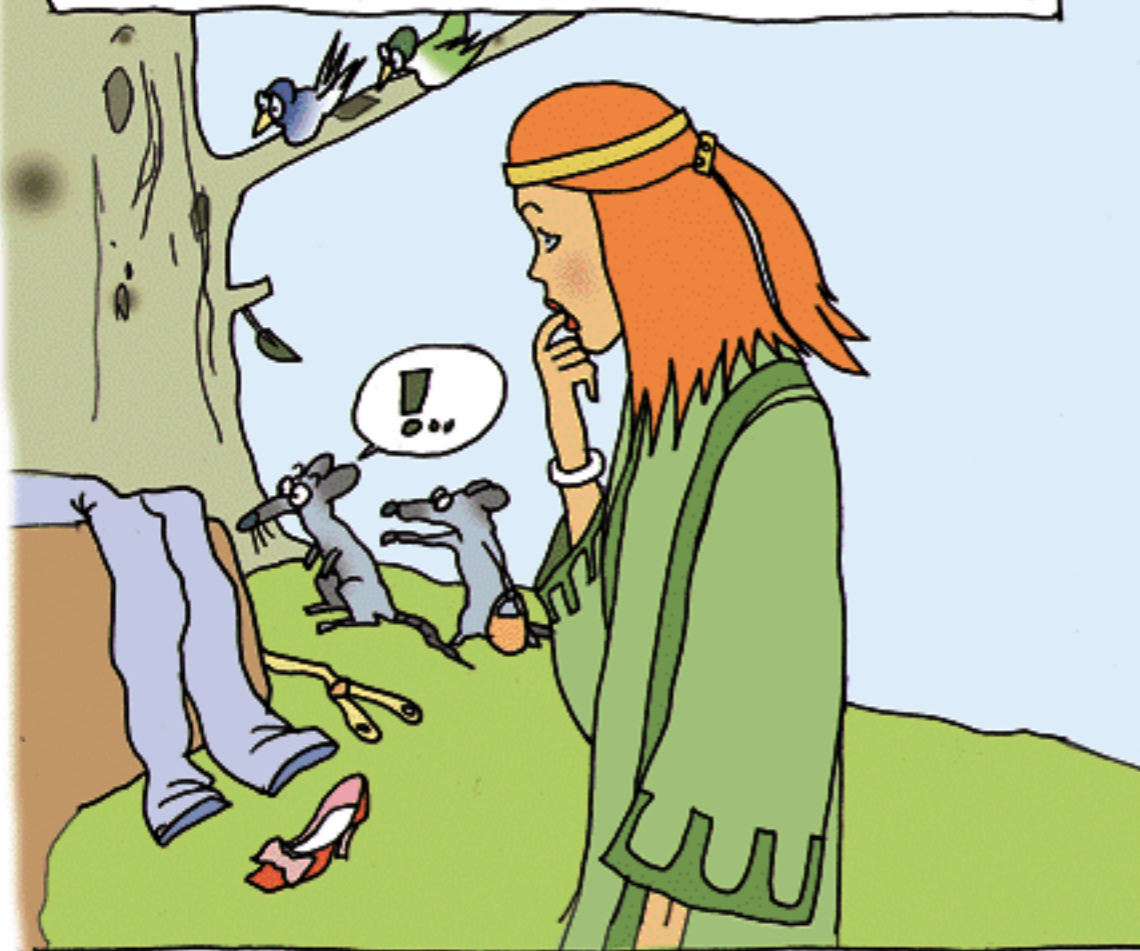
Jean Boulet

A handwritten signature in white ink, appearing to read 'J. Boulet', written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the left.

L 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 (*)

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



Cunégonde fit tomber son mouchoir. Cándide se baissa pour le ramasser. Elle fit de même. Leurs mains se touchèrent, leurs genoux tremblèrent. (*)



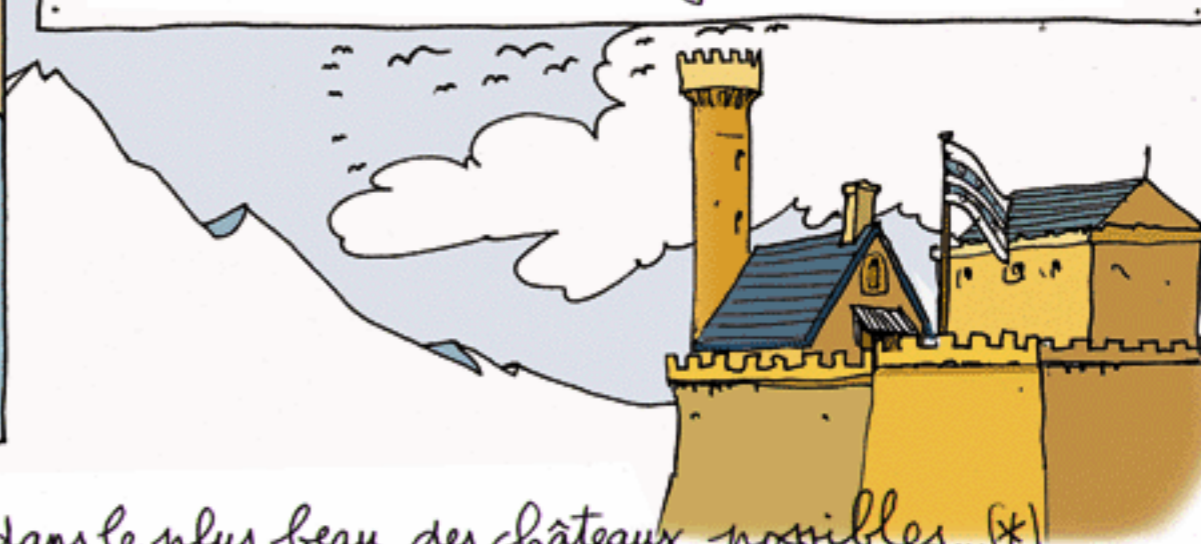
Leurs lèvres se touchèrent, leurs mains s'égarèrent. Monsieur le baron, qui passait par là, vit cette scène, ses effets et ses causes (*)



Monsieur le baron chassa Cándide 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)



voilà notre amoureux éconduit par son futur beau-père

Ah, maître Pangloss, me voici devenu le plus malheureux des hommes. Le baron tient sa fille cloîtrée dans le donjon. Sa mère, pour éviter qu'elle ne noue ses draps pour s'évader, ne lui a laissé qu'un sac de couchage



Nous sommes prêts à fuir ensemble n'importe où. Mais, pour l'arracher à cette funeste prison il me faudrait me transformer en ... oiseau !

Je peux peut-être faire quelque chose pour vous



J'ai une machine volante: un aéroplane

il vous faut quelle distance pour vous poser ?

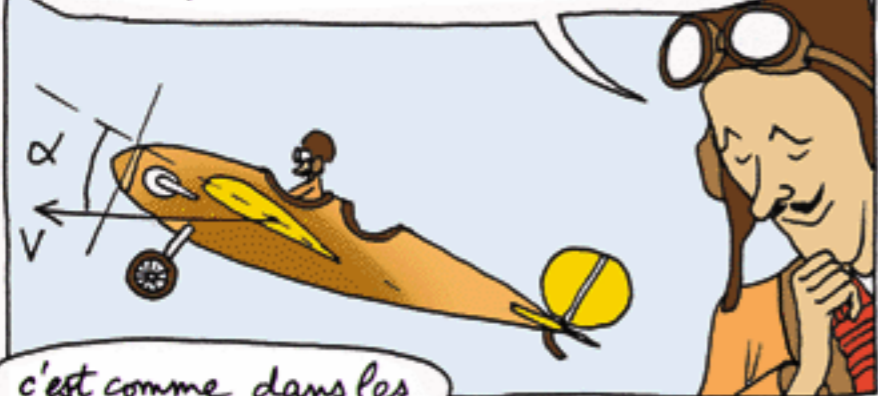
environ cent cinquante mètres



Ça ne collera jamais! La terrasse qui est en haut de la tour où Cunégonde est enfermée est beaucoup trop étroite!

(*) pour savoir comment vole un aéroplane, lisez L'Aspirisouffle dans <http://www.savoir-sans-frontieres.com>

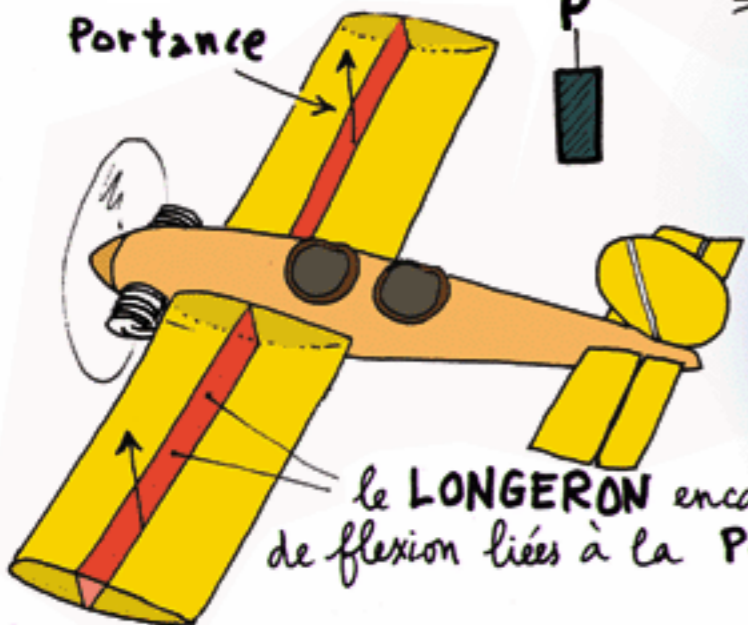
Je dois pouvoir réduire la longueur d'atterrissage en effectuant une approche à plus faible vitesse. La **PORTANCE** de l'aile est proportionnelle à son **INCIDENCE** α . En cabrant l'avion je devrais pouvoir voler beaucoup plus lentement



c'est comme dans les flèches de quilles

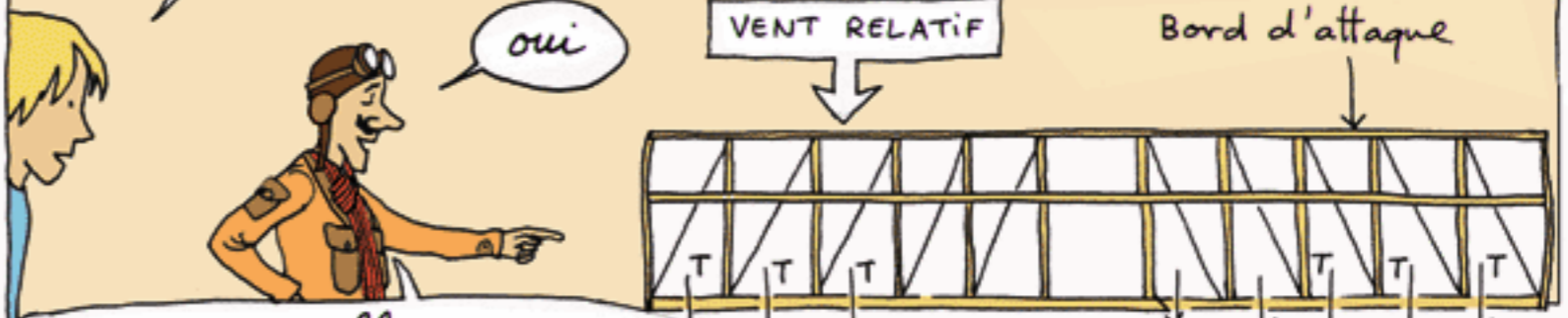


ces barres travaillent en **TRACTION**

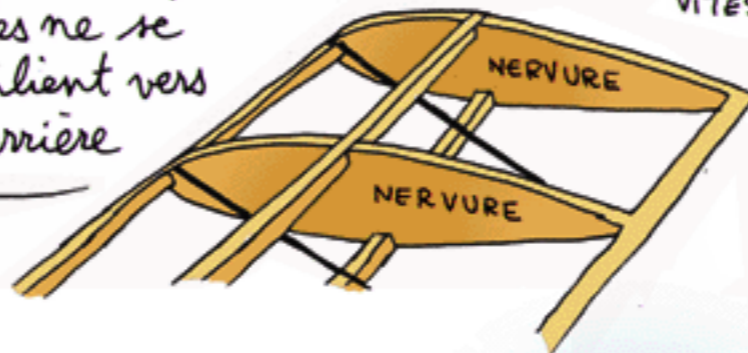


le **LONGERON** encaisse les forces de flexion liées à la **PORTANCE**

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



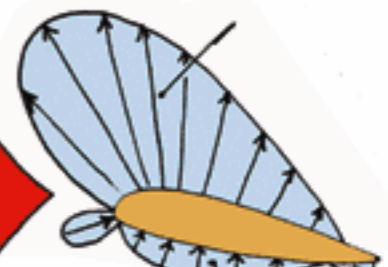
J'ai mis des câbles raidisseurs qui encaissent les forces de traînée et évitent que les ailes ne se replient vers l'arrière



PORTANCE
FORCE AÉRODYNAMIQUE
TRAÎNÉE
VITESSE

PROFIL D'AILE

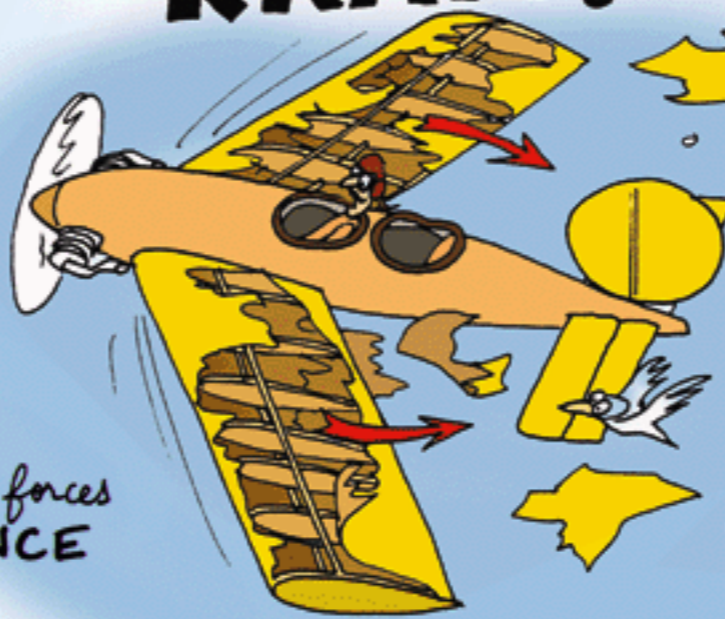
EFFET DE SUCCION SUR L'EXTRADOS



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

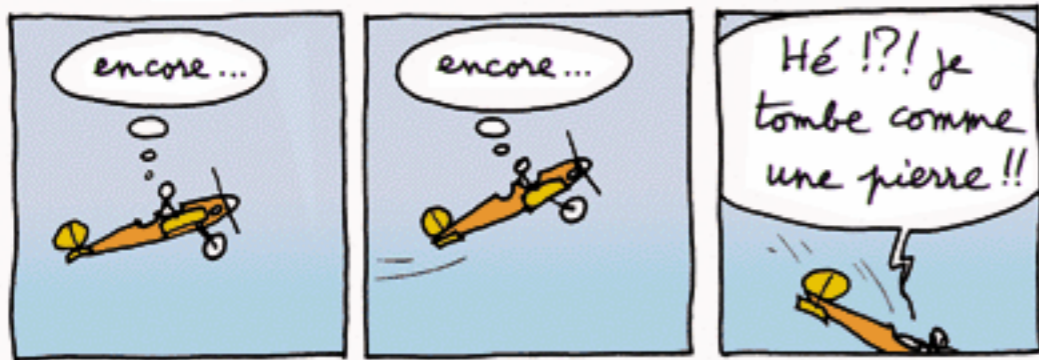
KRAAAK!

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

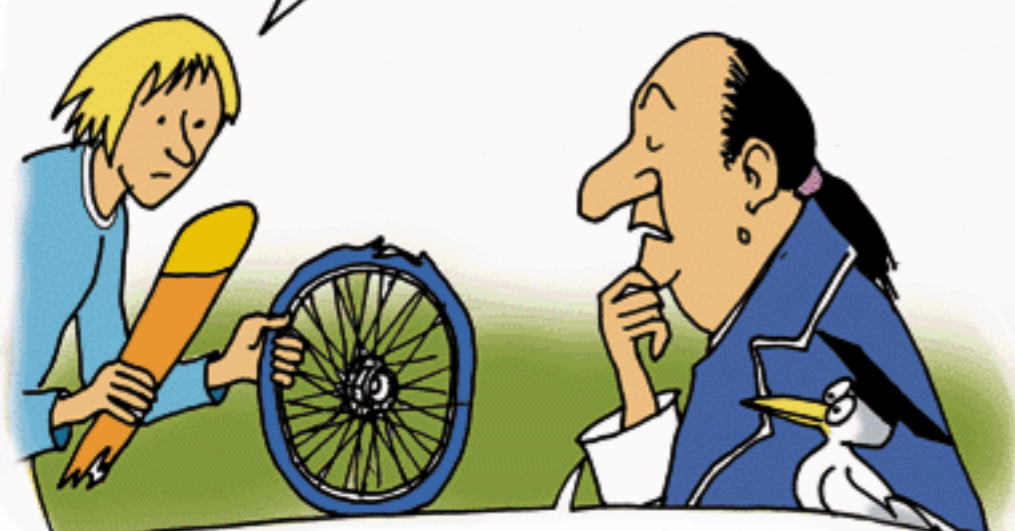
il faudra que ça cabre ou que ça dise pourquoi



LE DÉCROCHAGE

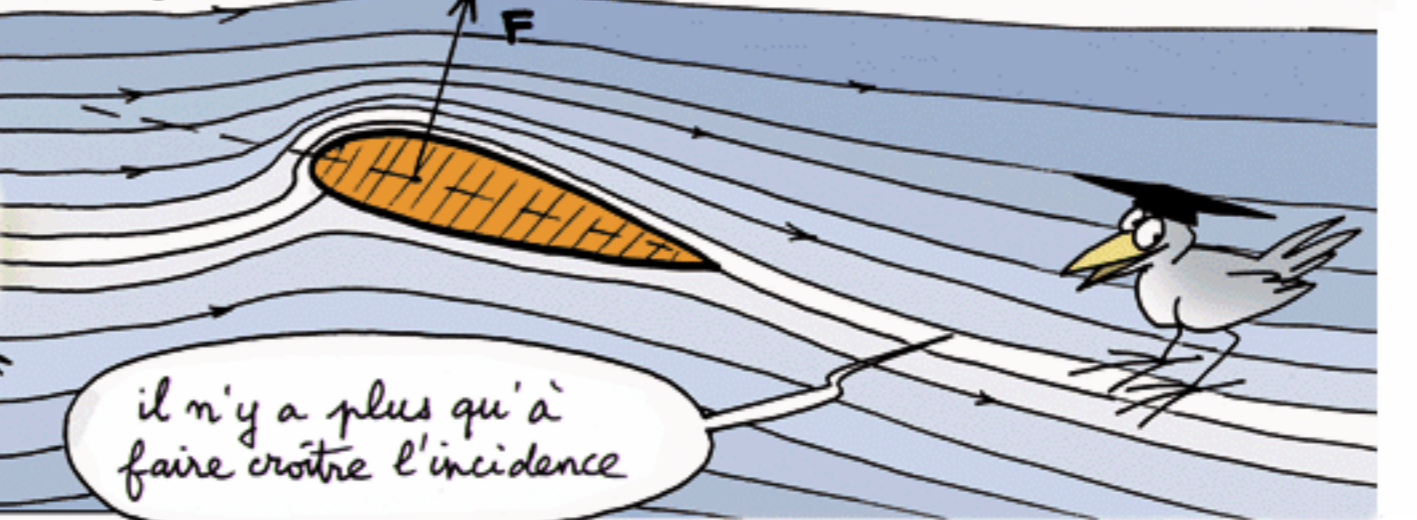


ce n'est pas avec cette machine que je pourrai délivrer Cunégonde. Te me demande franchement si cet engin a un avenir quelconque

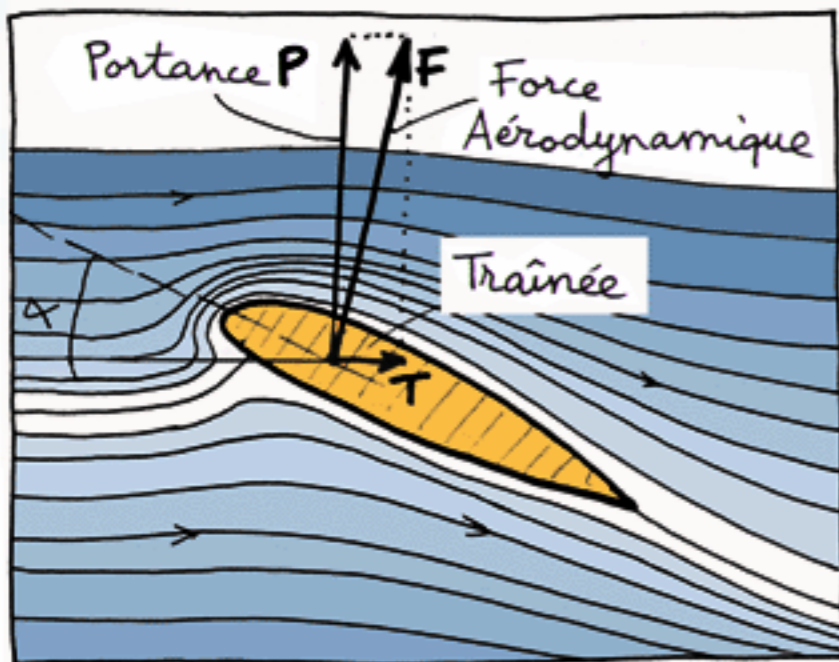


Comme il n'y a point d'effet sans cause il nous faut découvrir la raison suffisante de cette brutale disparition de la portance

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

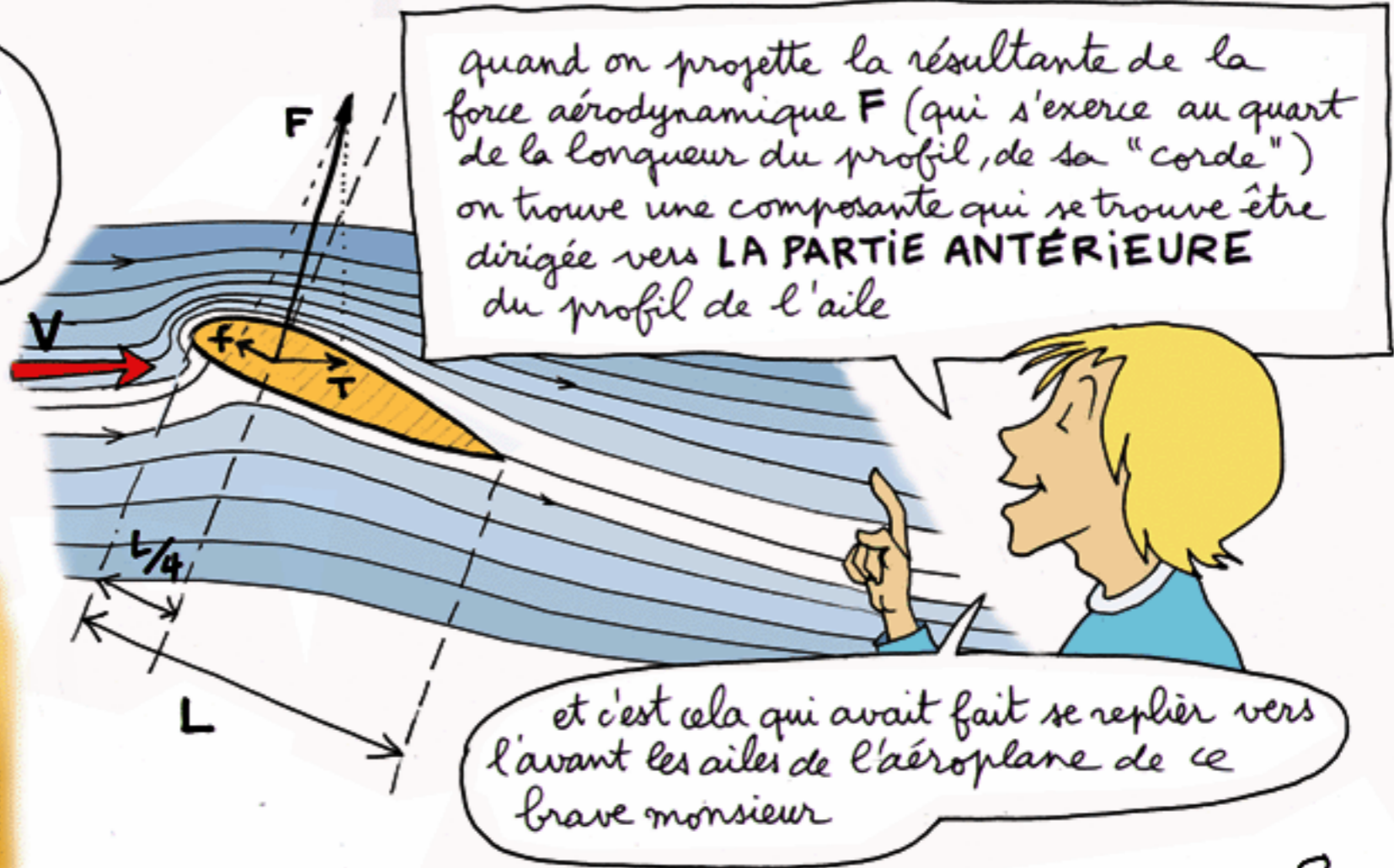


(*) dans <http://www.savoir-sans-frontieres.com>



A partir d'une certaine incidence les filets fluides décrochent du profil. En aval s'établit un régime de tourbillons alternés, très turbulent. La traînée s'envole tandis que la portance s'effondre.

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



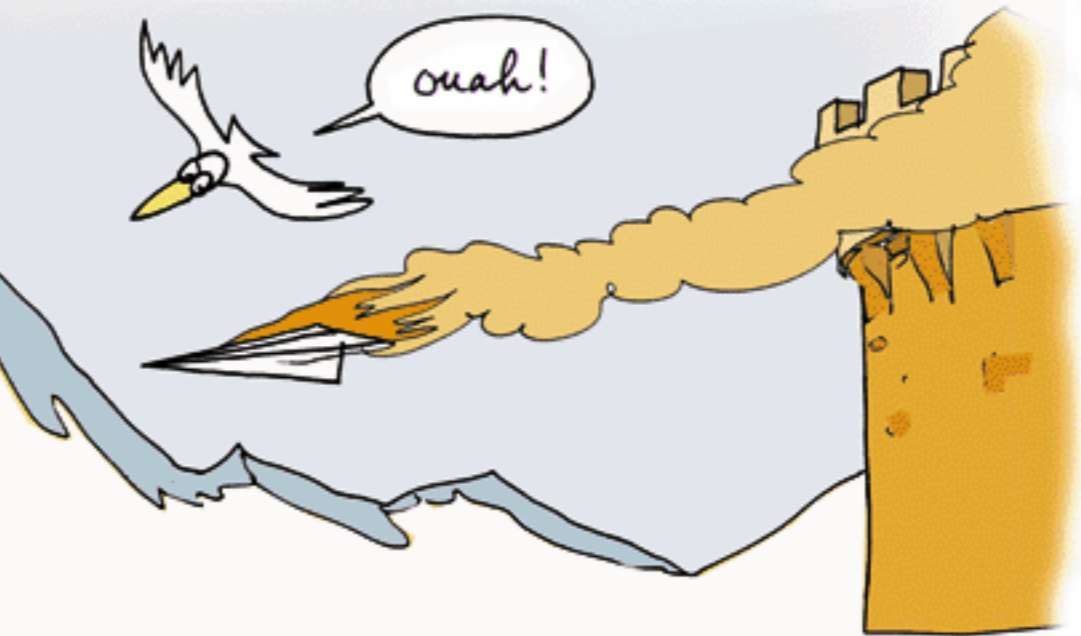
quand on projette la résultante de la force aérodynamique F (qui s'exerce au quart de la longueur du profil, de sa "corde") on trouve une composante qui se trouve être dirigée vers **LA PARTIE ANTÉRIEURE** du profil de l'aile

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

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



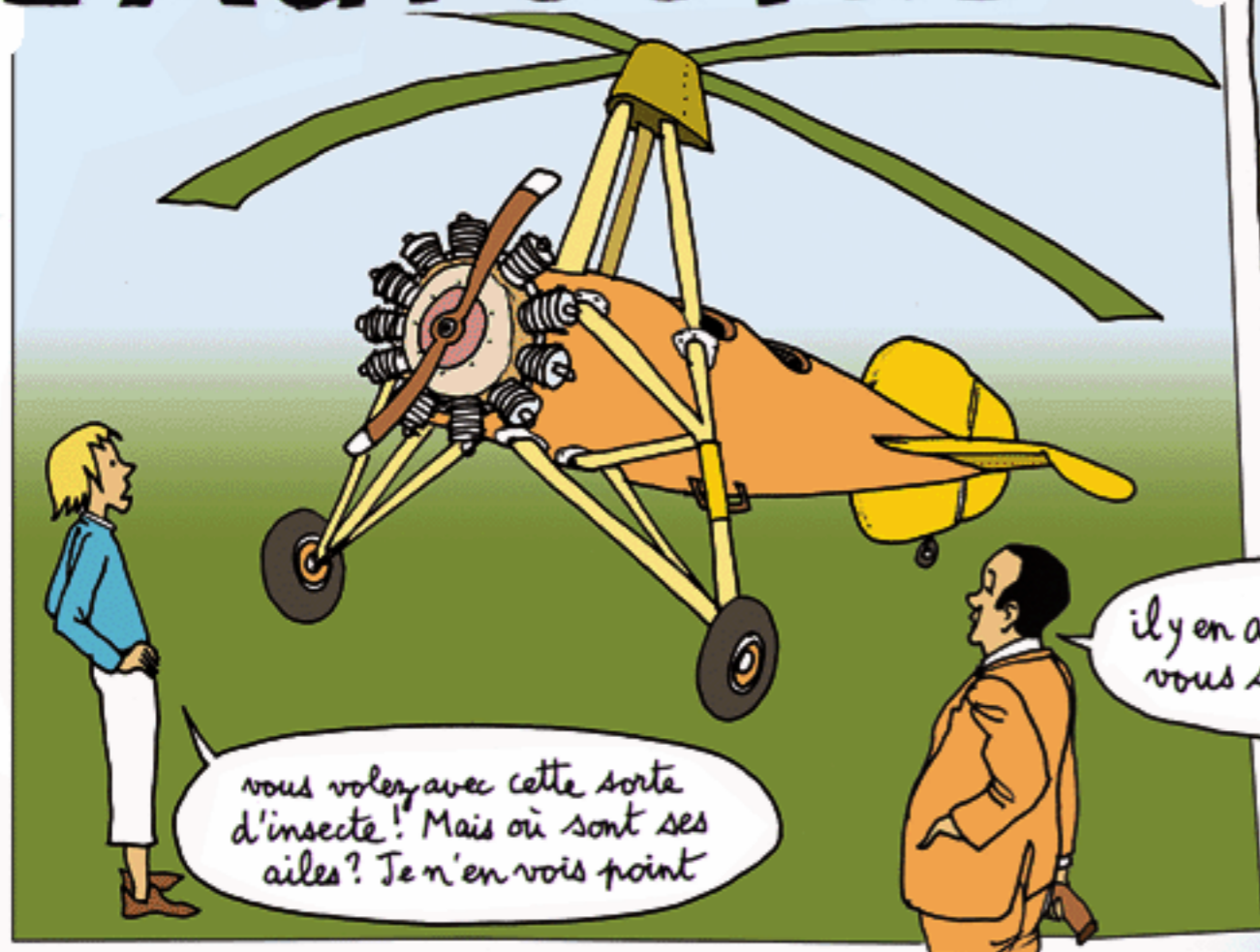
mais ses paroles étaient si enflammées que ses missives se consumaient avant de toucher le sol



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



L'AUTOGIRE



vous volez avec cette sorte d'insecte! Mais où sont ses ailes? Je n'en vois point

ily en a quatre. Ça ne vous suffit pas?



Comment appelez-vous cet appareil?

l'autogire vous voulez l'essayer?

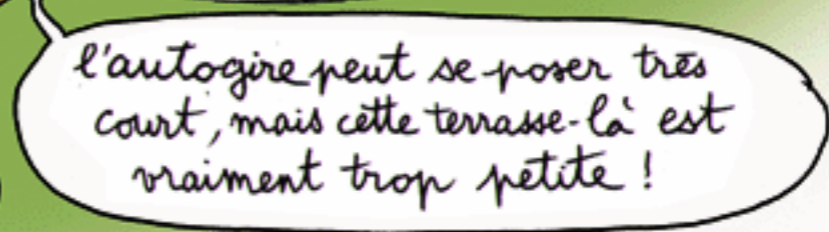
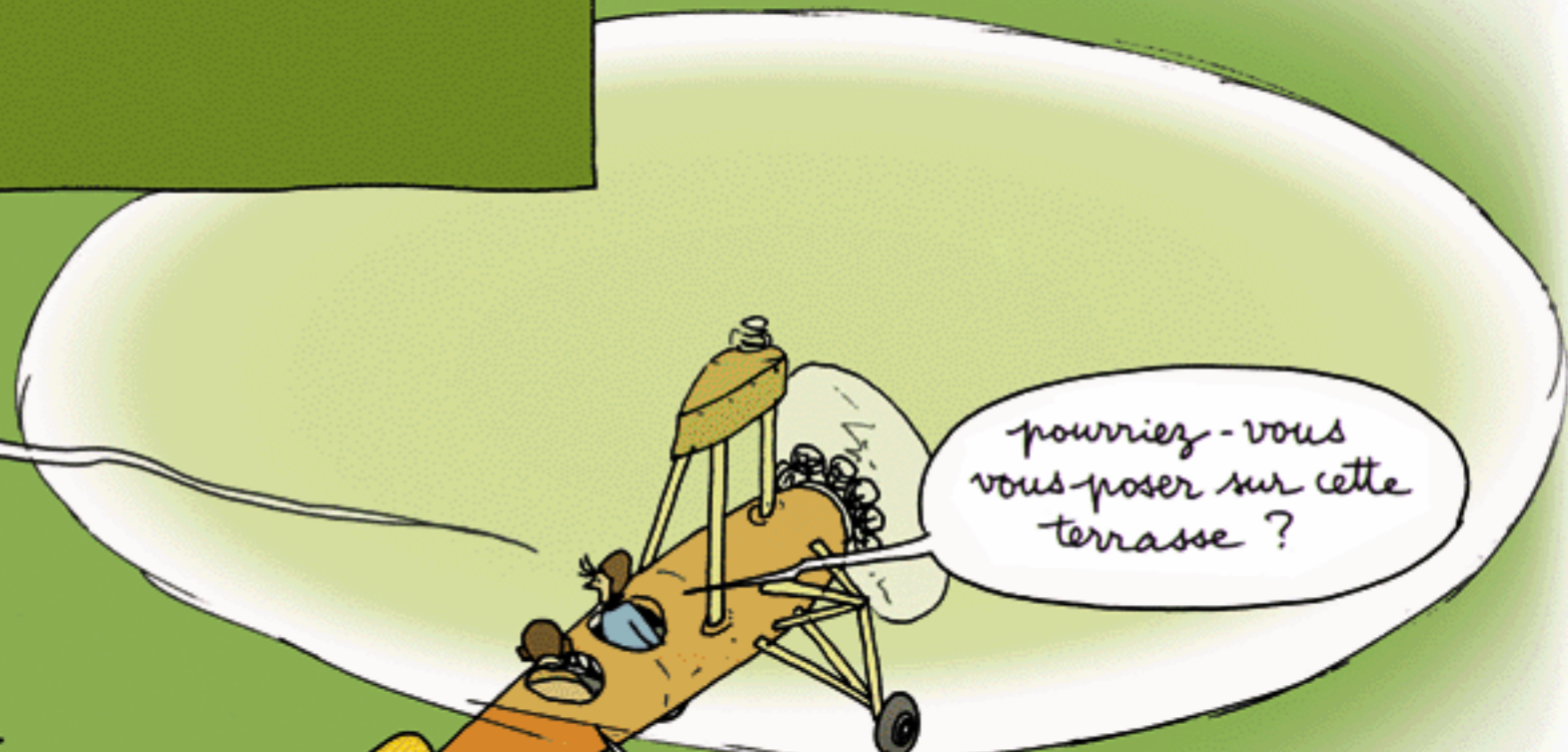
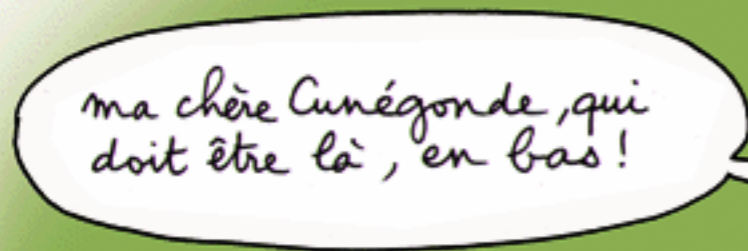
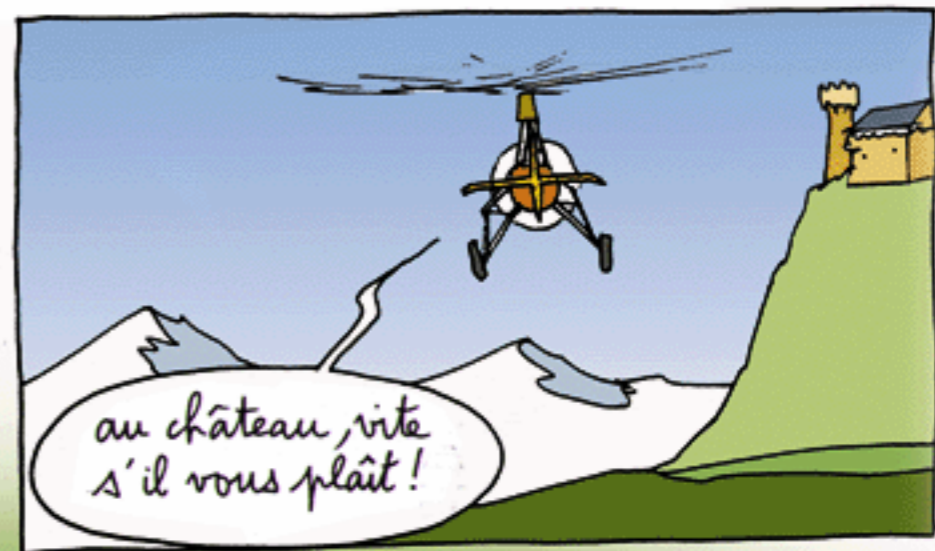
vous voulez dire que c'est moi qui vais assurer notre sustentation... à la main?

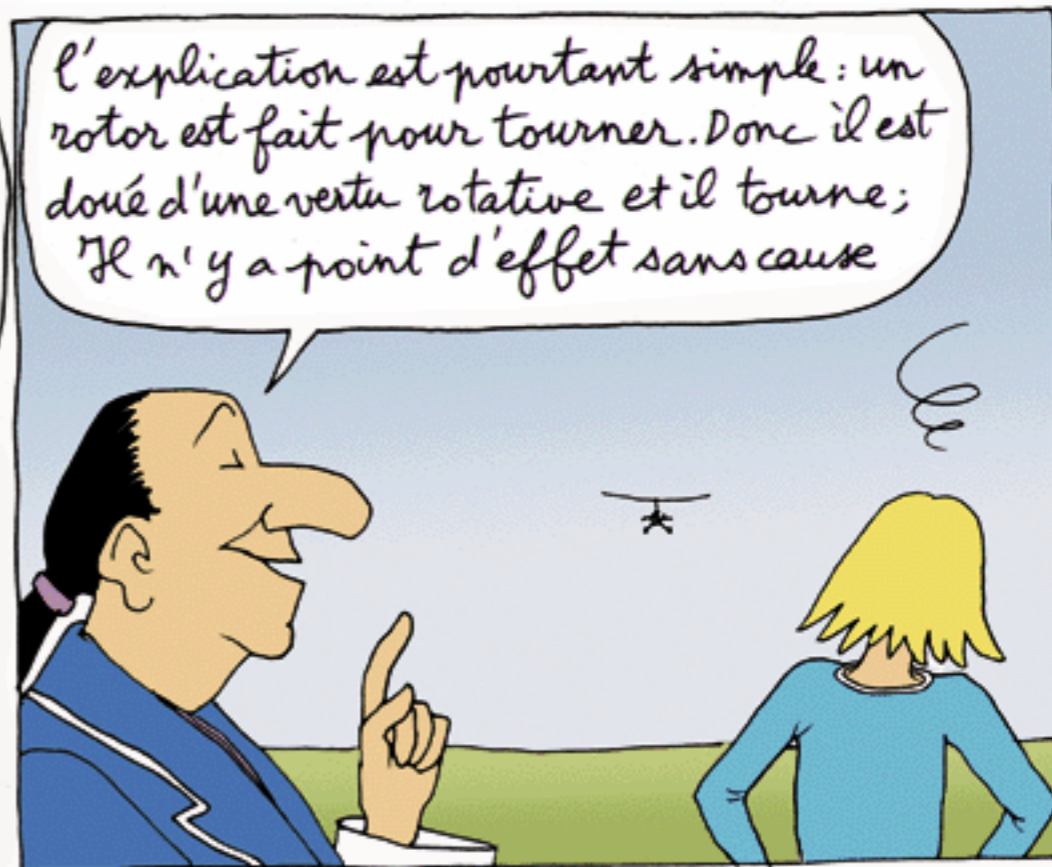


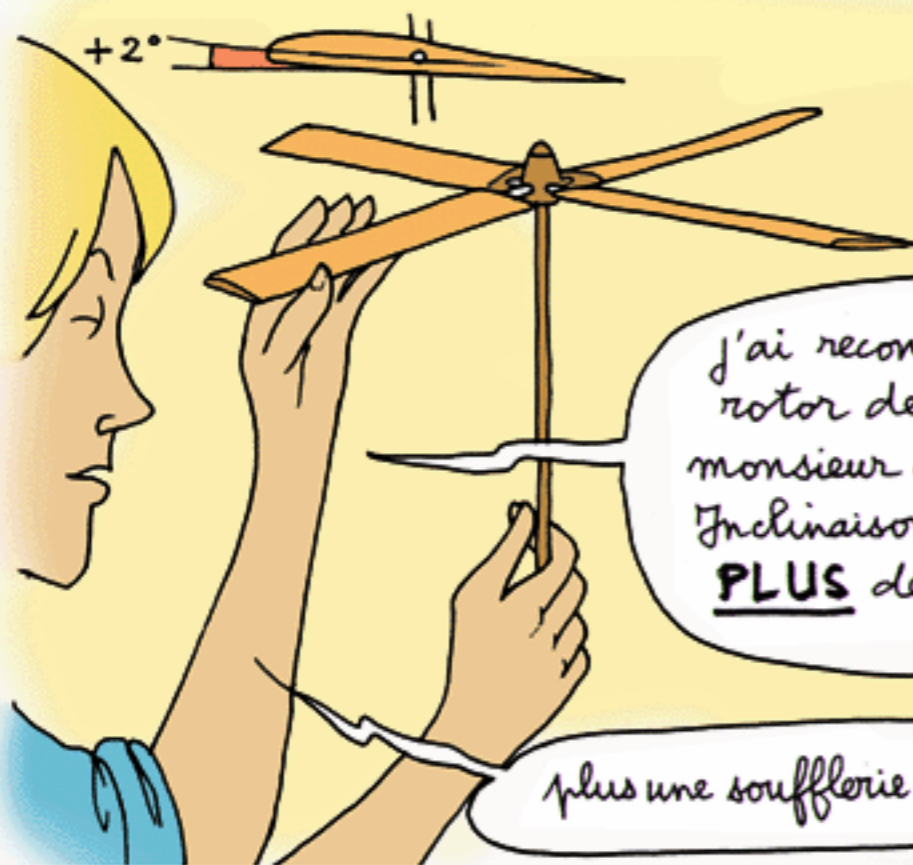
pourriez-vous mettre le rotor en mouvement?

le... ah, comment?

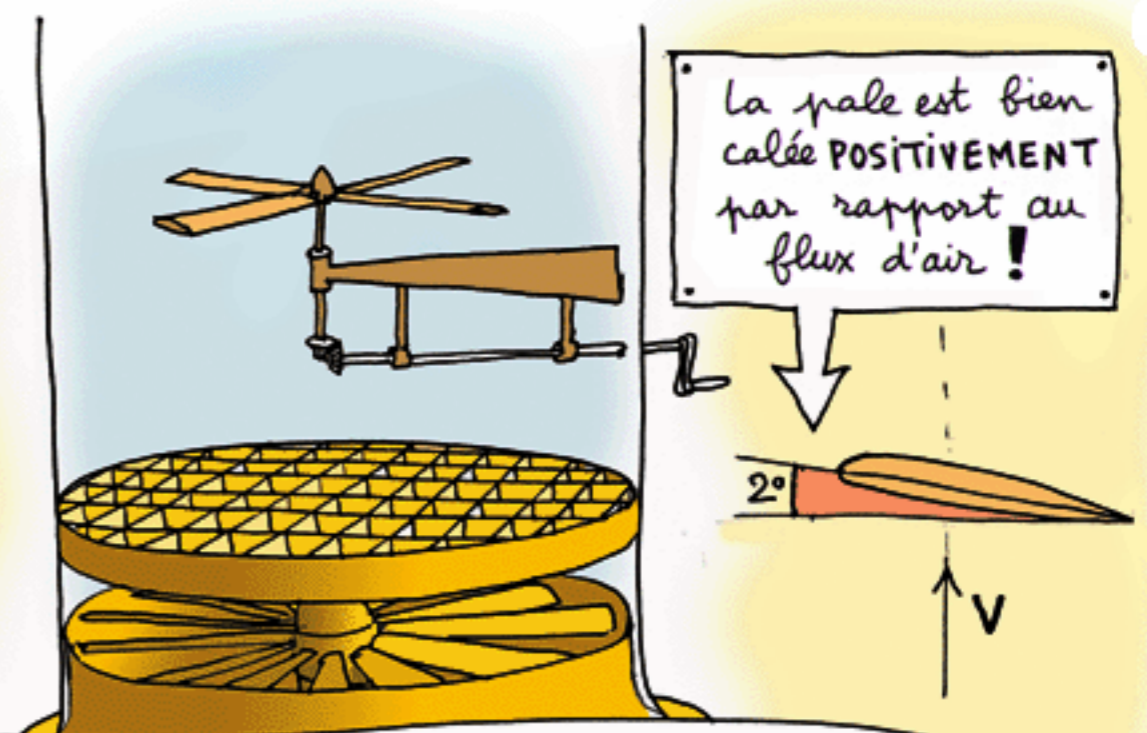
No...







J'ai reconstitué le rotor de ce bon monsieur de la Cierva
Inclinaison des pales = **PLUS** deux degrés



La pale est bien calée **POSITIVEMENT** par rapport au flux d'air !

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



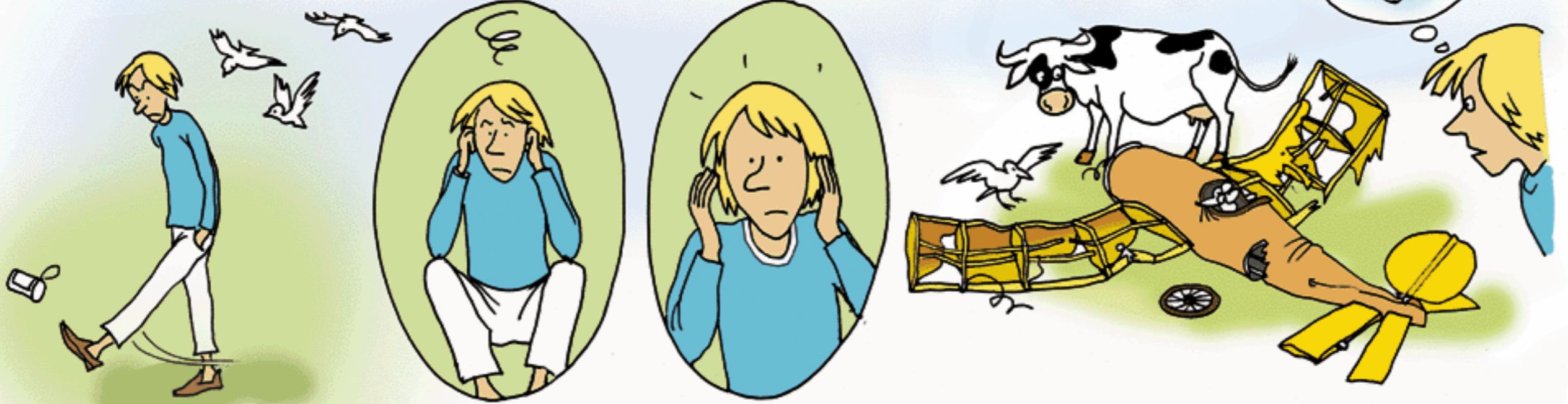
maintenant je mets le rotor en rotation



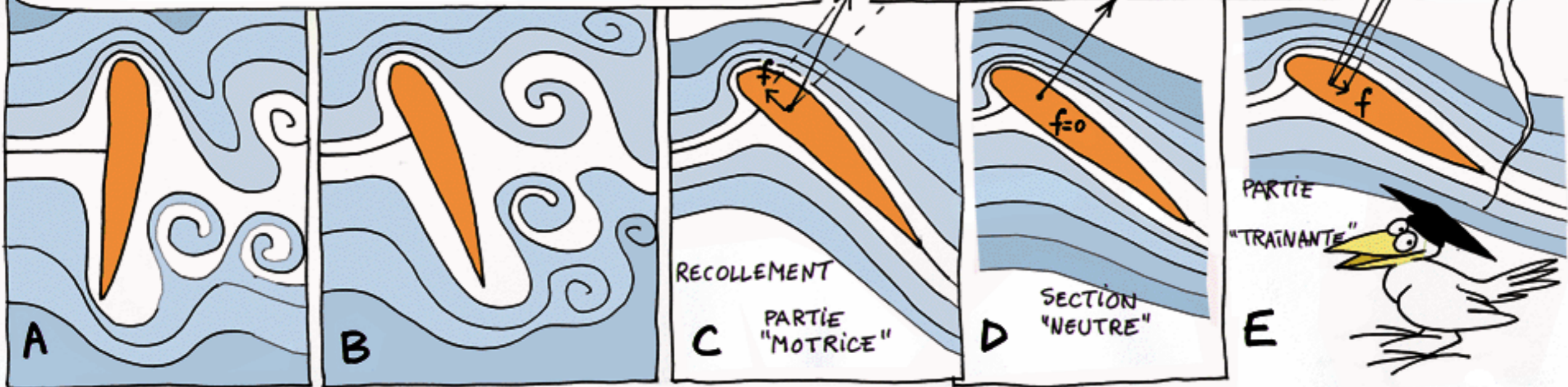
Et voilà. Il tourne tout seul. c'est à n'y rien comprendre !

c'est ... de la magie !?

AUTOROTATION



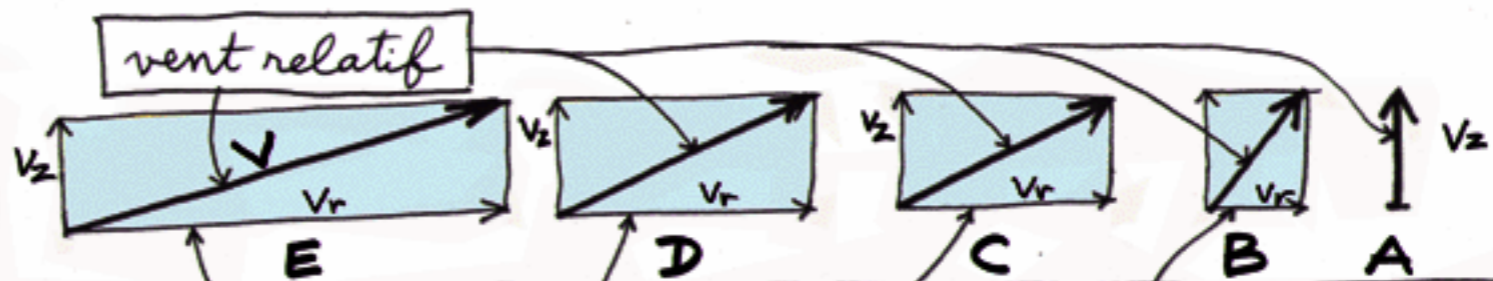
Quand l'incidence de la pale diminue, par rapport à la direction du VENT RELATIF, l'écoulement recolle (figure C). La force aérodynamique (composante f) tend à entraîner la pale. En D cette force s'annule, puis s'inverse en E. La composante f freine alors le mouvement de la pale



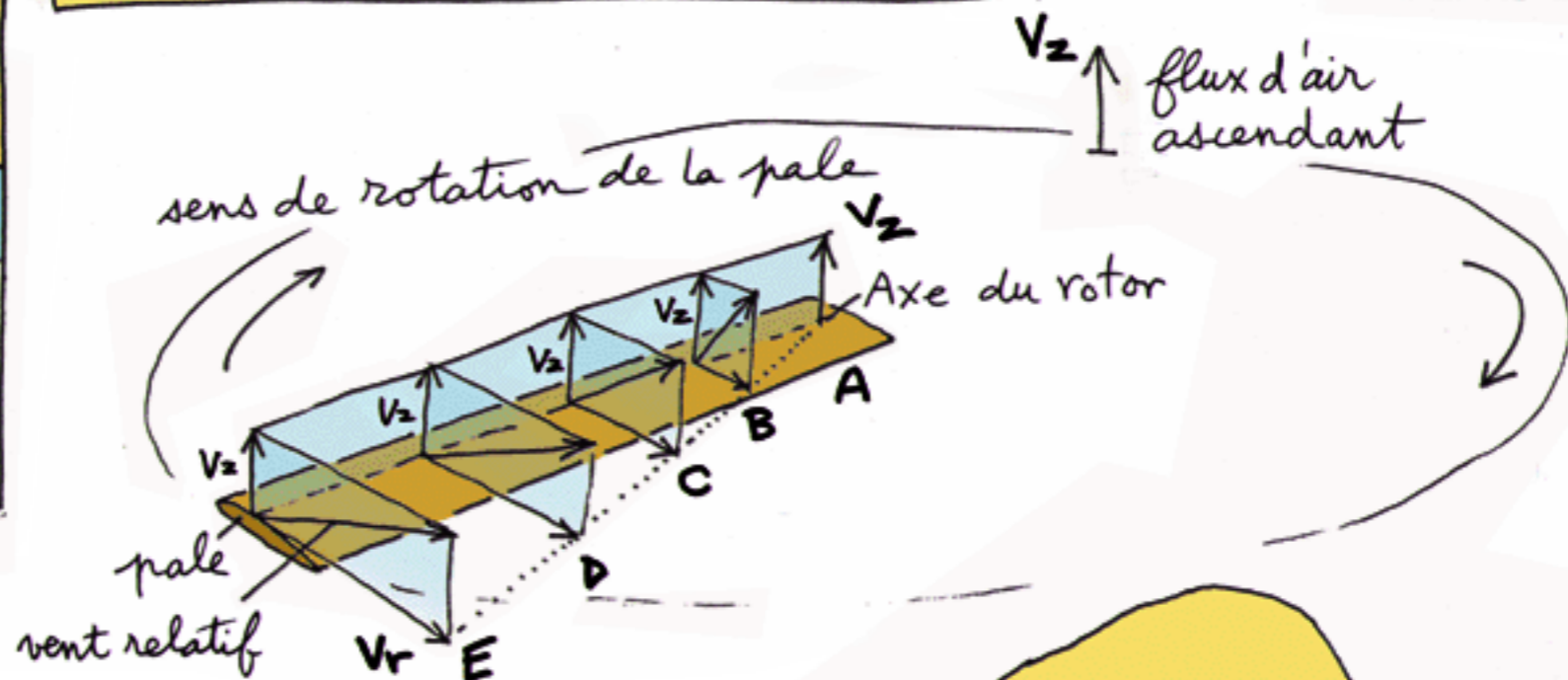
J'entends bien, mon cher Candide.
Mais d'où vient ce changement
de direction de ce que vous
appelez le **VENT RELATIF** ?



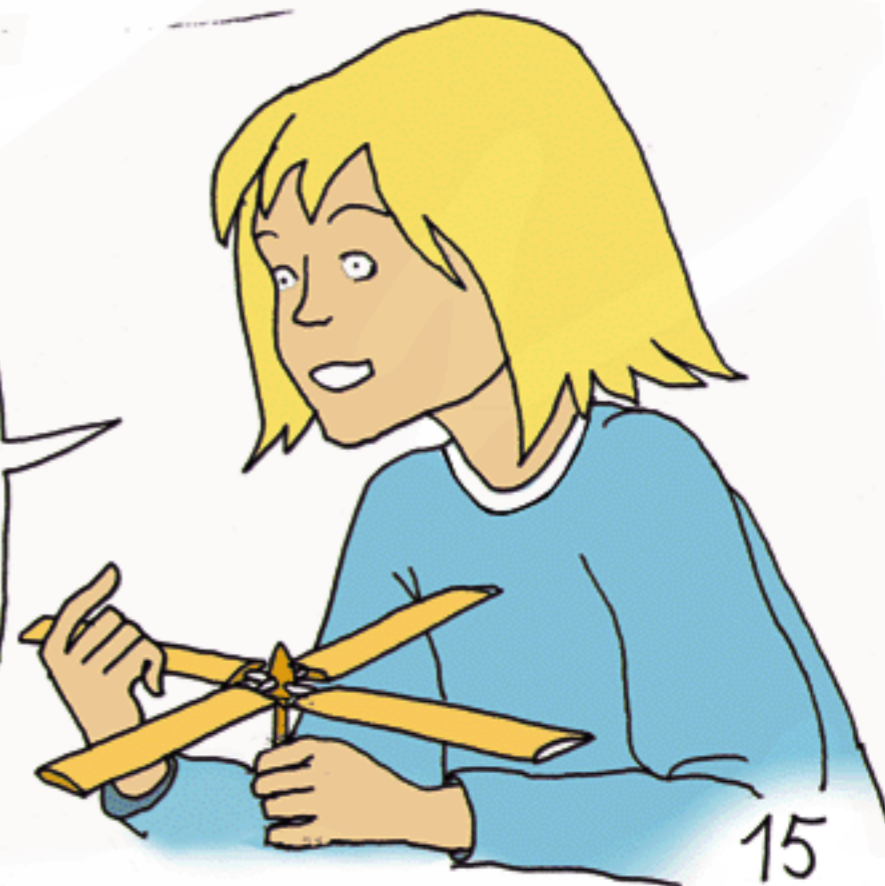
la vitesse du rotor
se combine avec
la vitesse issue de la
rotation de la pale



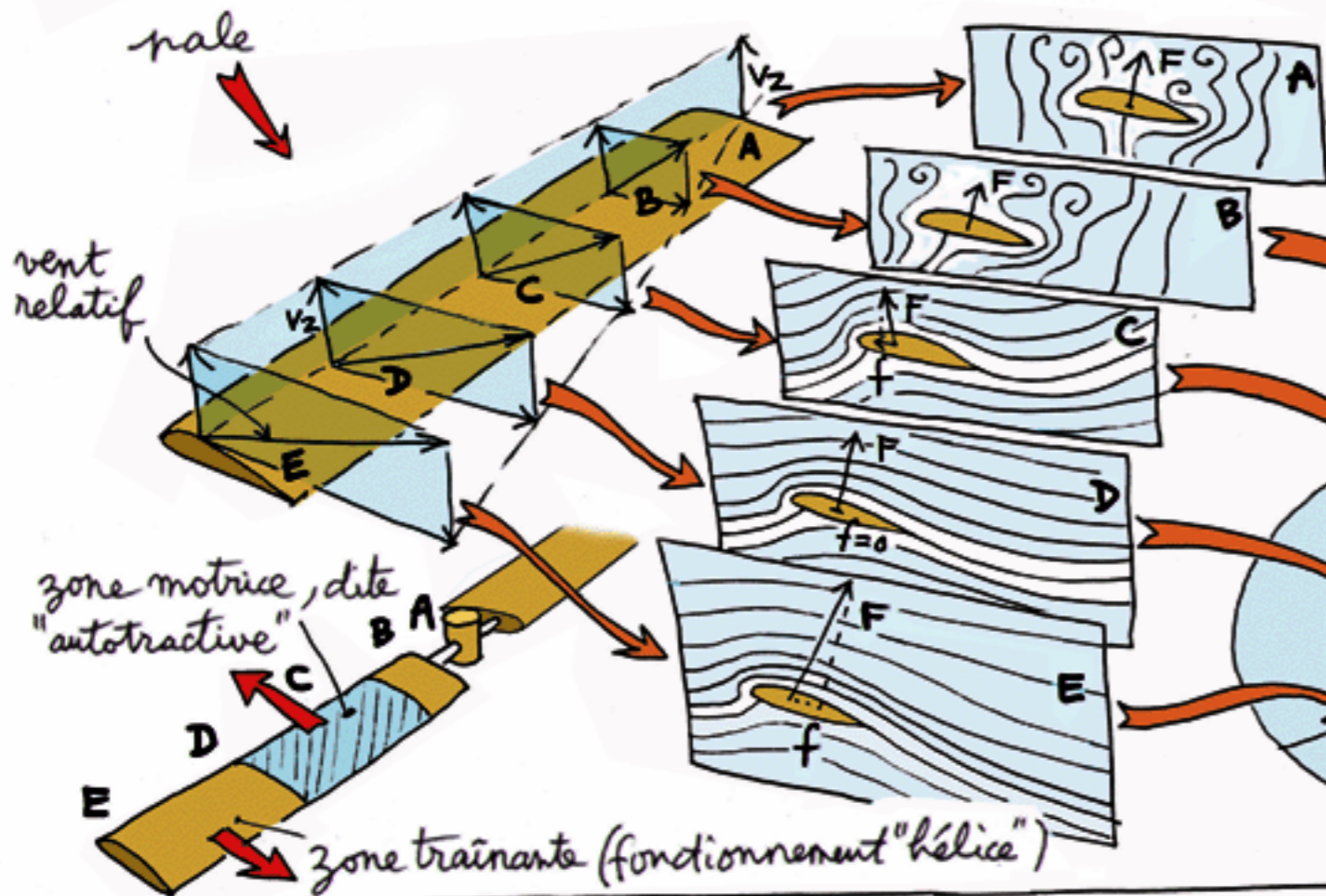
V_r : composante horizontale du v relatif dû à la rotation de la pale



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



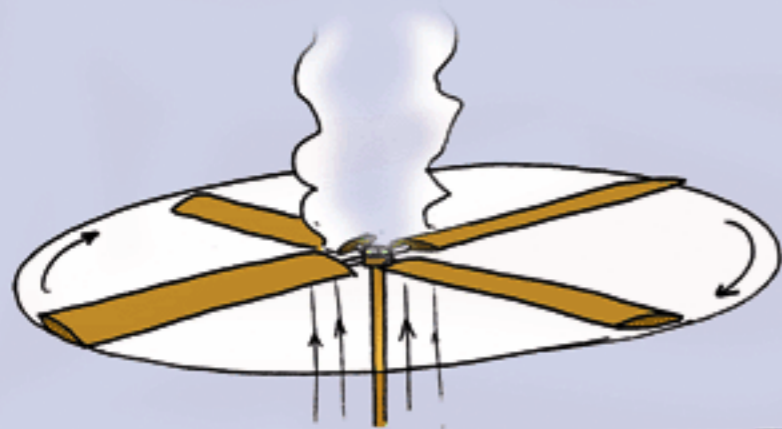
Selon la façon dont le **VENT RELATIF** attaque la pale on obtient des écoulements très différents. Pour les visualiser j'ai adapté un fin tube qui émet de la fumée, en étant solidaire de la pale en rotation. Et voilà les différents résultats que j'ai pu obtenir



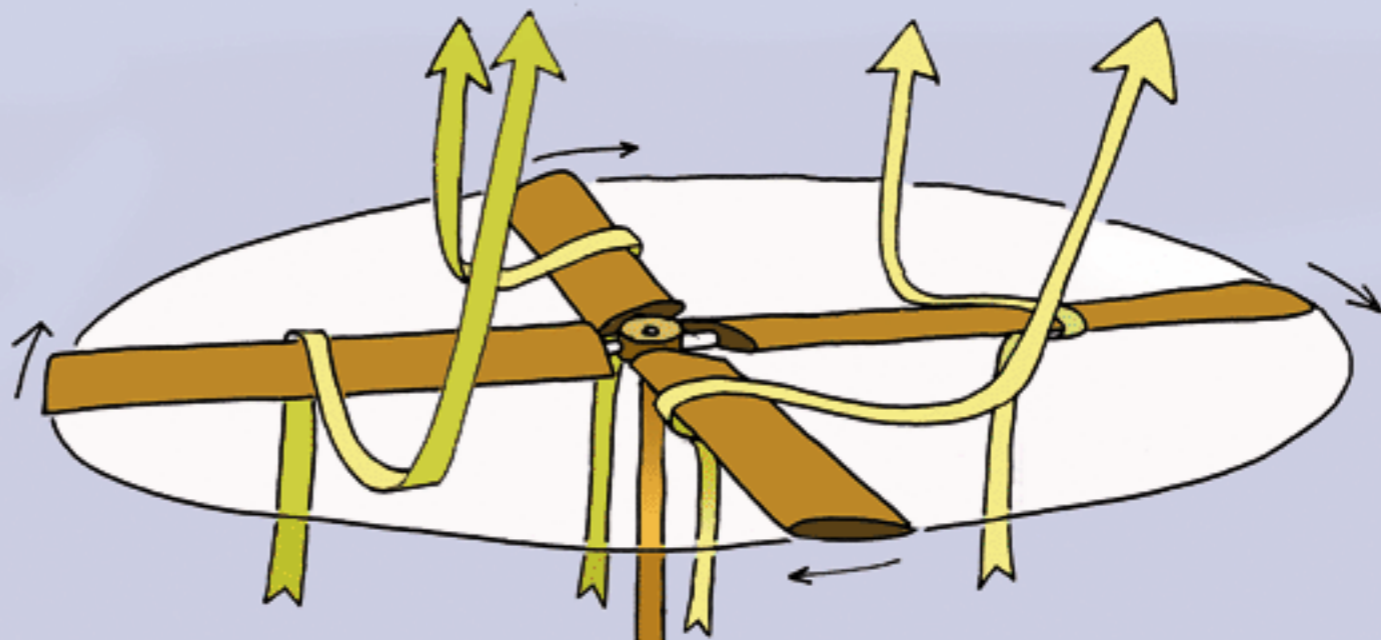
en A et B l'écoulement est "décroché" La pale crée une forte turbulence. En C l'écoulement recolle au profil. la force aérodynamique tend à entraîner la pale vers l'avant (zone motrice, "autorotative", grise)

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

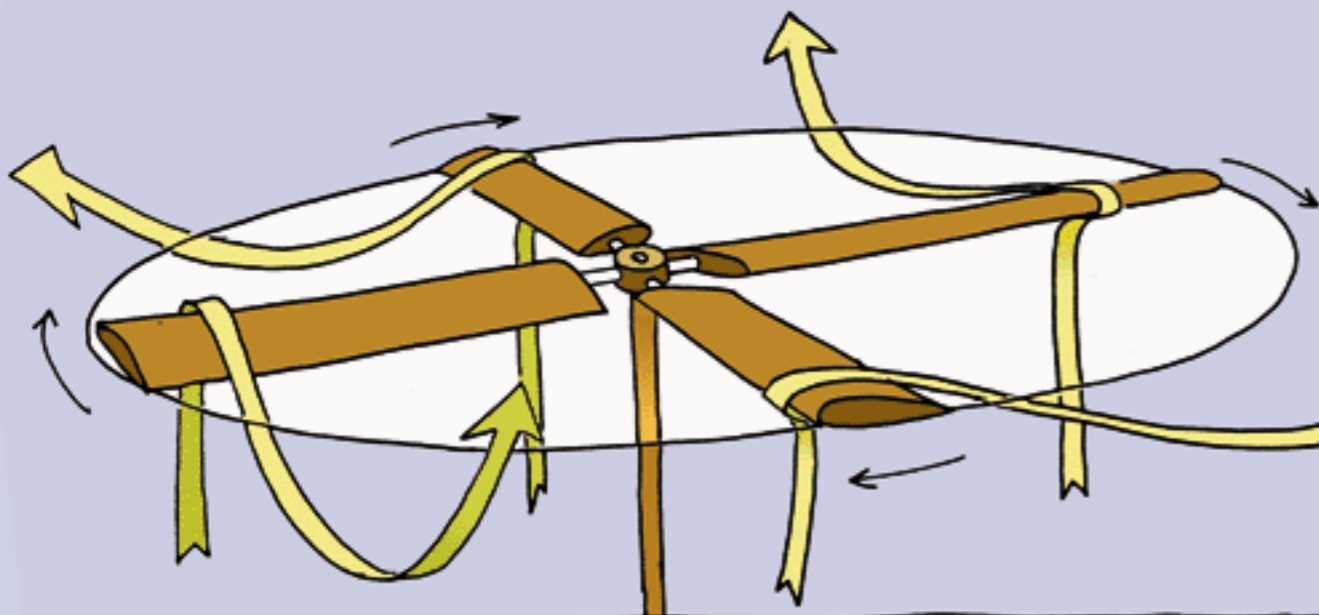
tout cela ayant été essayé en soufflerie par Juan de la Cierva



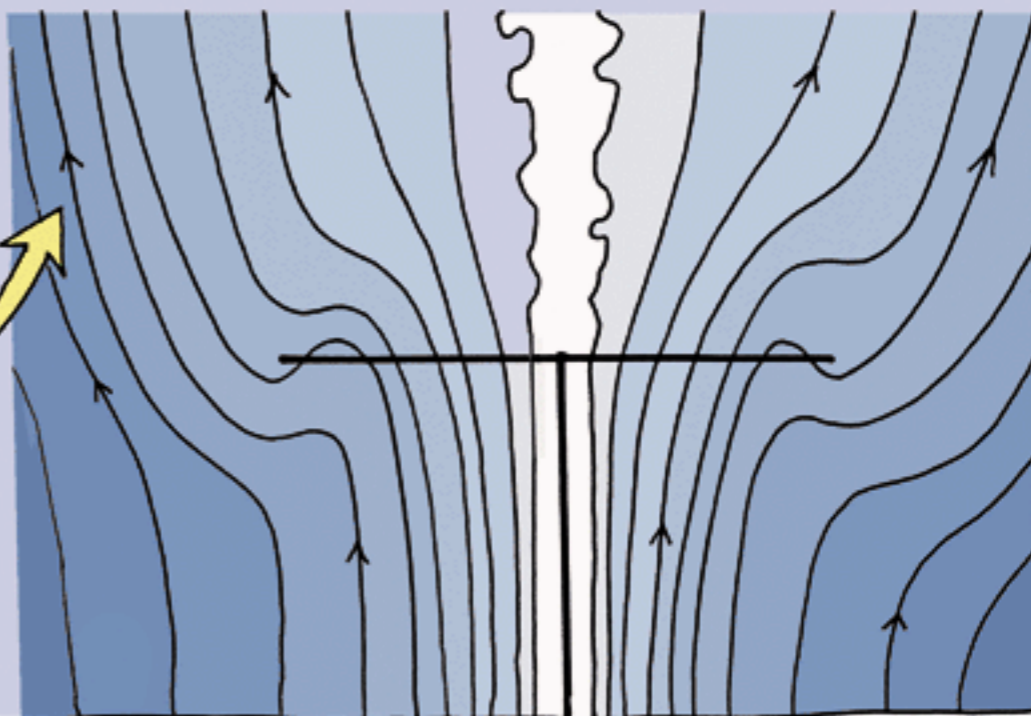
au dessus de la partie centrale
(écoulement "décroché", un
sillage fortement turbulent)



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

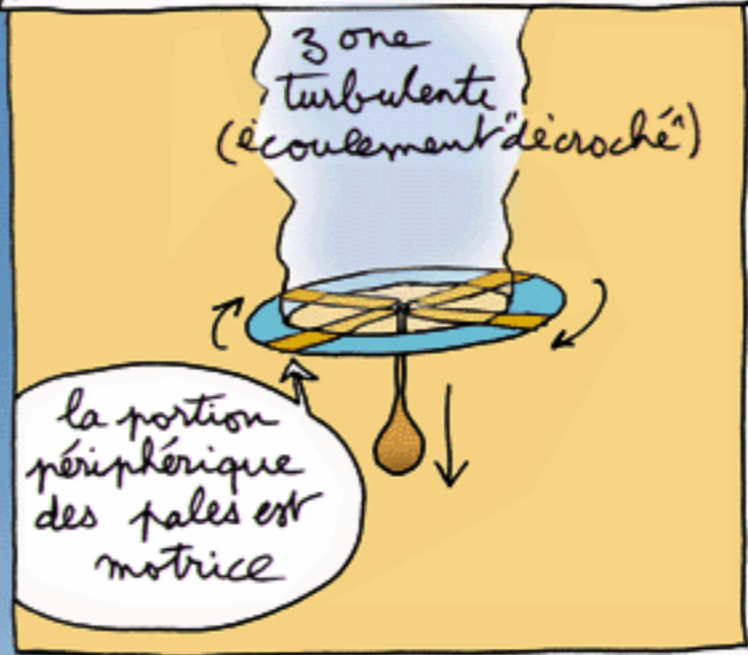


ce qui donne à l'écoulement global
l'allure étrange ci-dessus

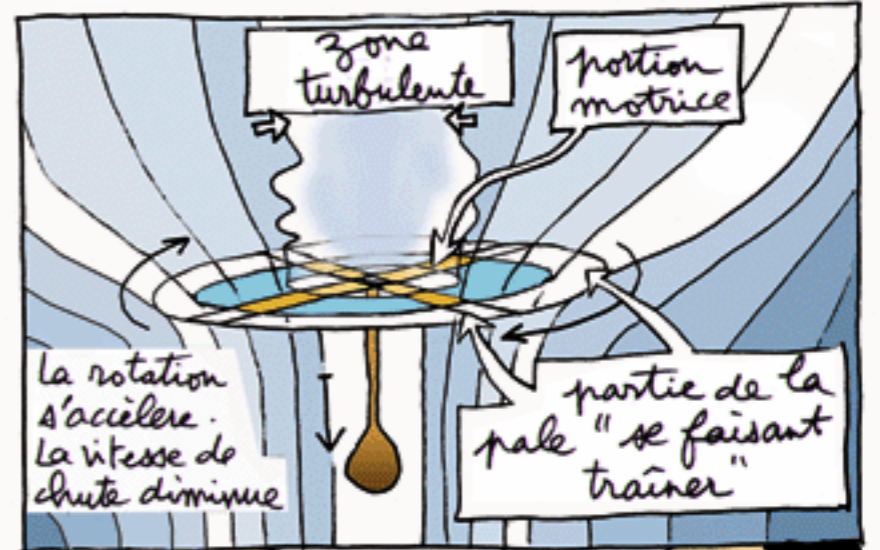
Regardez, maître Pangloss, je lâche cette petite maquette par cette fenêtre après lui avoir communiqué une impulsion minimale



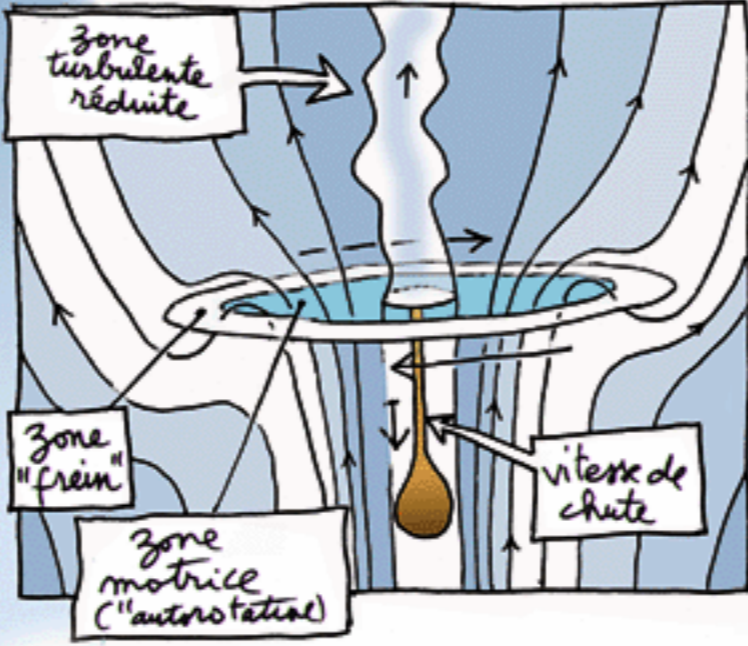
pour faire en sorte que la partie périphérique du rotor tourne assez vite pour que l'écoulement "recolle". Elle devient alors motrice et la rotation s'accélère



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 "traînante".

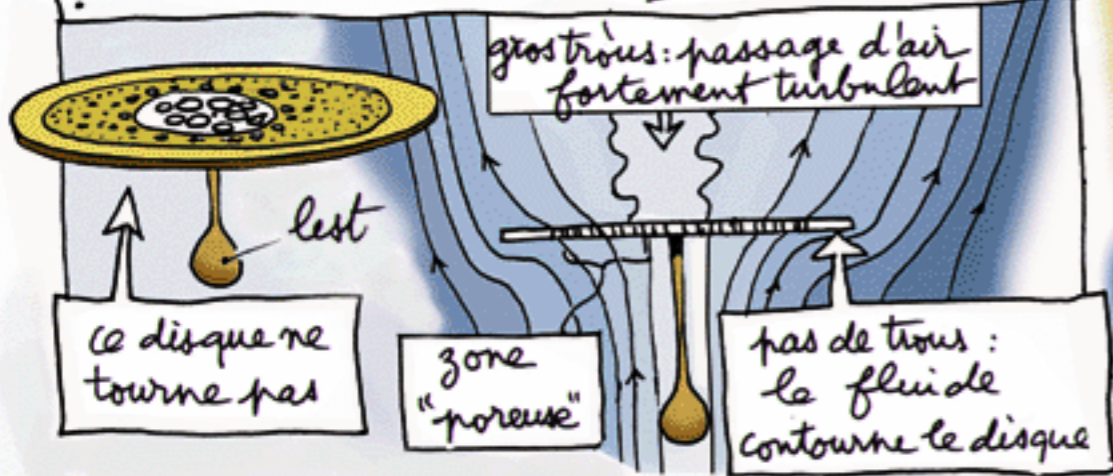


minimale... par rapport à quoi?



la vitesse de rotation se stabilise quand les deux couples s'équilibrent. Le régime d'auto-rotation 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

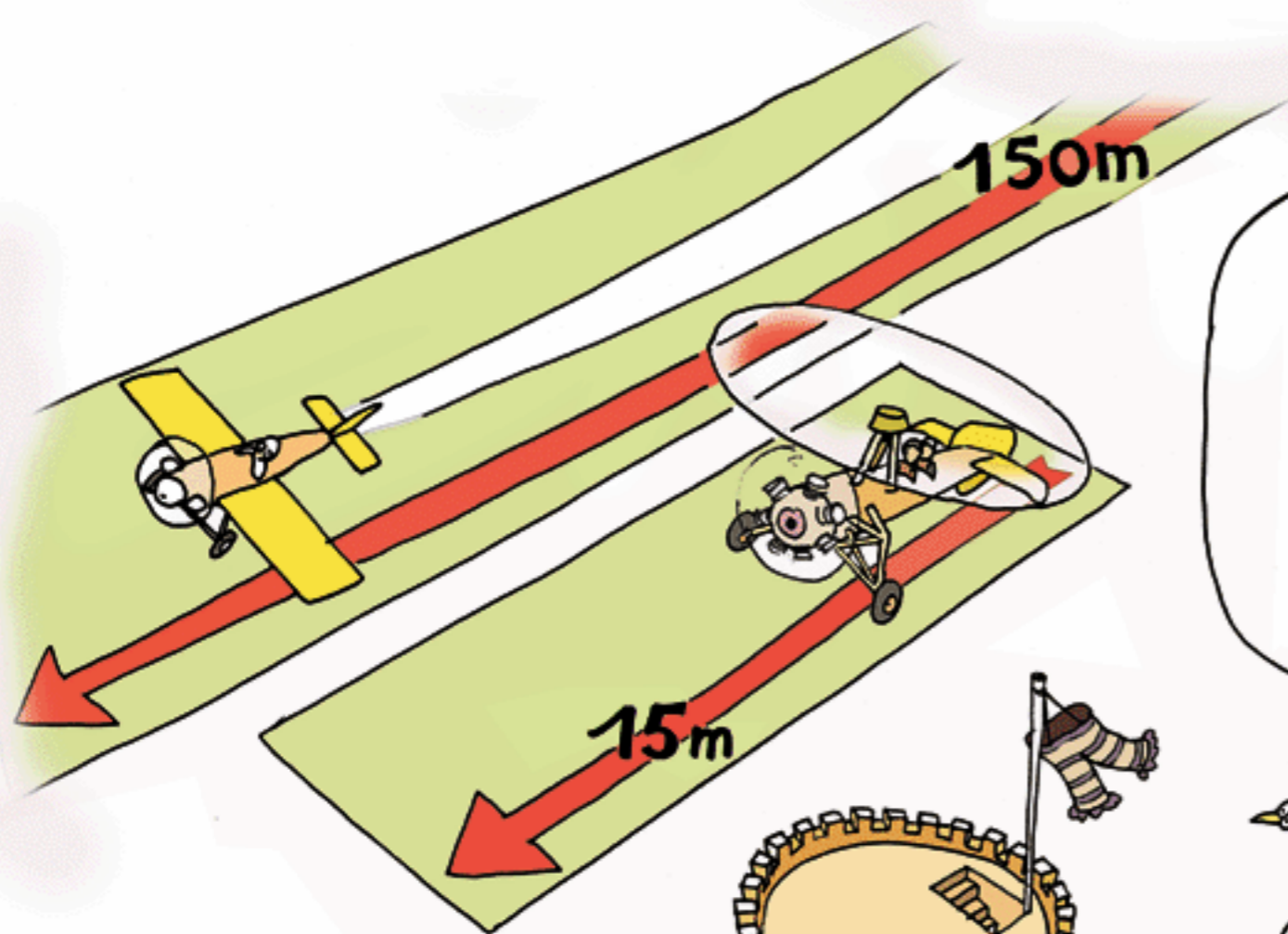
et l'autogire?

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





venez vite, il se passe des choses dans la tour

quoi! qu'est-ce qu'il y a encore!?



je crois que Cunégonde est en train de tout casser



faites attention vous marchez sur ma traîne!

mais, pourquoi portez-vous des trucs aussi longs?



mon ami, vous n'entendez rien à la mode



je VEUX épouser Candide!



il n'en est pas question !
Jamais ma fille n'épousera
un simple roturier !



mais Candide n'est pas
un roturier. Il est le fils
d'une de vos parentes !

.. et de quatre-vingts chasseurs...
du moins de l'un d'entre eux

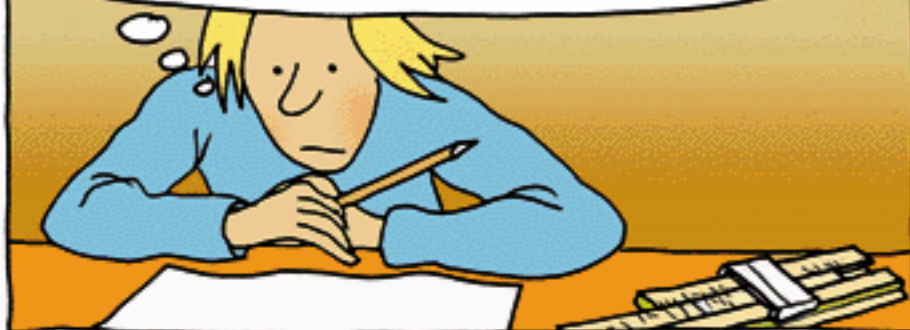


mais, père, ces quatre-vingts chasseurs
étaient tous de bonne naissance

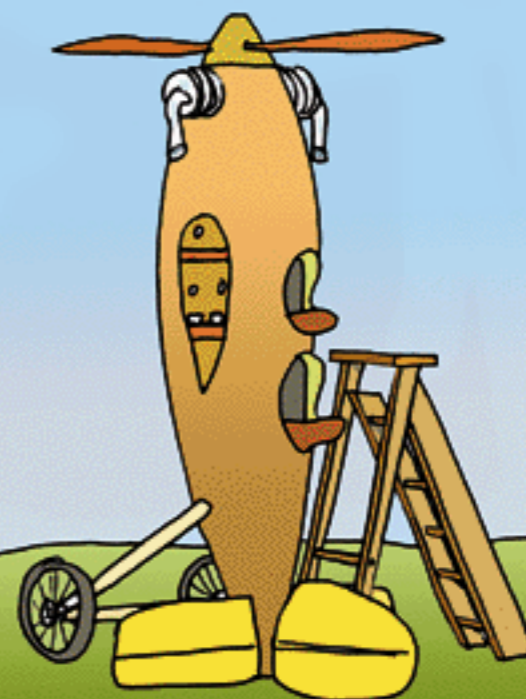
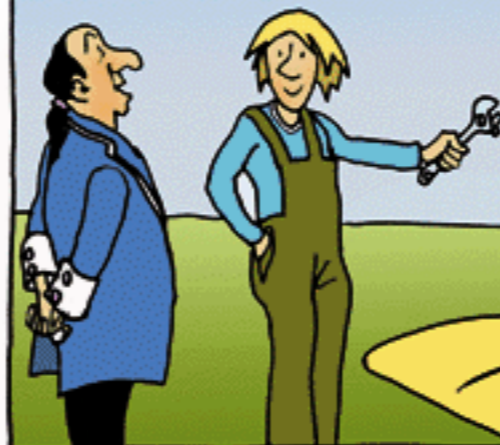


Hmm... pour la
diplomatie, on repassera
une autre fois...

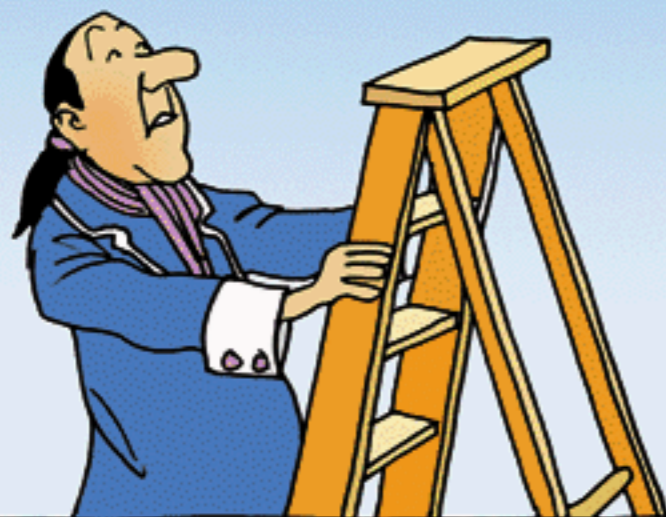
Enfin, le pilote d'avion n'avait pas tort en voulant cabrer son appareil. Le mieux serait de transformer son hélice tractive en dispositif de sustentation. Et alors, tant qu'à faire, autant enlever carrément les ailes



alors, professeur, que dites-vous de cela ?



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



WROOAR

RIEN !?!



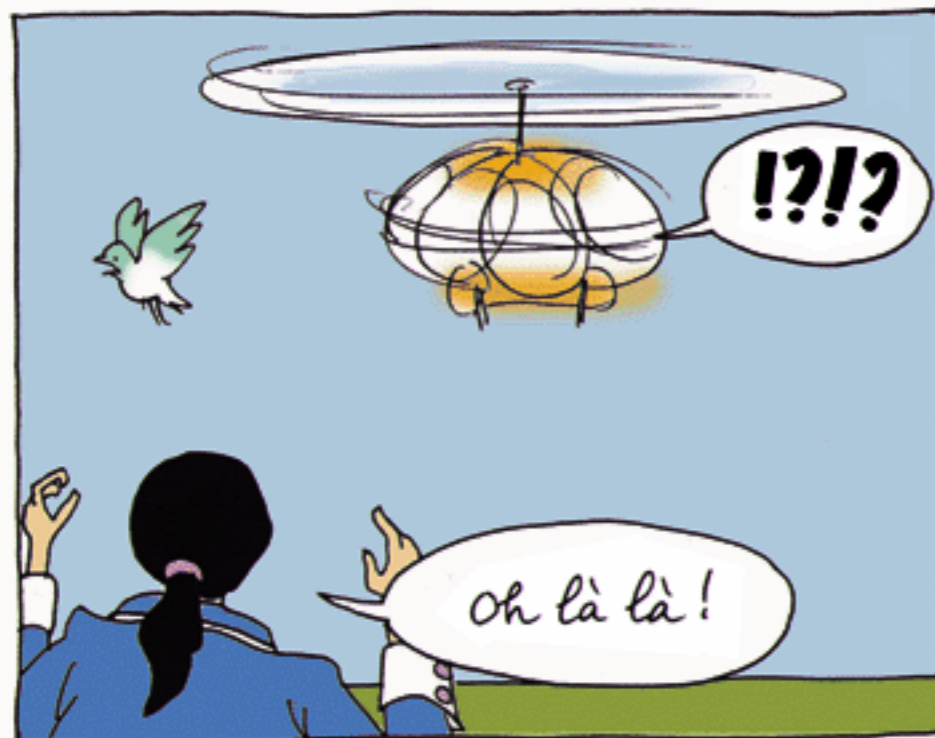
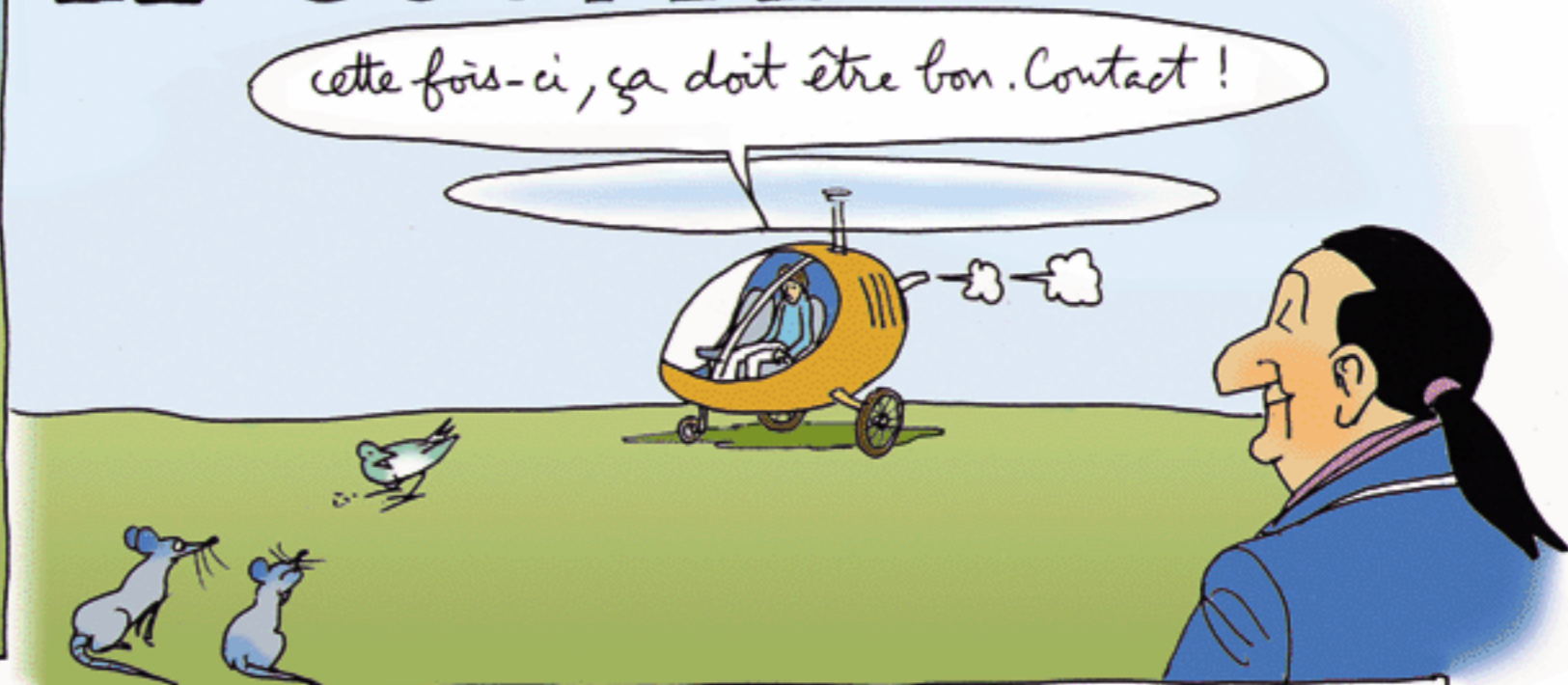
ne vous cassez pas la figure
je vous ramène l'échelle



mon "pingouin" à moi a peut être des "ailes" trop courtes. Je ne peux pas augmenter le régime de mon moteur indéfiniment, pour accroître la vitesse des pales de mon hélice. Or la portance croît comme le carré de la vitesse. Solution: augmenter la surface portante, tout en conservant l'allongement: un albatros vole mieux qu'un pigeon. Je vais donc allonger les pales de mon hélice. J'appellerai cela un **ROTOR**



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 solidaire du fuselage tournant



feuille de bristol dérivée montée "folle"
 corde à piano, acier 5/10°

billes rondelles

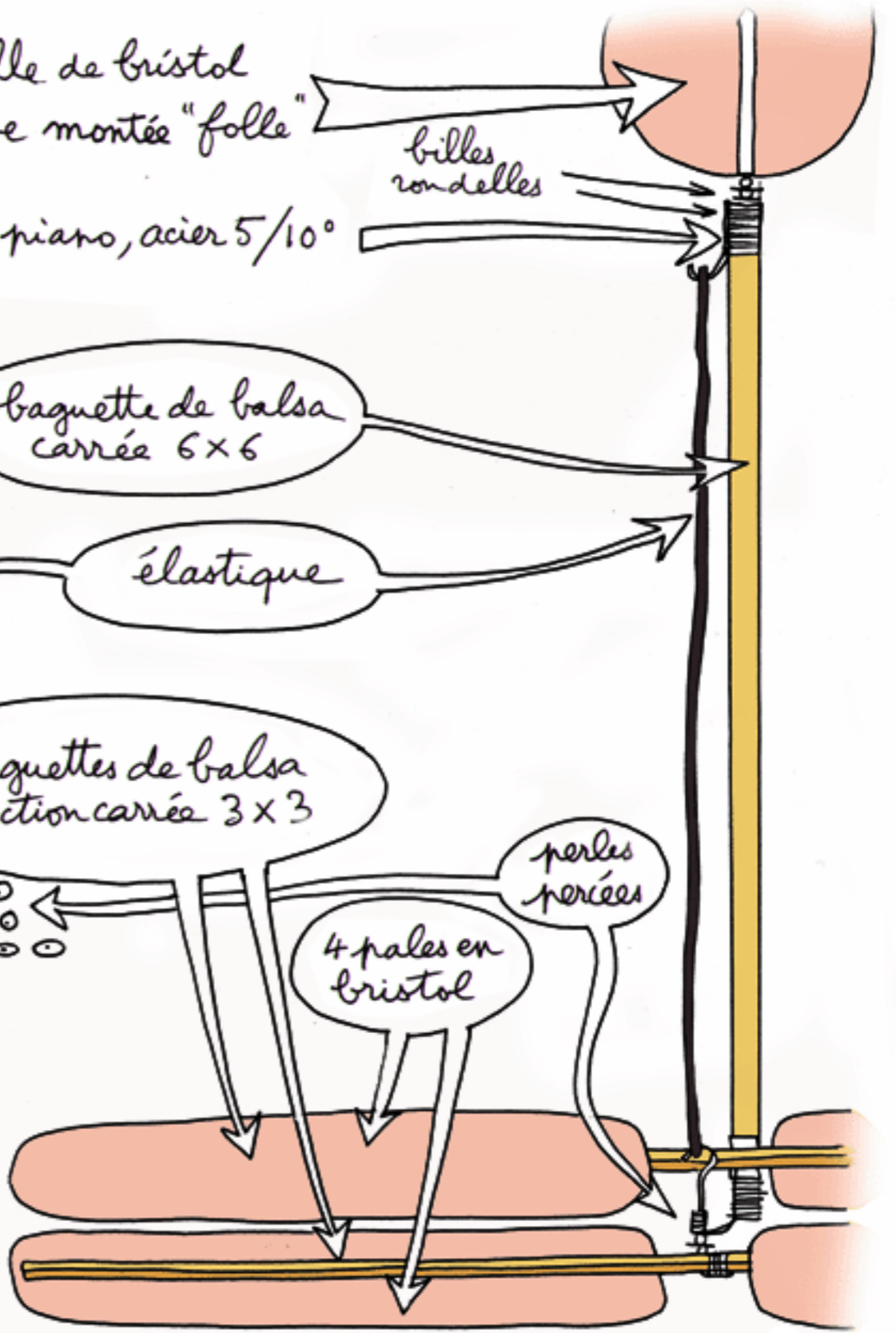
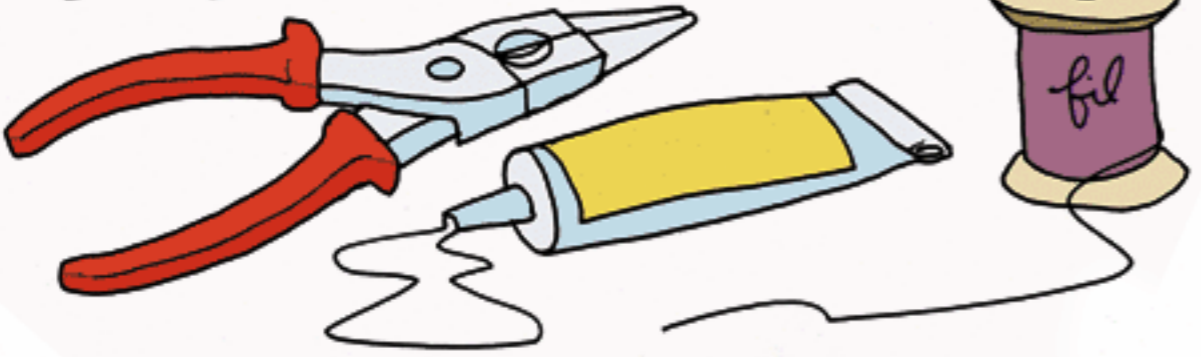
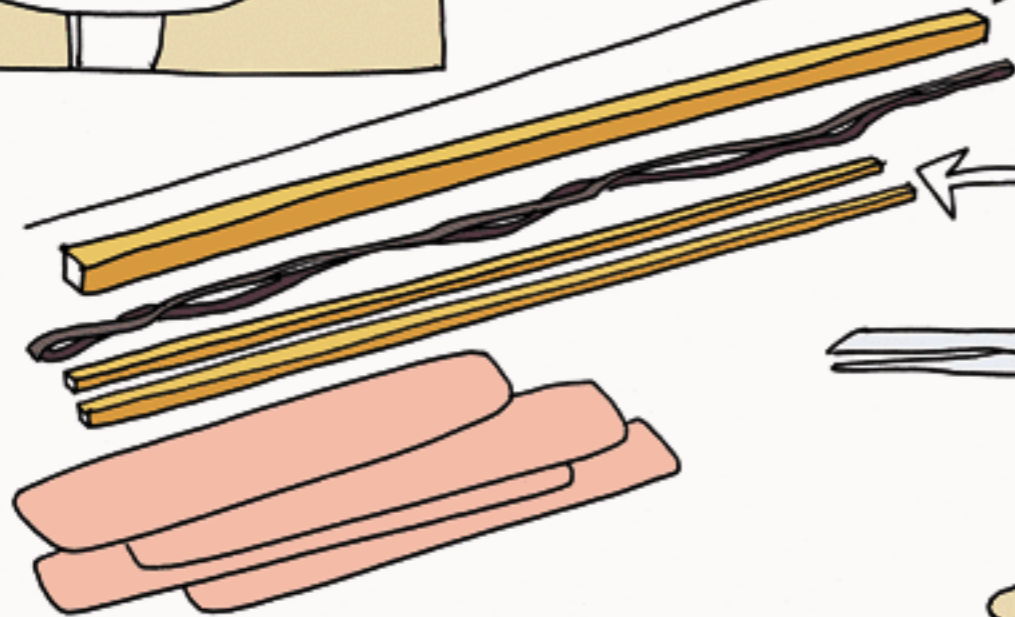
baguette de balsa carrée 6x6

élastique

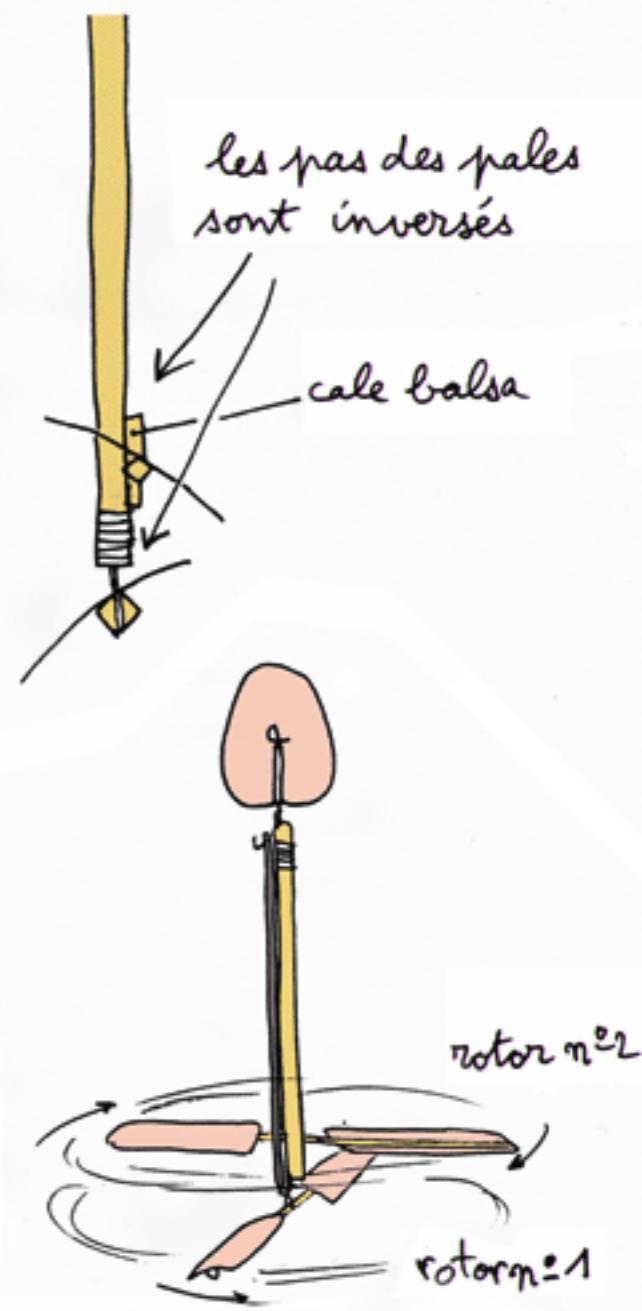
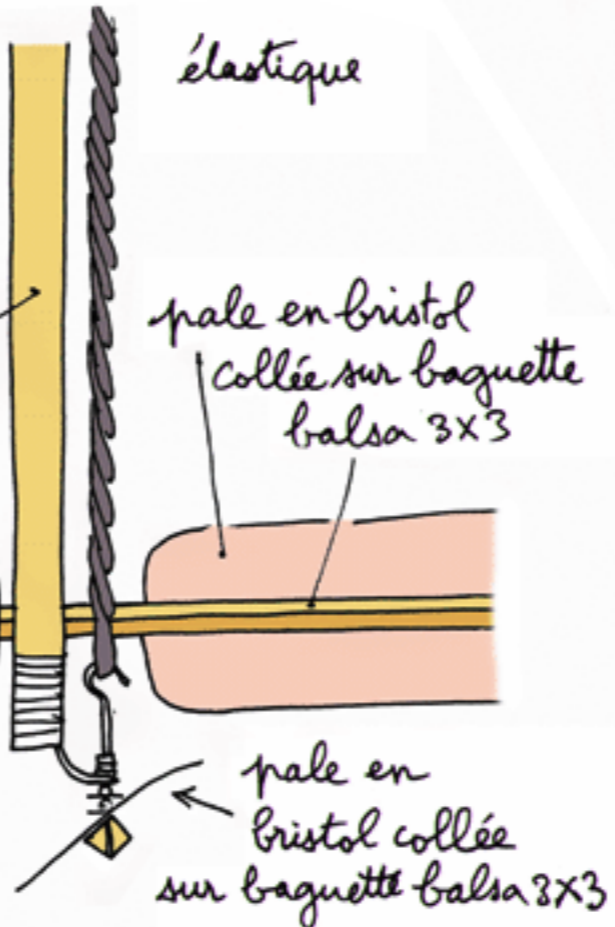
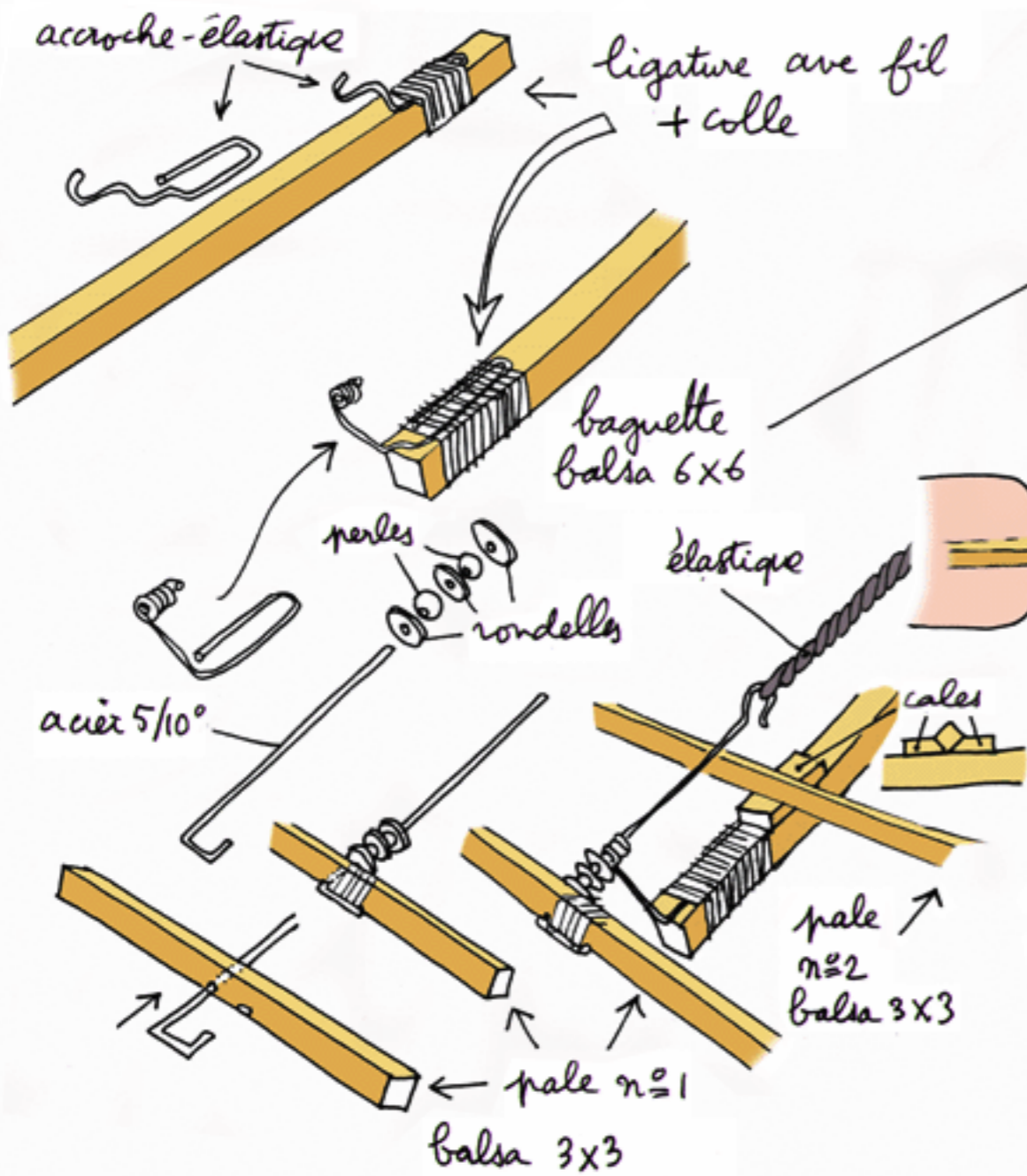
2 baguettes de balsa de section carrée 3x3

perles perçées

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 :

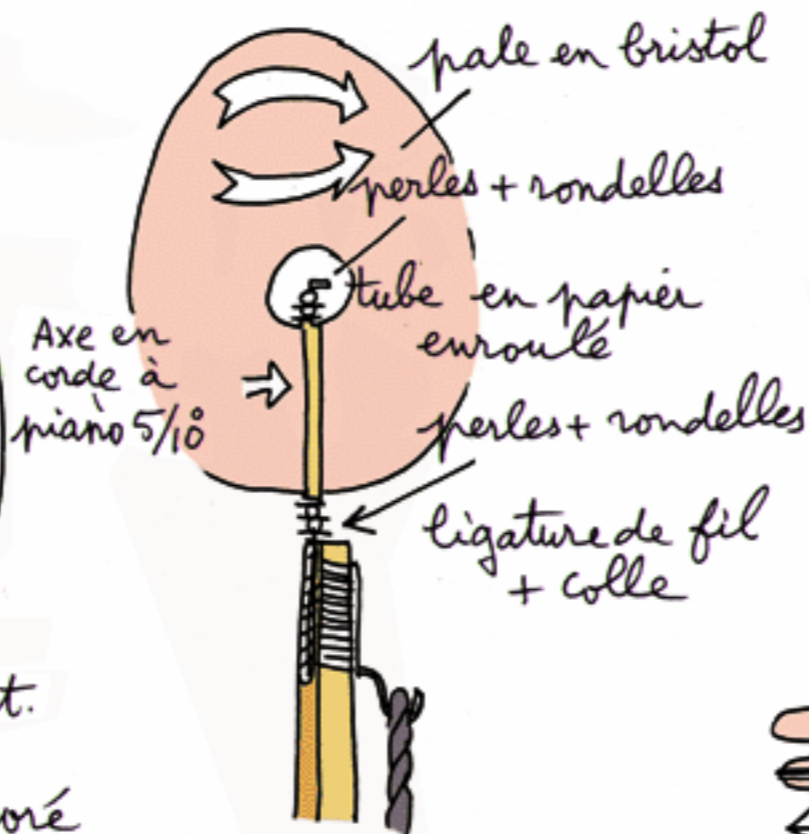


l'élastique met en mouvement le rotor inférieur, le n°1. Du fait du Couple, le rotor n°2, solidaire de la baguette-fuselage, se met à tourner en sens inverse

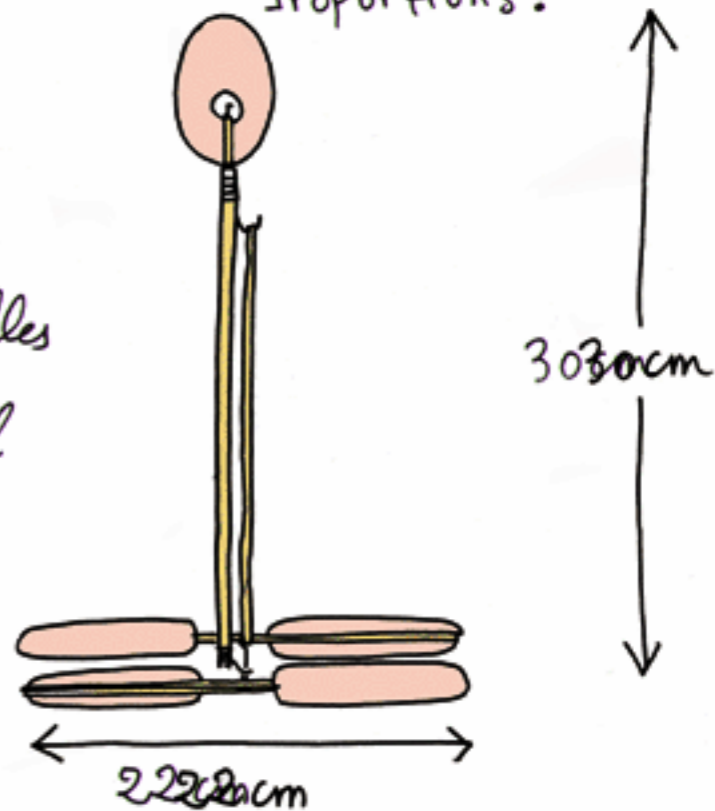
Montage de la pale supérieure, qui rend l'engin autostable



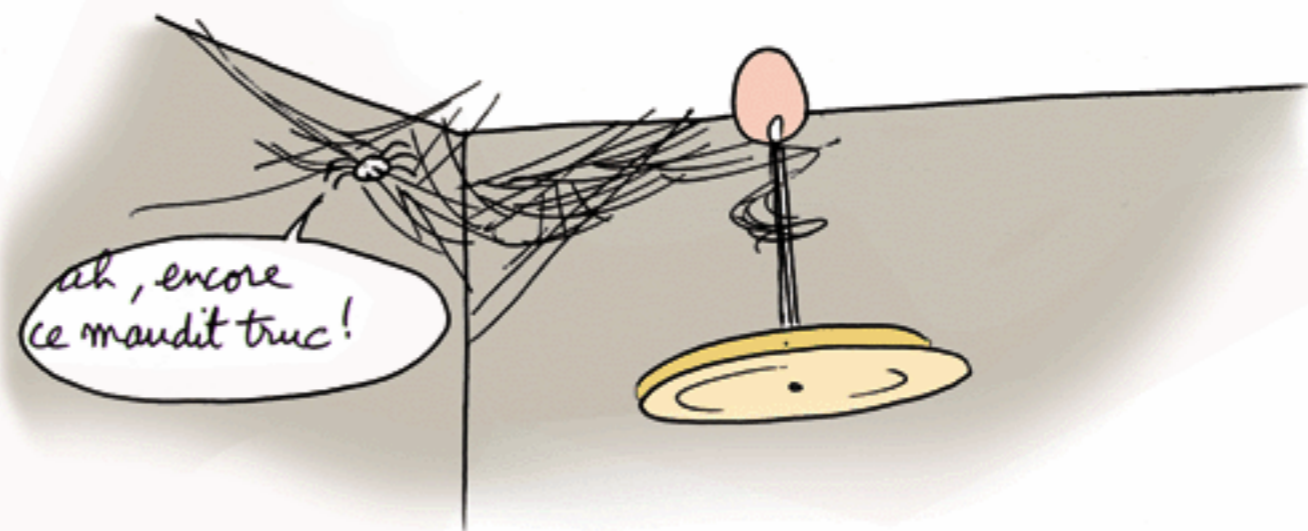
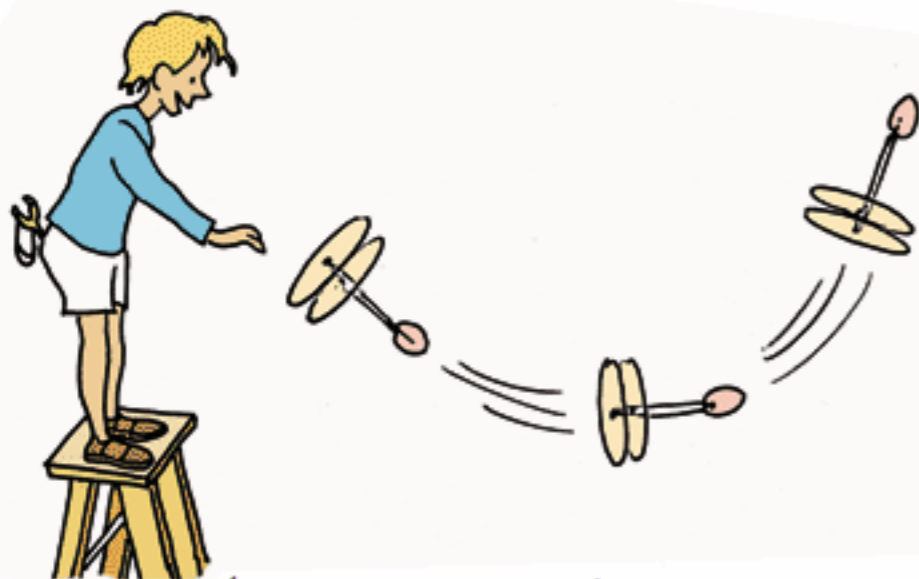
enrouler un ruban de papier sur une grosse épingle en ajoutant un peu de colle, pour fabriquer un tube de faible diamètre



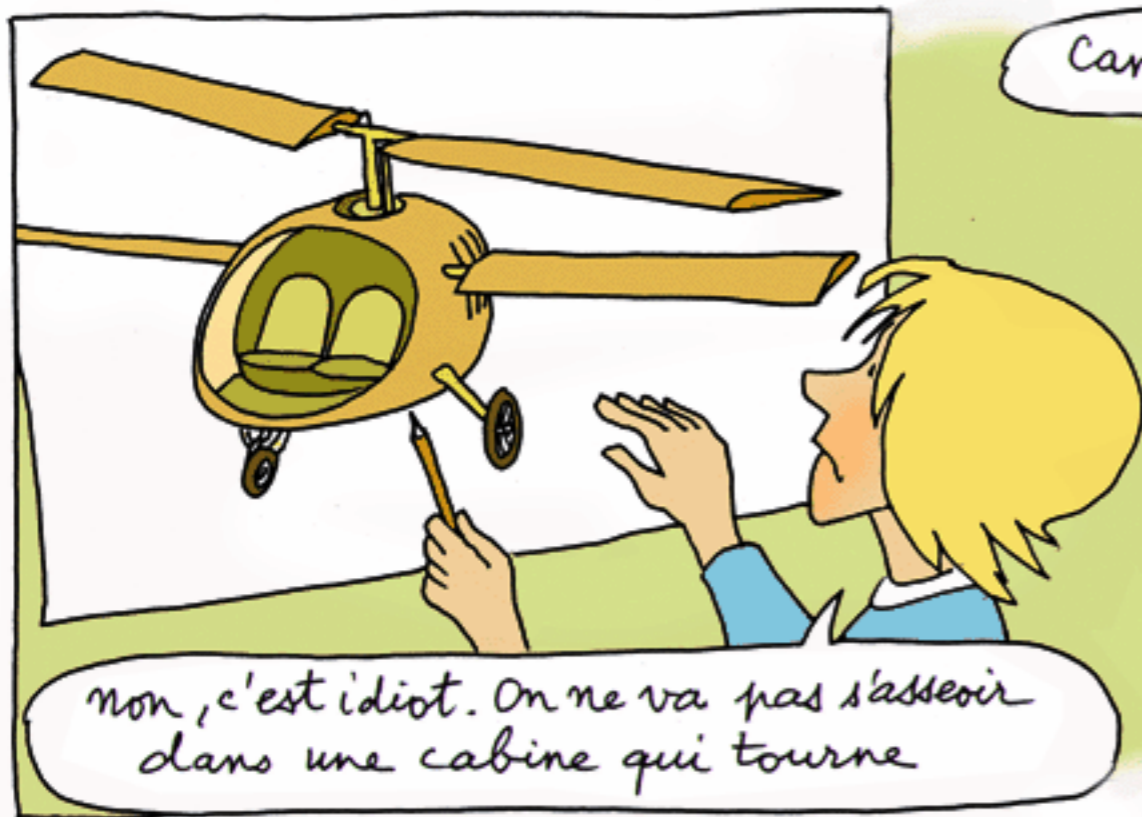
Proportions:



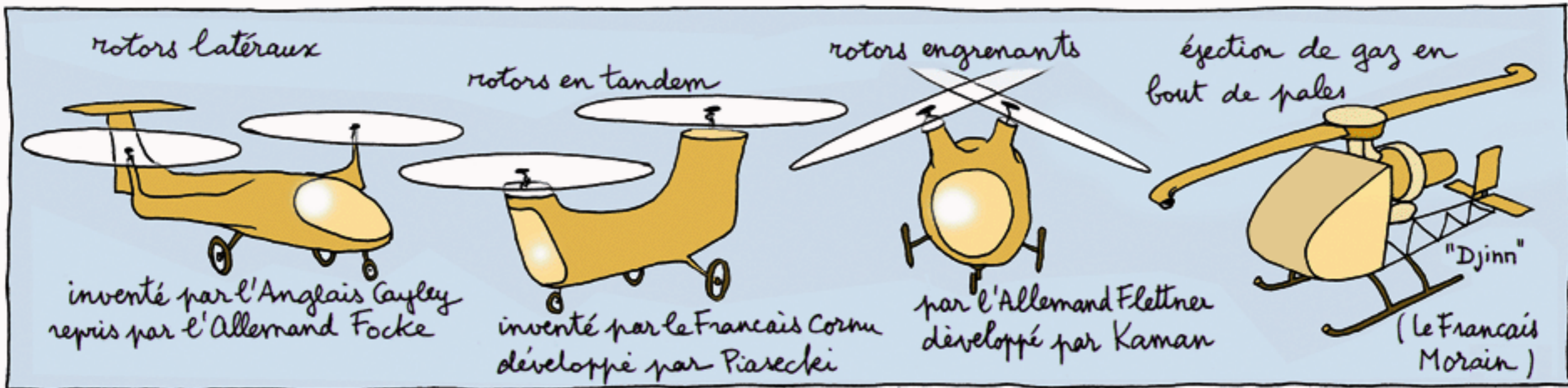
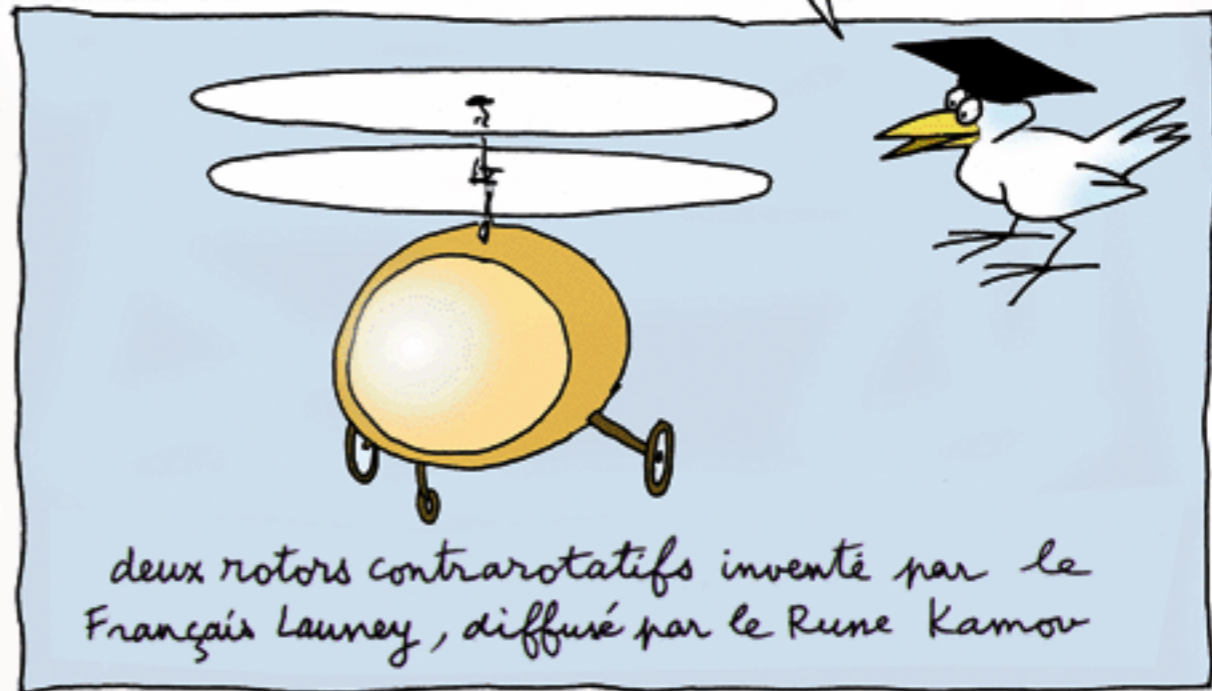
quand l'hélicoptère s'incline, il part sur le côté. L'effort sur la pale supérieure le redresse aussitôt. Lié à lui-même, il monte en se dandinant (*)



(*) 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

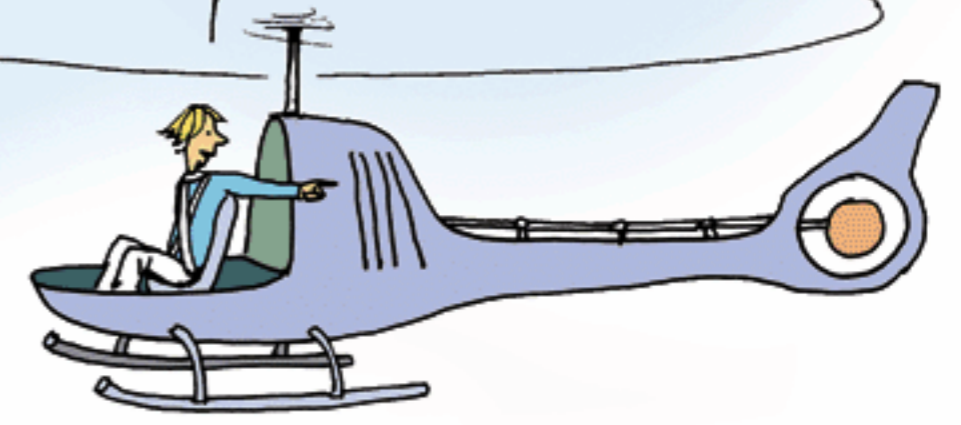


Yves le Bec a écrit, en l'illustrant d'excellents dessins, un ouvrage intitulé "La véritable histoire de l'hélicoptère, de 1486 à 2005, publié aux éditions Ducret SA, CH-1022 Chavannes-près-Renens ISBN 2-8399-0100-5. Vous y trouverez tous les modèles d'hélicoptères imaginés par les hommes

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



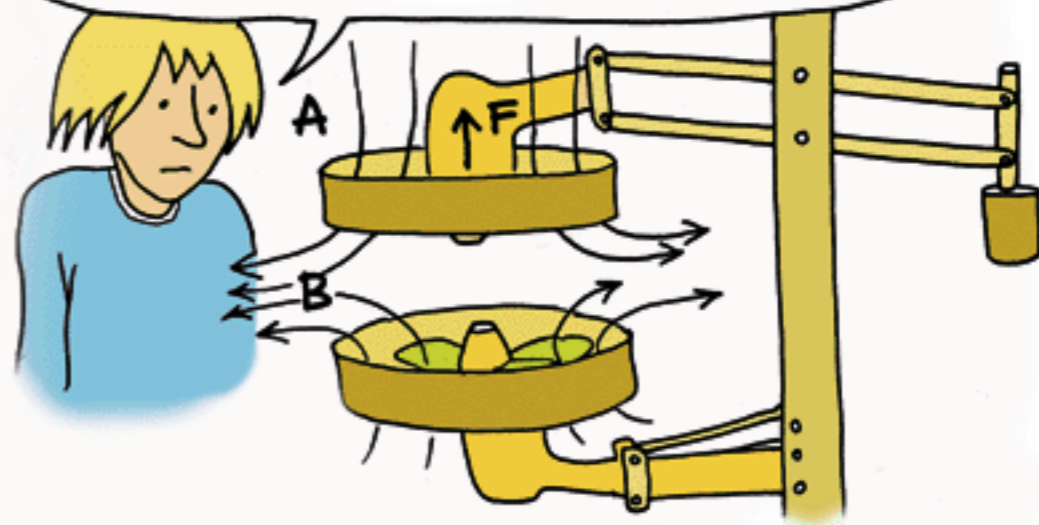
Ceci montre bien que tout est pour le mieux dans la meilleure des aéronautiques possibles

EFFET DE SOL

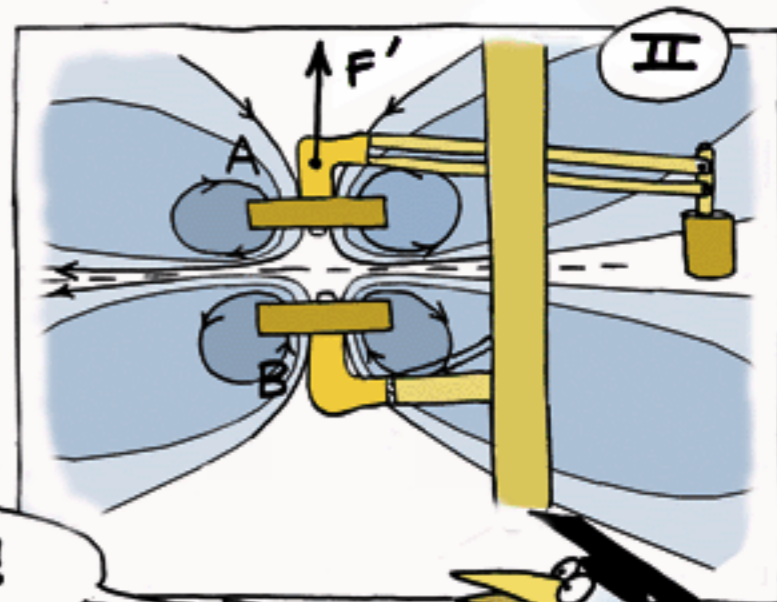
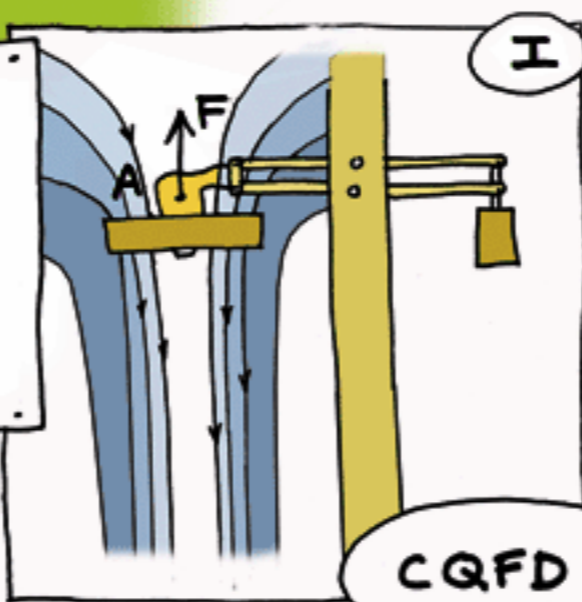
c'est curieux. Près du sol j'arrive à me maintenir avec une puissance sensiblement plus faible (*)



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 trainée 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?

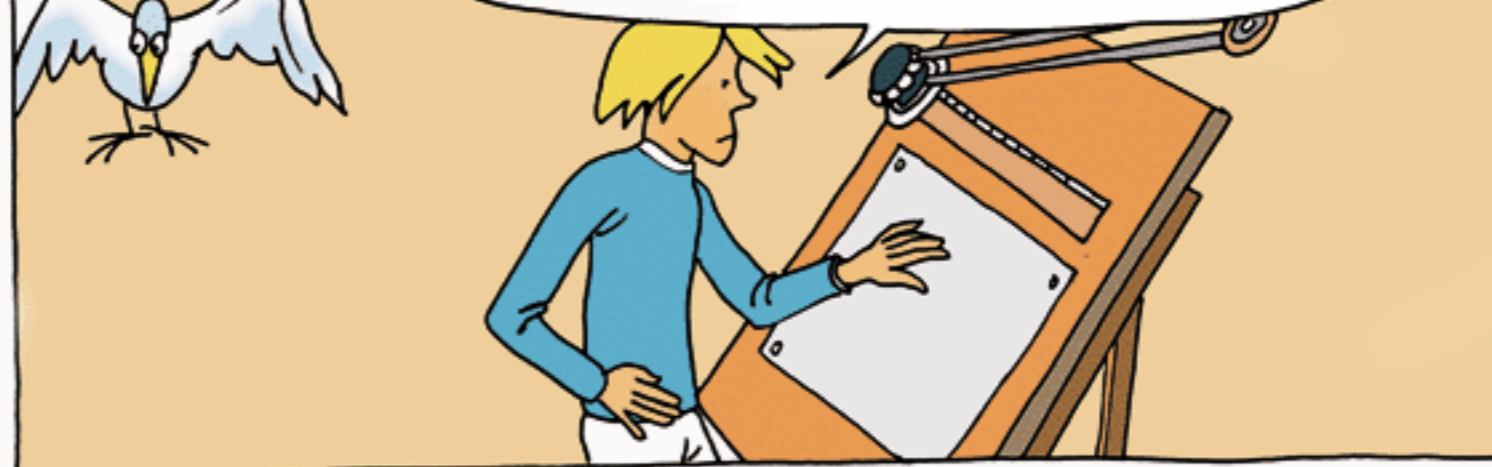


Ça ne te concerne pas. Tu n'as pas une voilure tournante, que je sache?

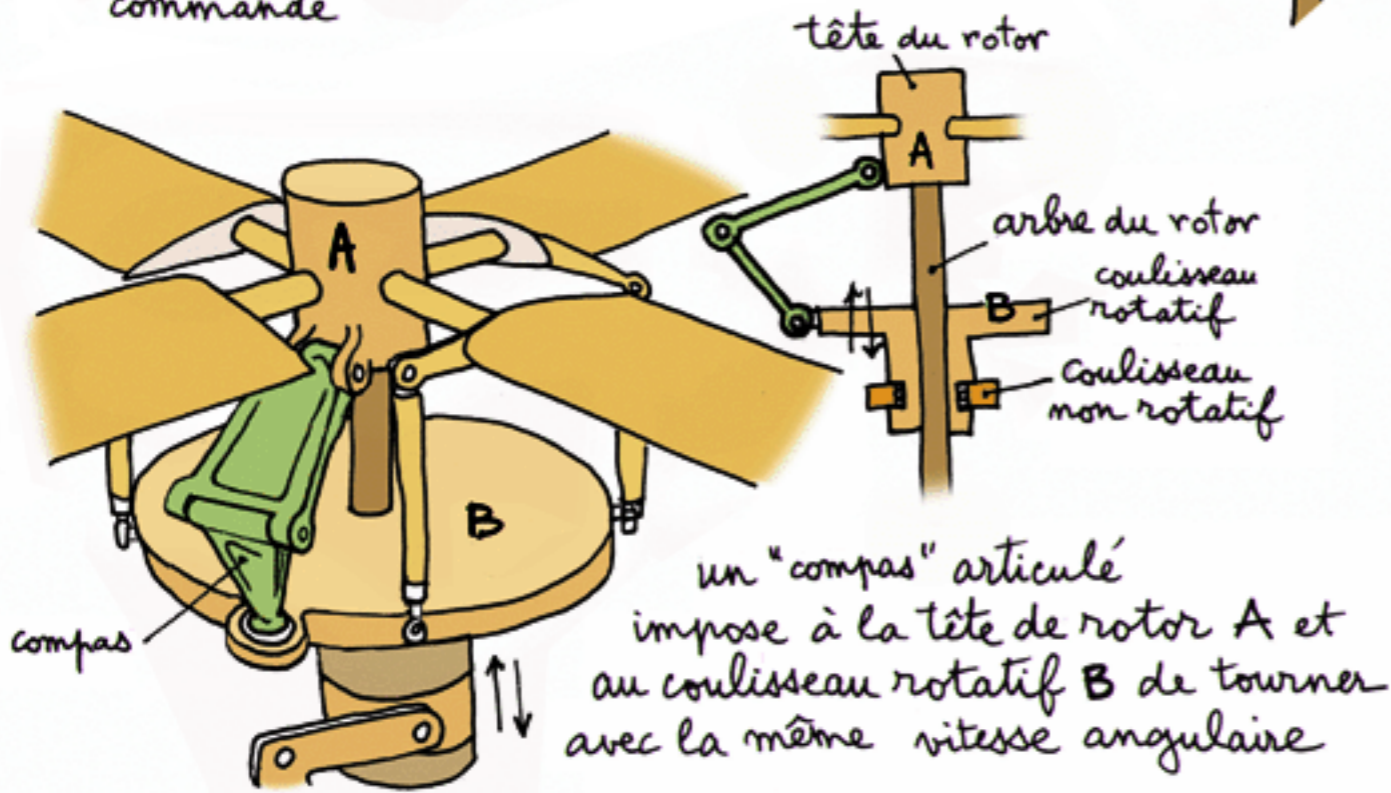
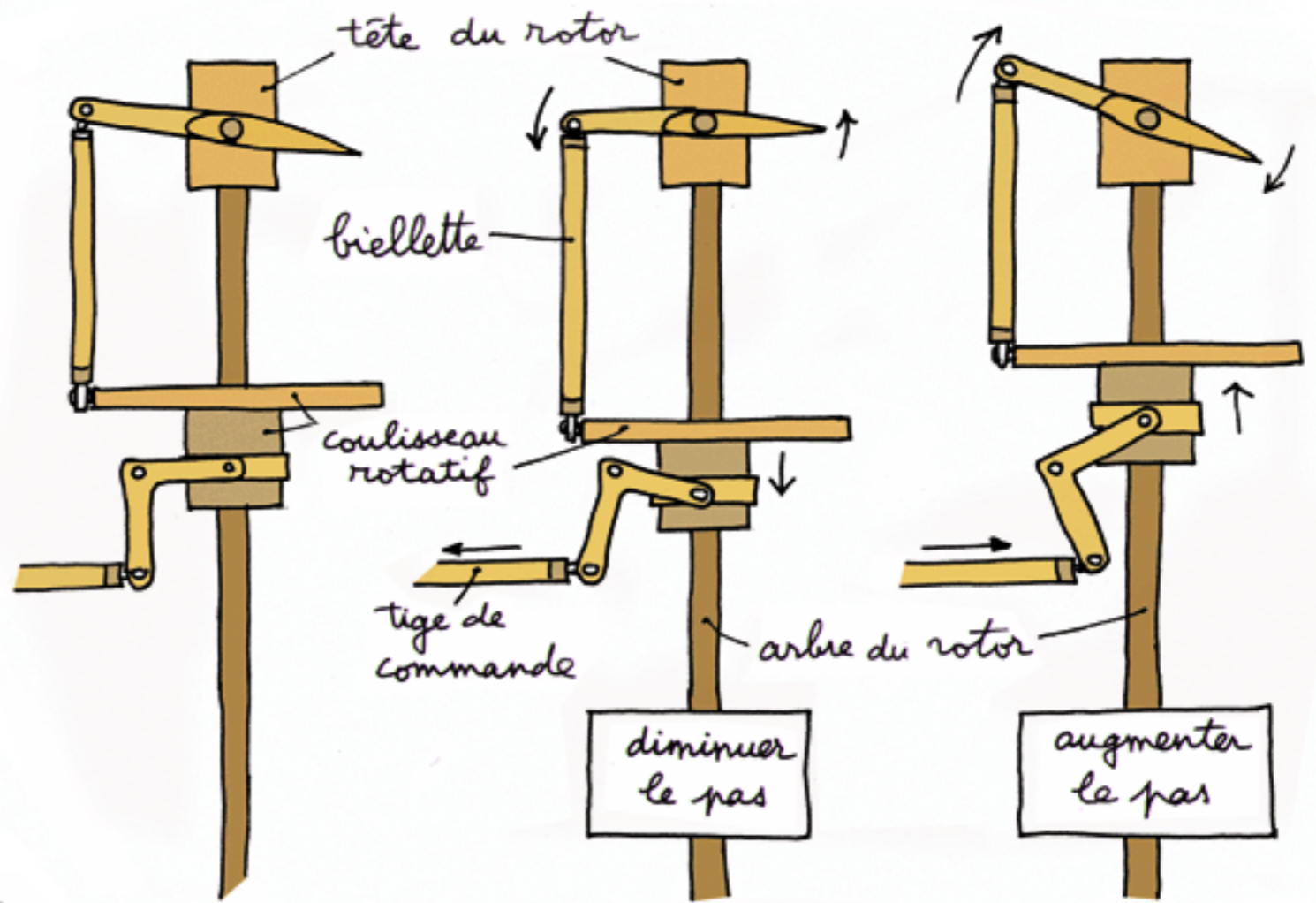
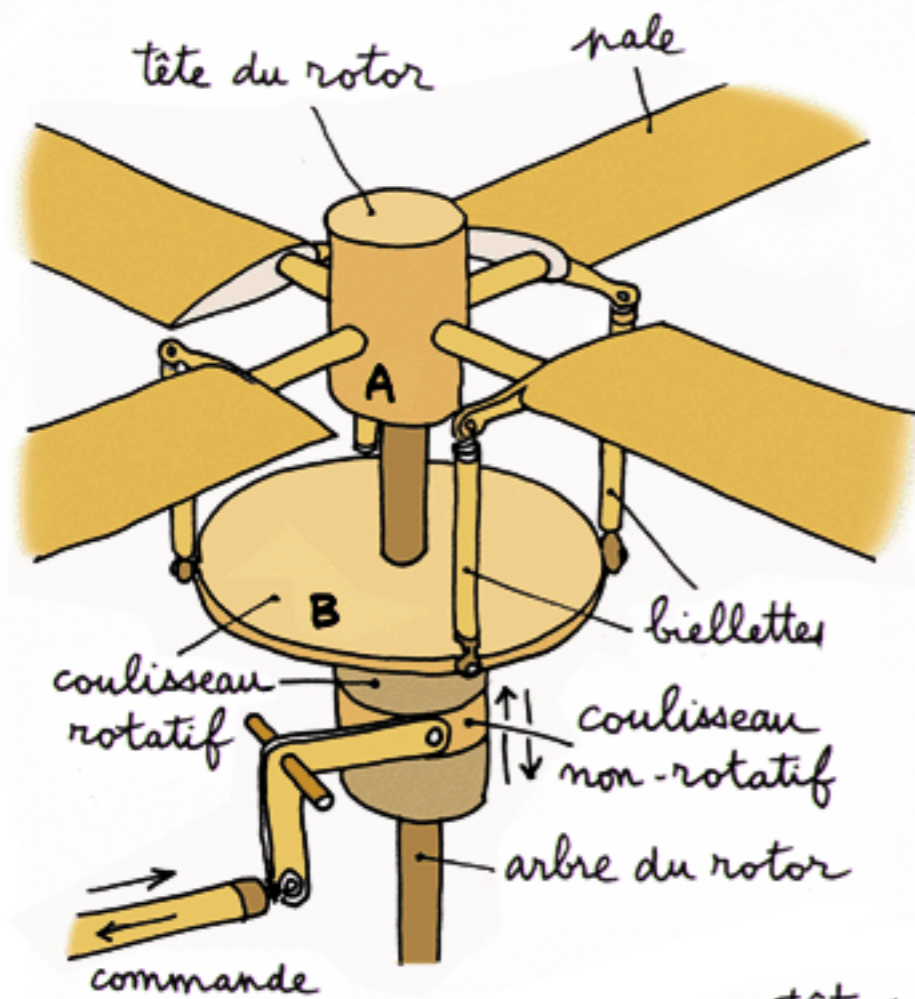
Euh, je ne crois pas...



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

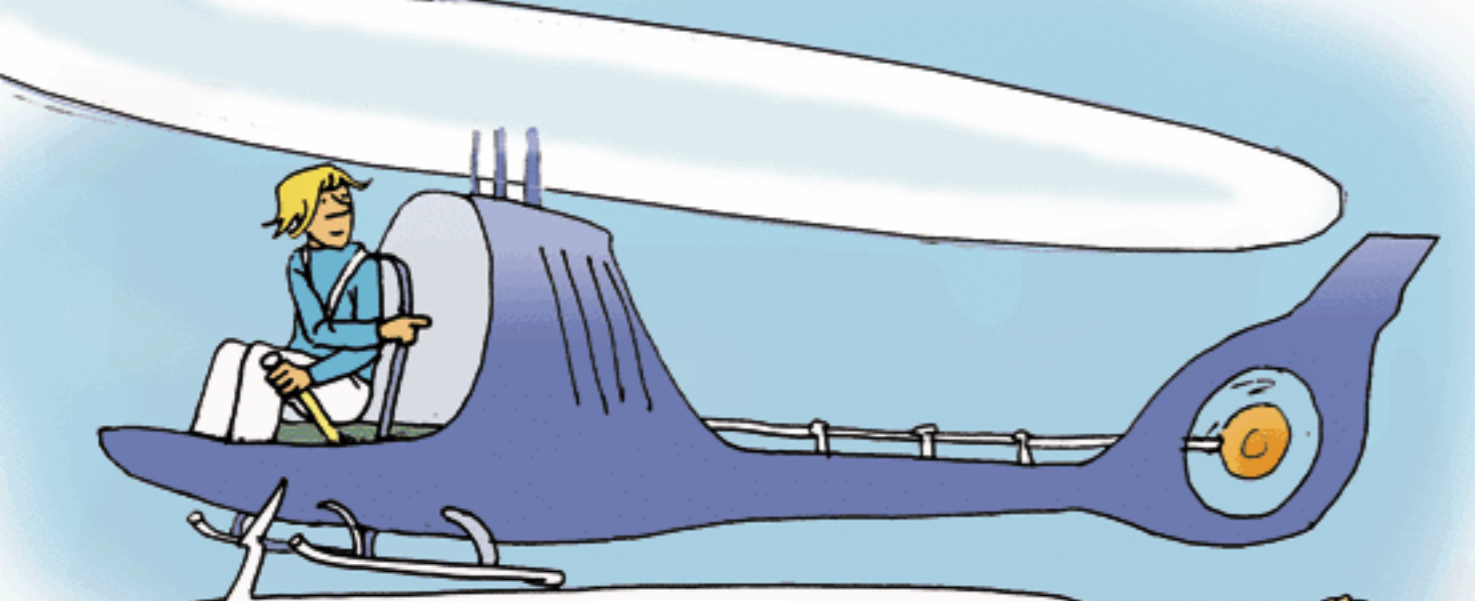
La Direction

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

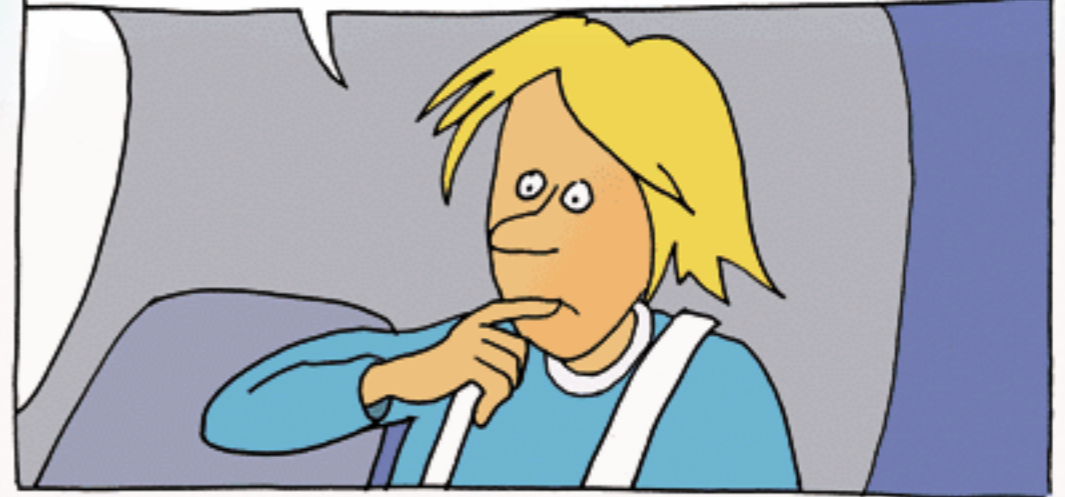


J'ai adapté le même système sur le rotor de queue, anticouple, pour éviter de faire des embardées quand je modifie le pas général. Et j'ai adjoind une commande aux pieds, par palonnier, qui me permet de tourner sur place



quoi? j'entends rien...

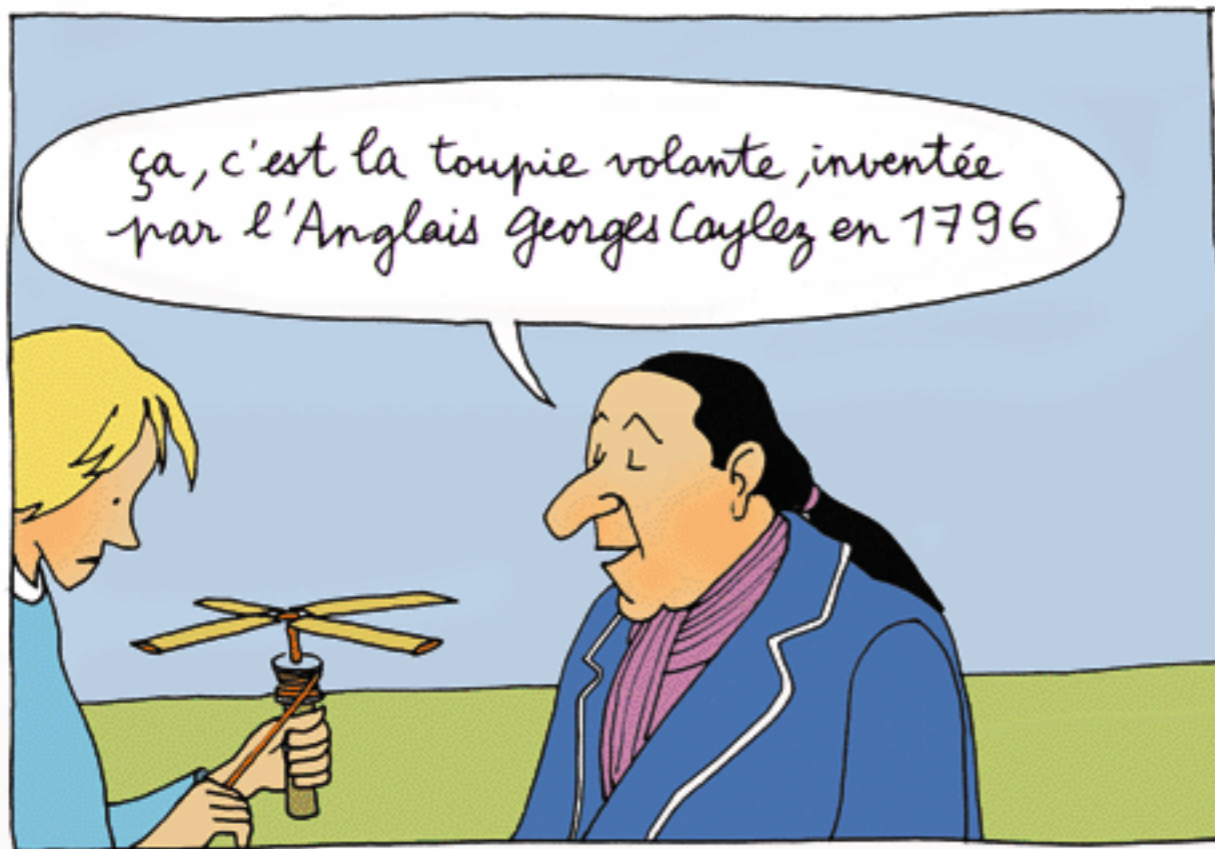
Bien. J'ai conçu cette machine volante capable de nous emporter, Cunégonde et moi. Je peux monter, descendre, tourner sur moi-même à volonté. Reste une question = comment avancer?



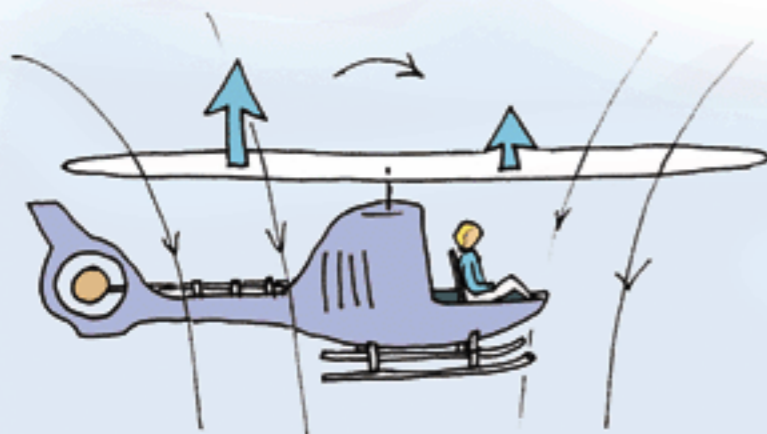
Pourquoi ne pas ajouter une hélice, des gouvernes?

tout cela me paraît bien compliqué

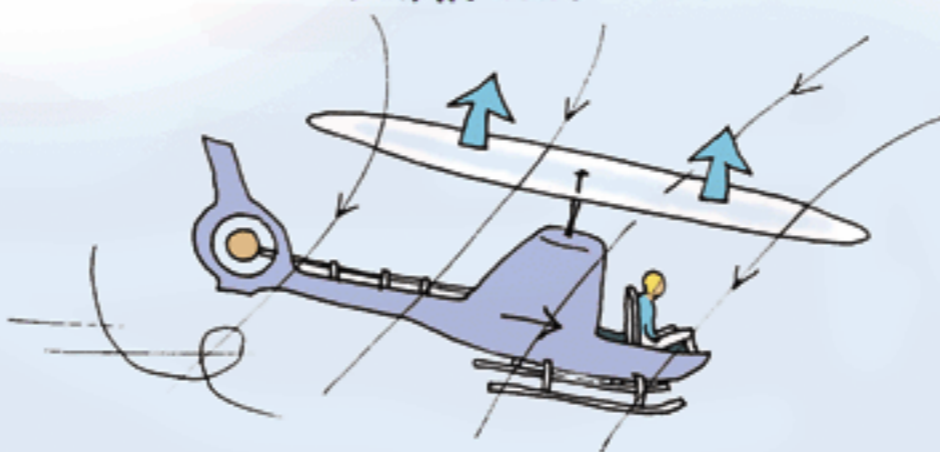




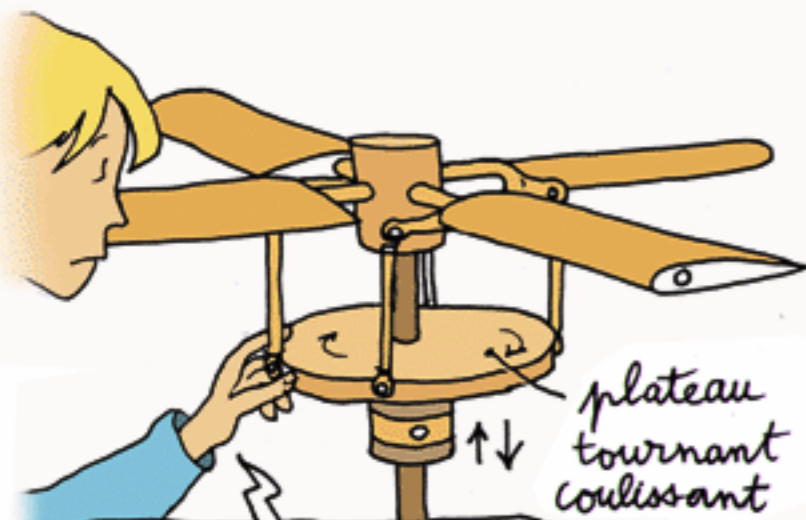
STATIONNAIRE



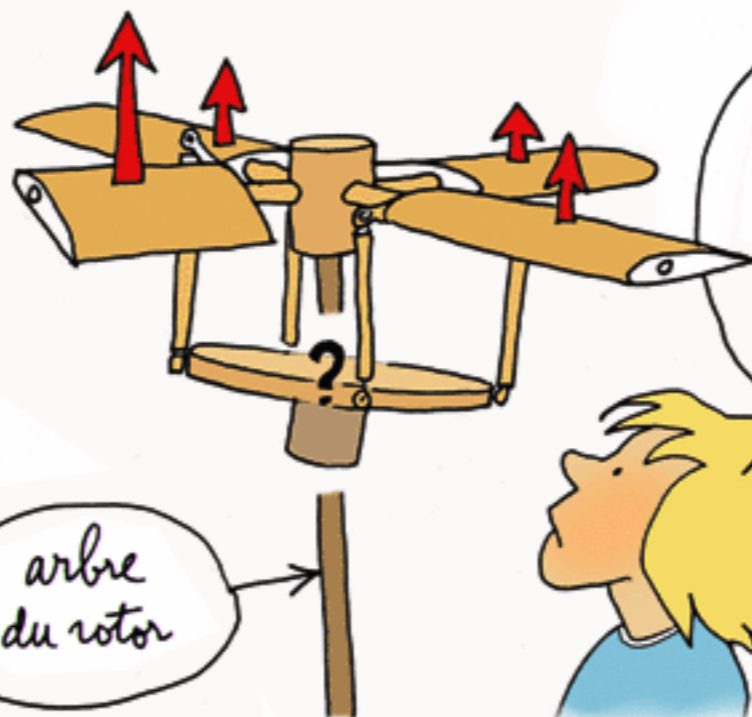
TRANSLATION



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**



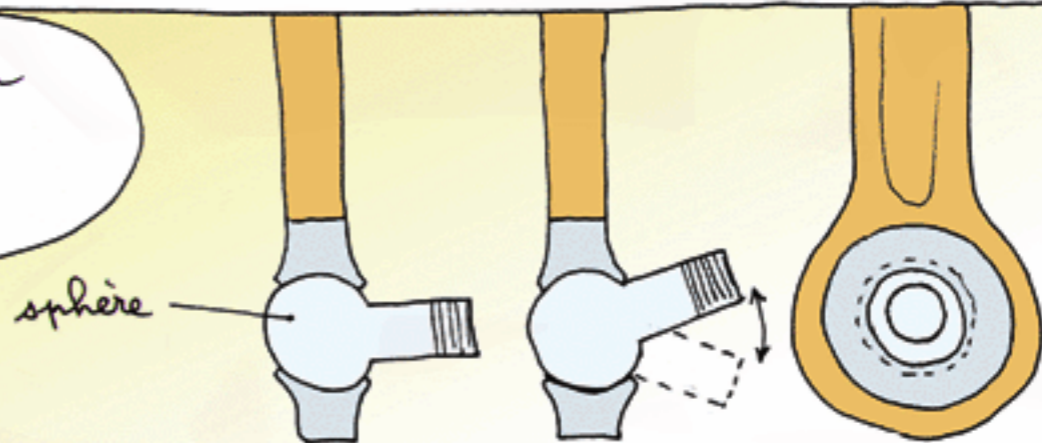
le pas de mes pales est donné par la position d'un plateau rotatif coulissant sur l'arbre du rotor



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

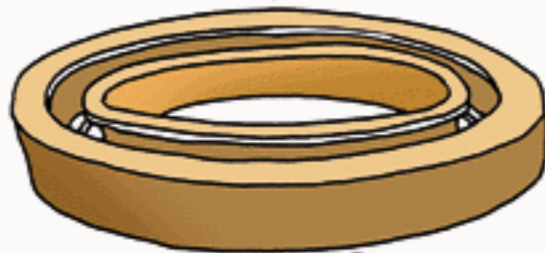


L'un des éléments se termine par une rotule sphérique qui est maintenue dans un logement par sertissage, ce qui autorise un certain débattement

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.

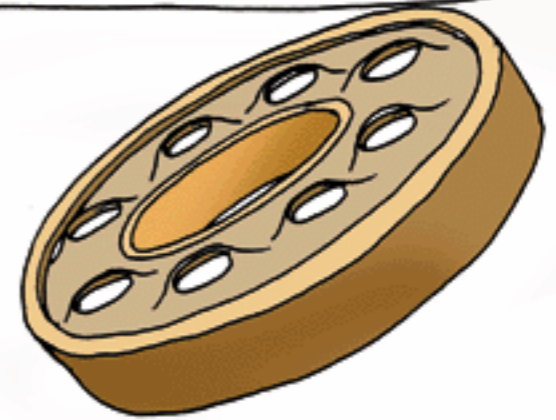
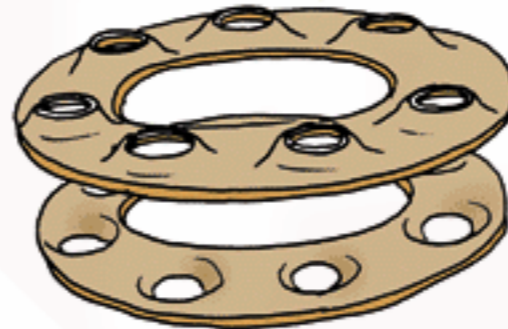


un élément important est le roulement à billes



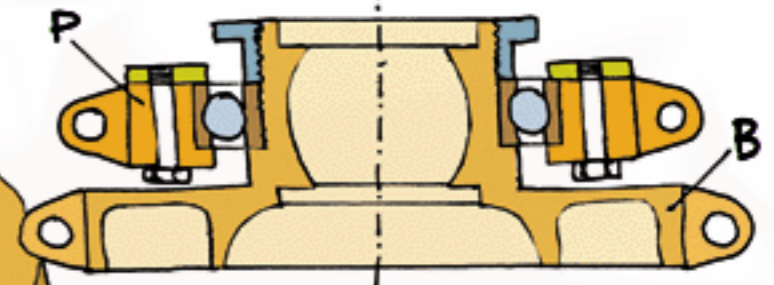
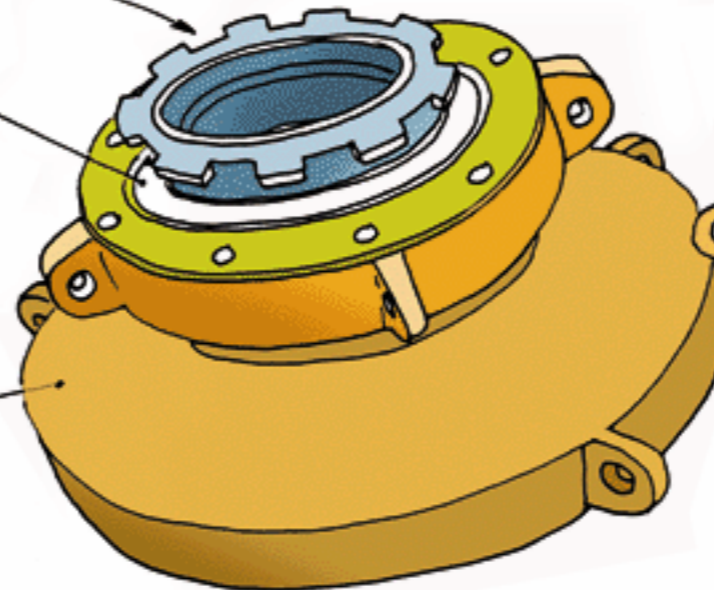
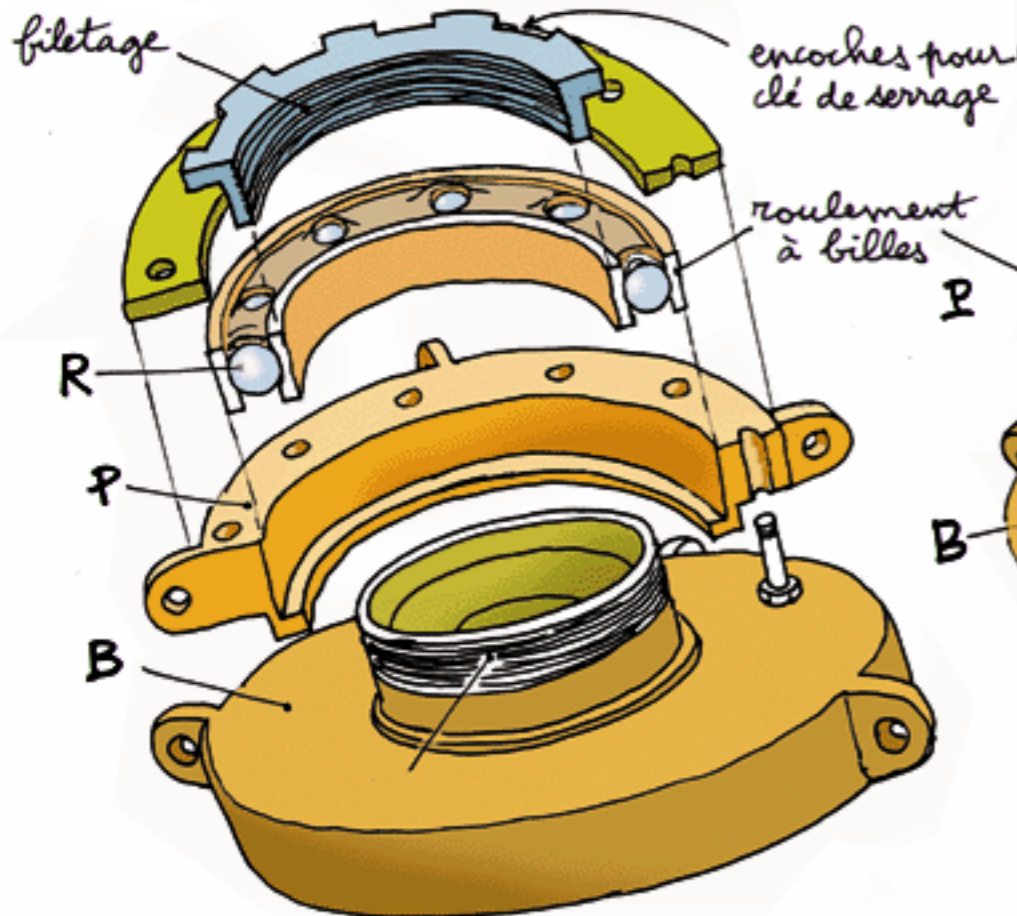
mais, comment fait-on rentrer ces fichues billes?

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

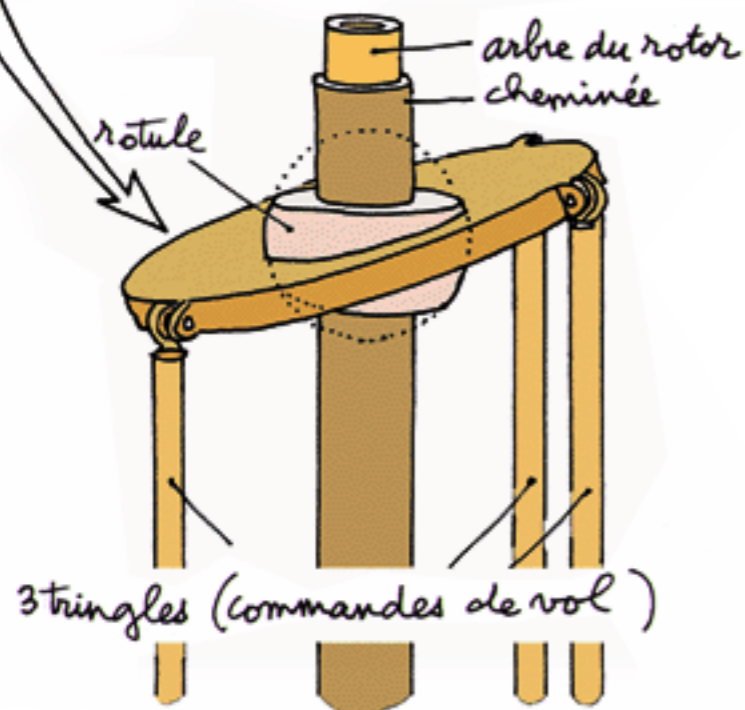


pour faire tourner droit un truc qui est de travers, la solution, c'est la ROTULE

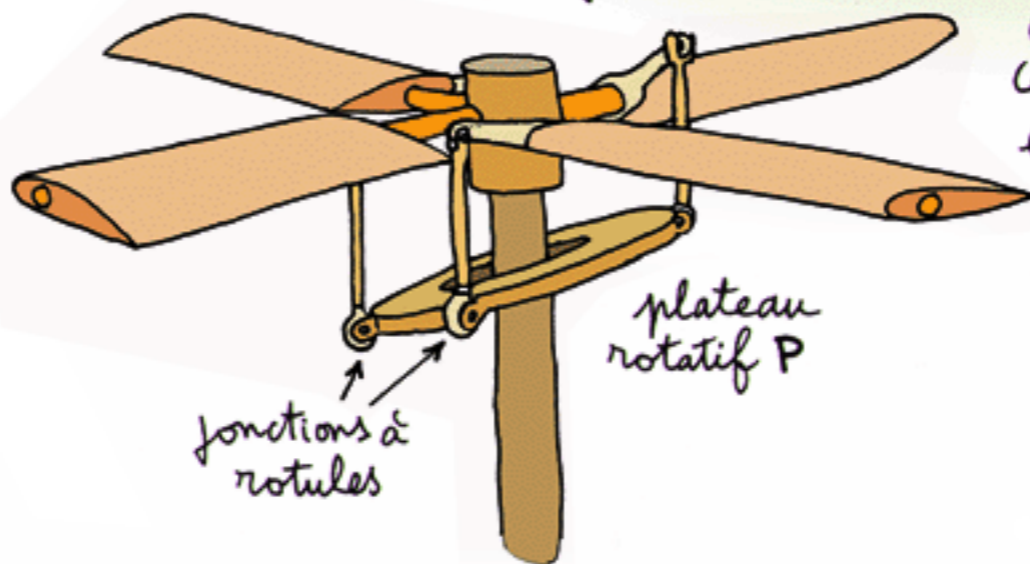


une rotule qui coulissera sur une CHEMINÉE à l'intérieur de laquelle tournera l'ARBRE DU ROTOR

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



le plateau non-rotatif B sera solidaire d'un plateau rotatif P par l'intermédiaire d'un roulement à billes (voir page précédente)



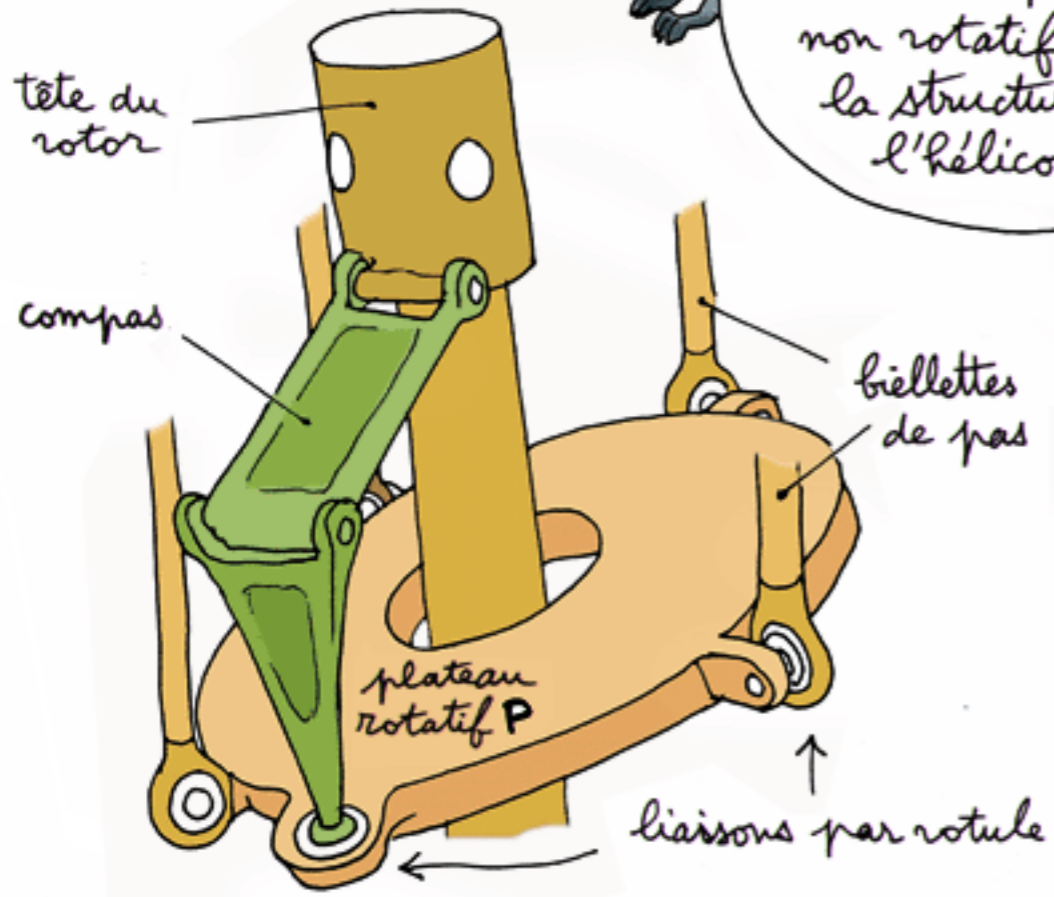
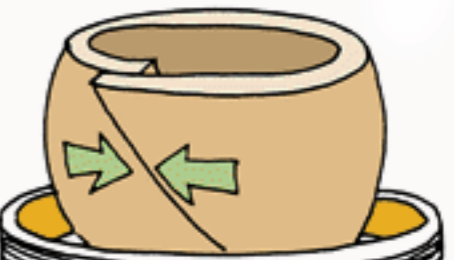
le plateau rotatif commandera l'inclinaison des pales par l'intermédiaire de biellettes de pas

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** ?

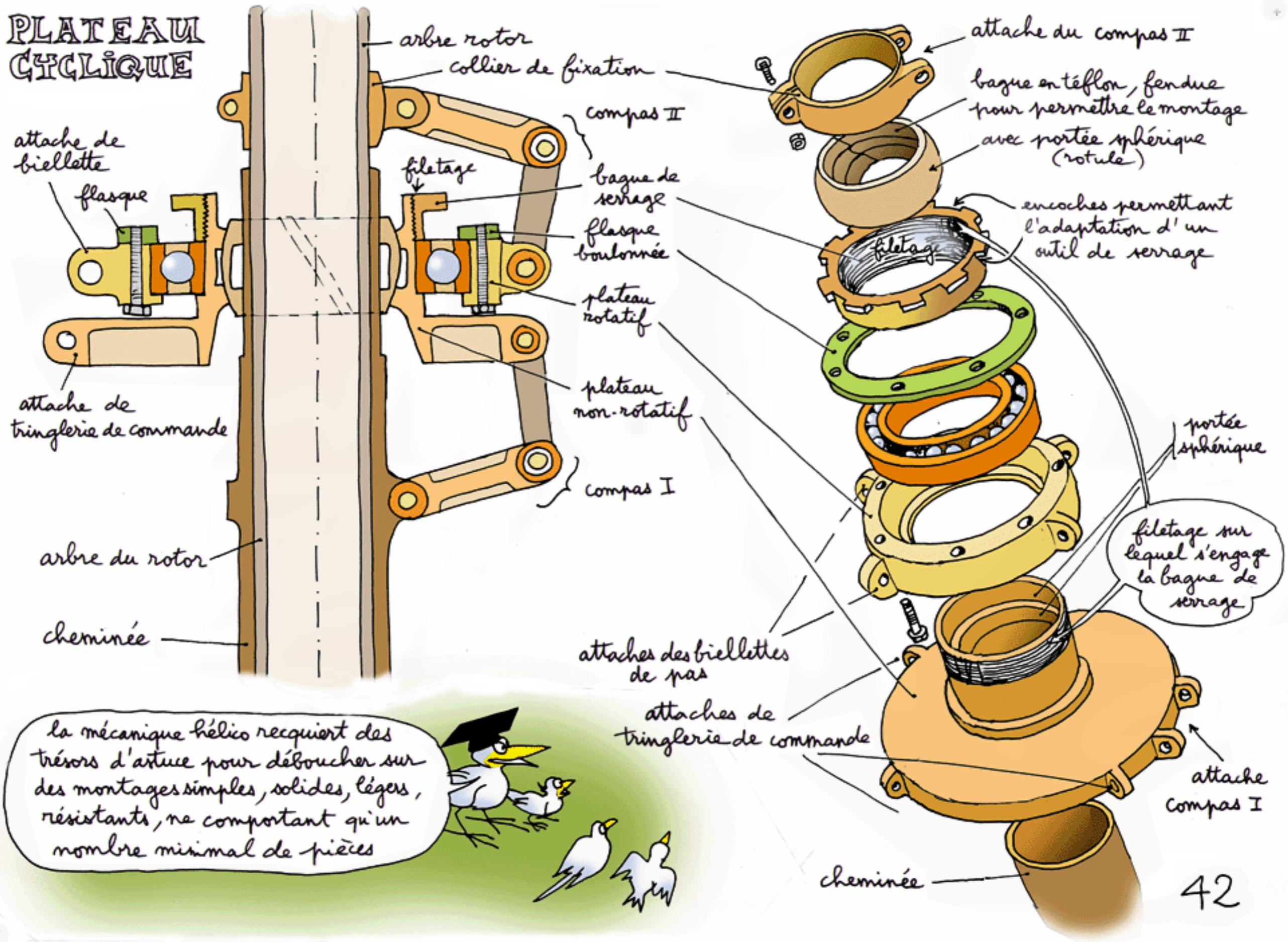
non, un ciseau s'en chargera. Et on mettra le même dispositif entre le plateau non rotatif **B** et la structure de l'hélicoptère

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

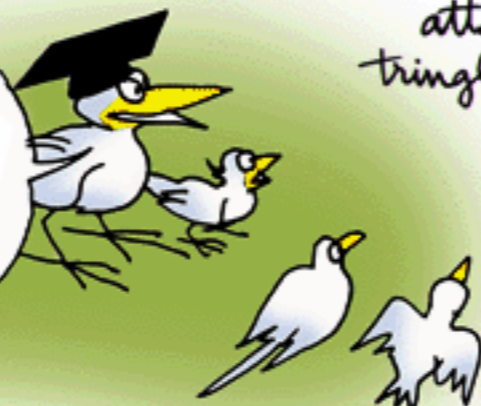


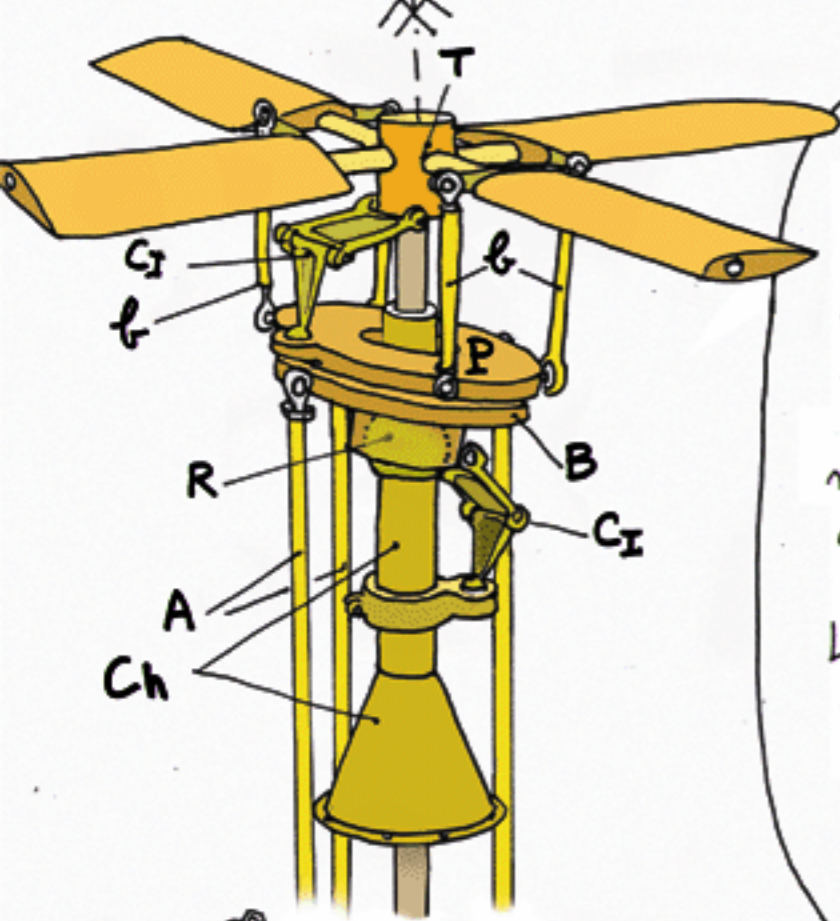
SYNTHÈSE PAGE SUIVANTE →

PLATEAU CYCLIQUE

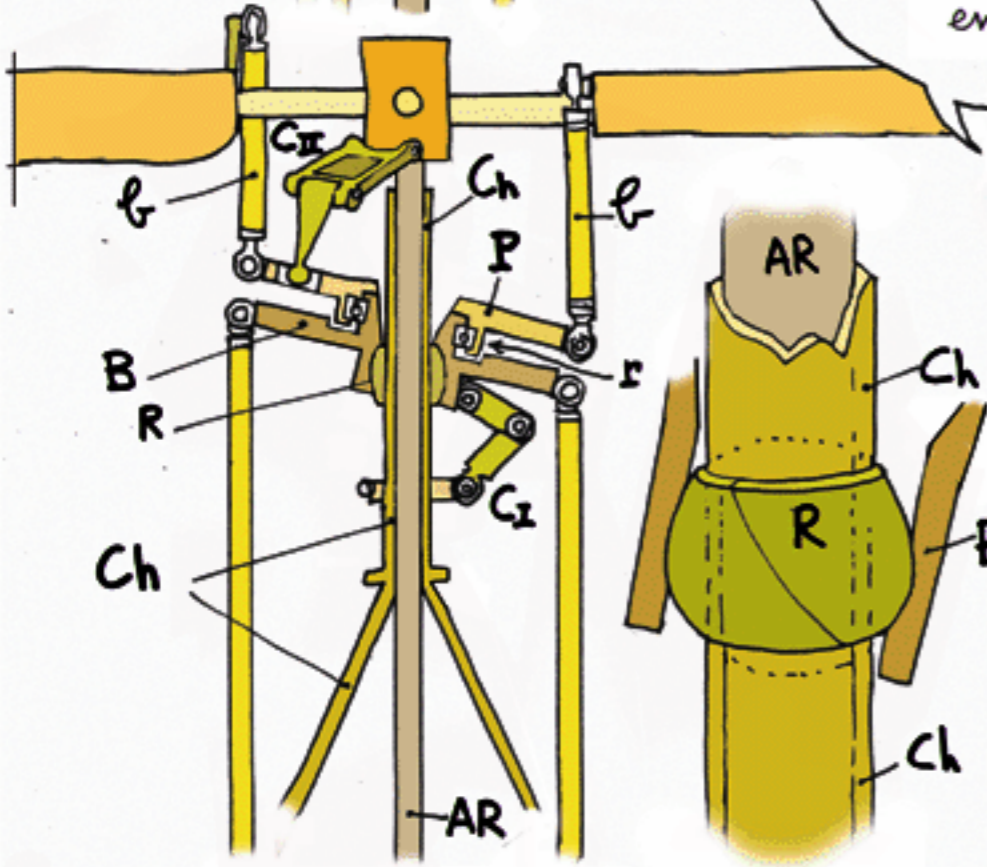


la mécanique hélico requiert des trésors d'artuce pour déboucher sur des montages simples, solides, légers, résistants, ne comportant qu'un nombre minimal de pièces





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 C_I**, 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 **g**. Un second compas **C_{II}** rend solidaires la tête de rotor **T** et le plateau cyclique rotatif **P** faute de quoi les biellettes de pas **g** en se voyant confier ce rôle se briseraient immédiatement.

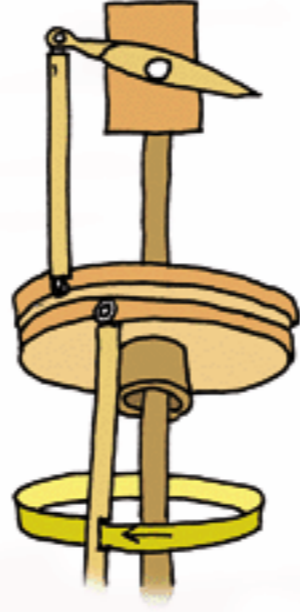
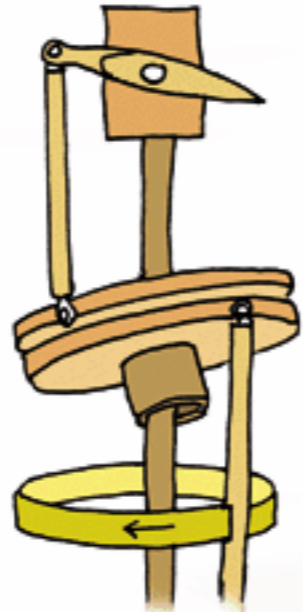
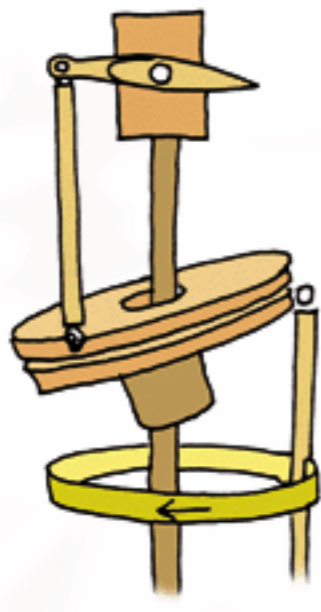
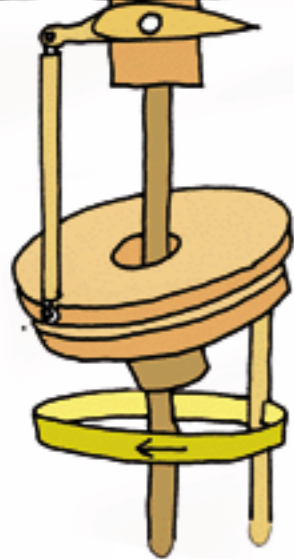


Il me faut maintenant concevoir des **COMMANDES DE VOL** me permettant d'actionner mes trois barres verticales

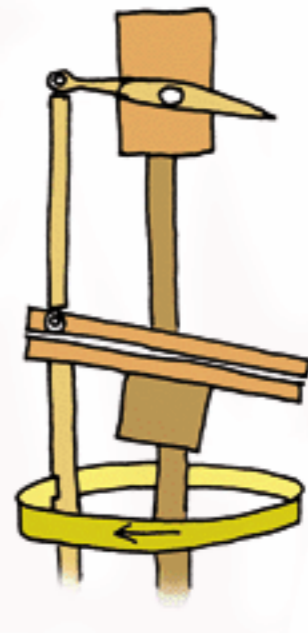
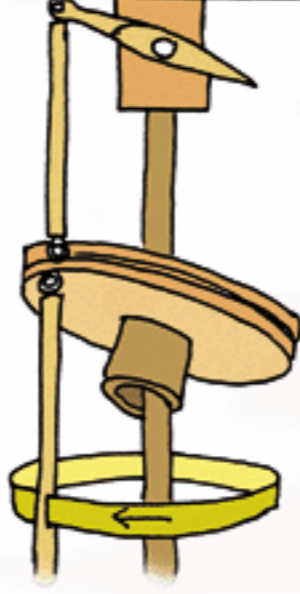


et le tour sera joué

incidence min

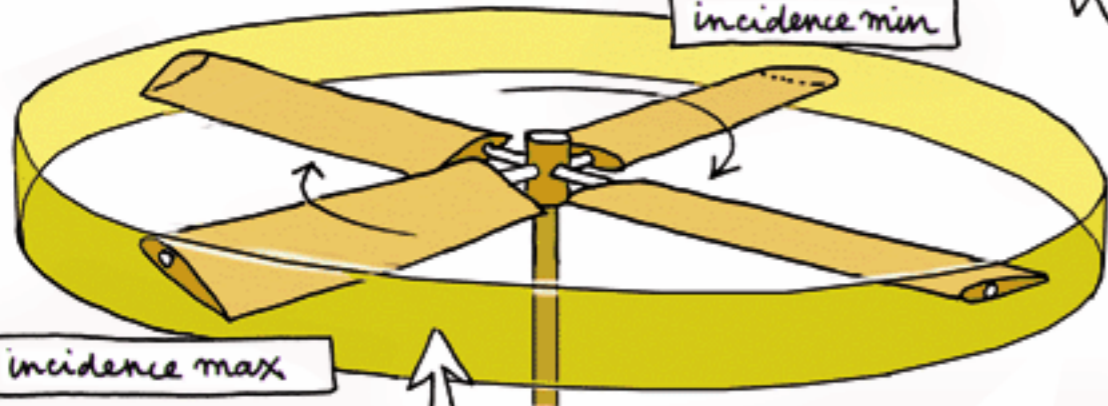


incidence max



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

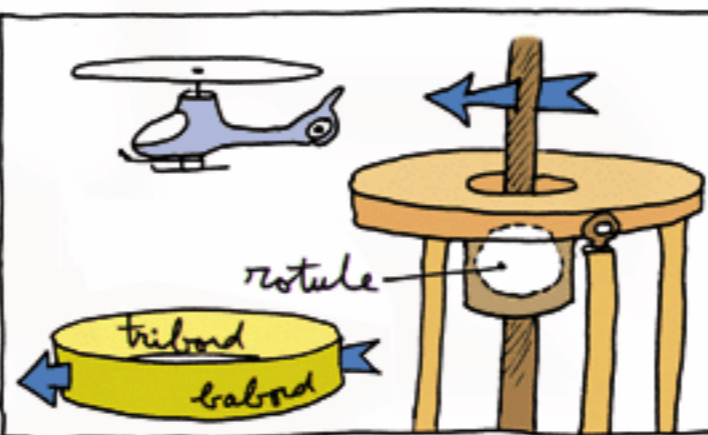
incidence min



incidence max

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

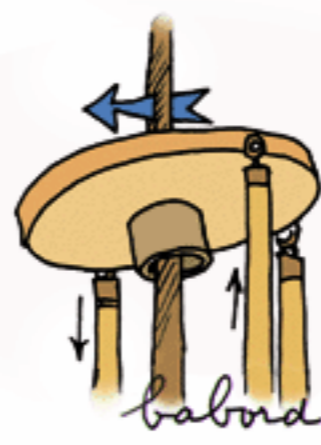
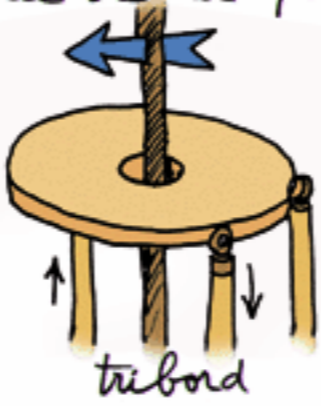
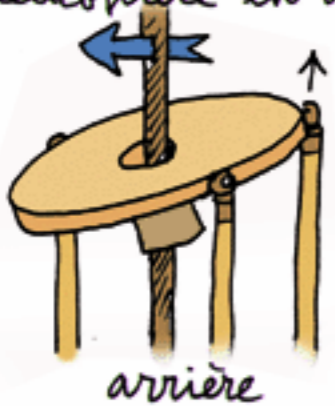
Ici, les pales occupent quatre positions différentes dans le plan de rotation

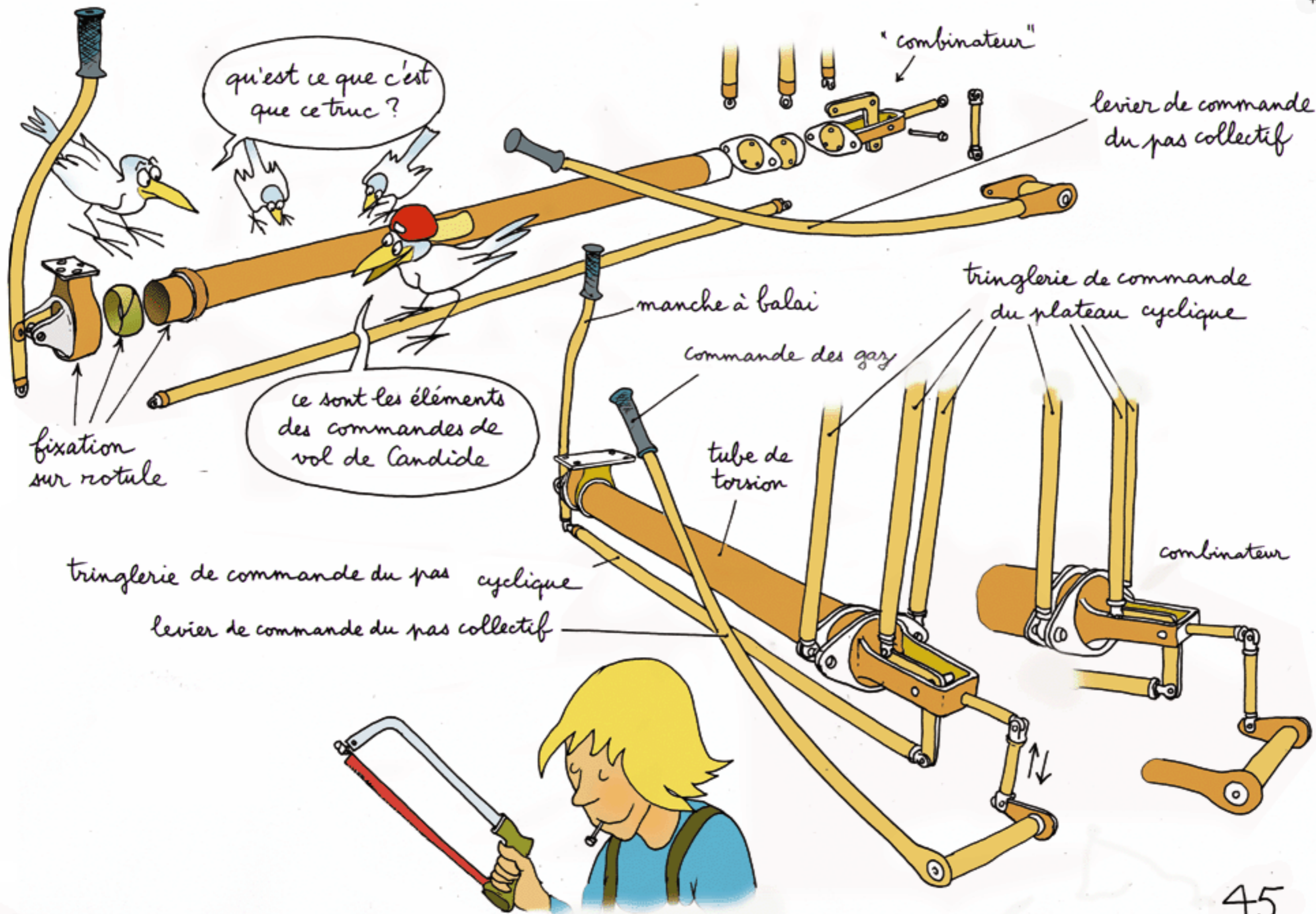


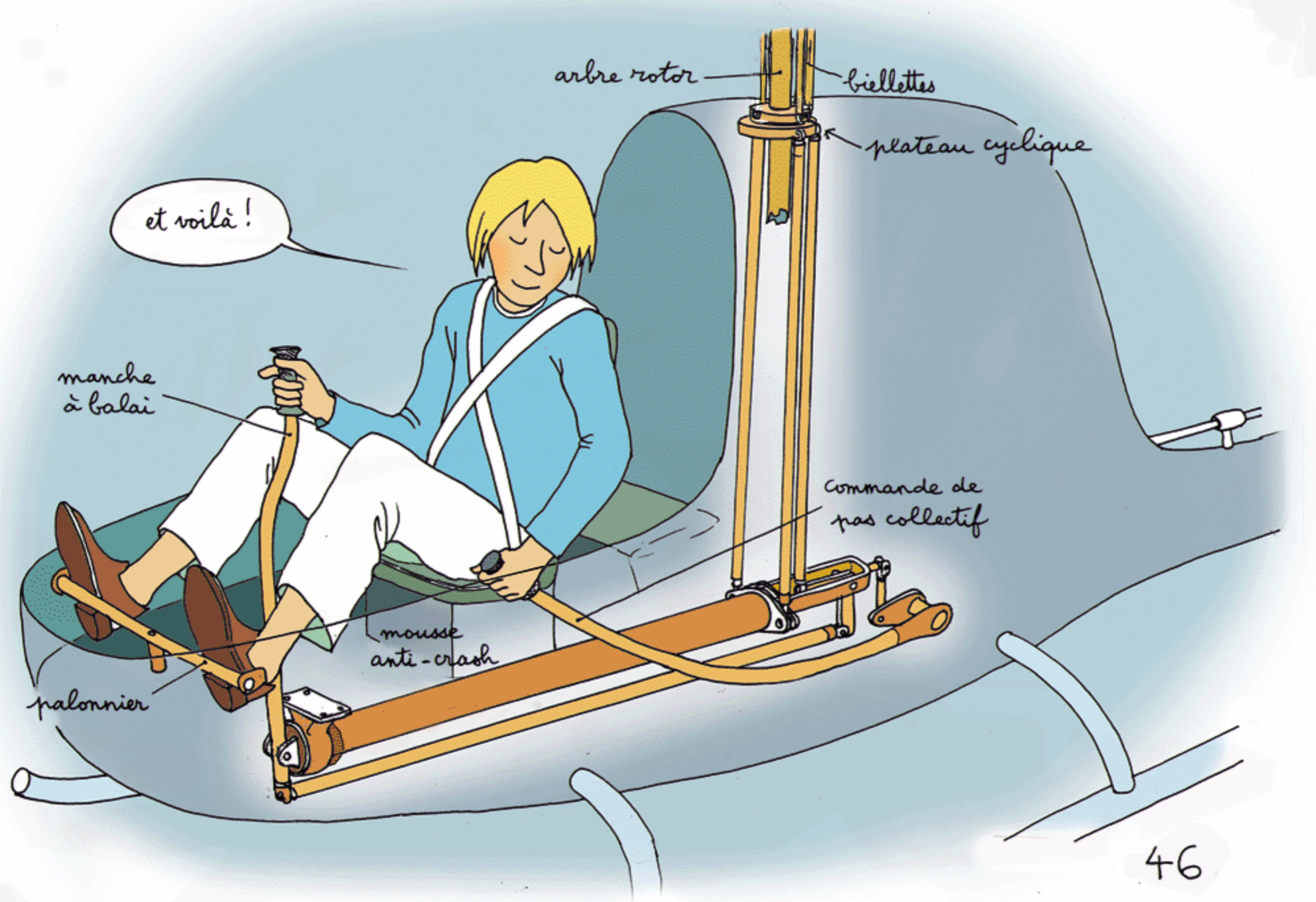
la flèche pointe vers l'avant de l'appareil

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

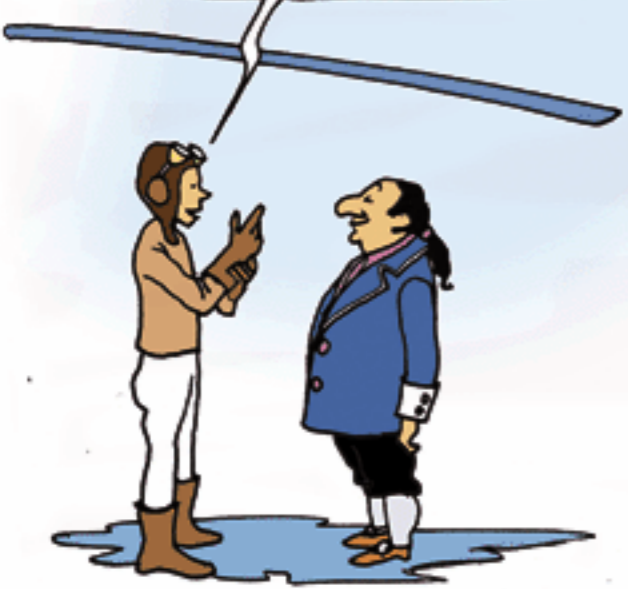
Piloter l'hélicoptère en accroissant l'incidence de la pale =







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



En avant!



PATAKLONK
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...



quoi donc
mon bon
Candide?

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



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





la machine est partie en crabe, sur sa droite

j'ai aussitôt mis du manche à gauche



alors elle s'est cabrée comme un cheval affolé

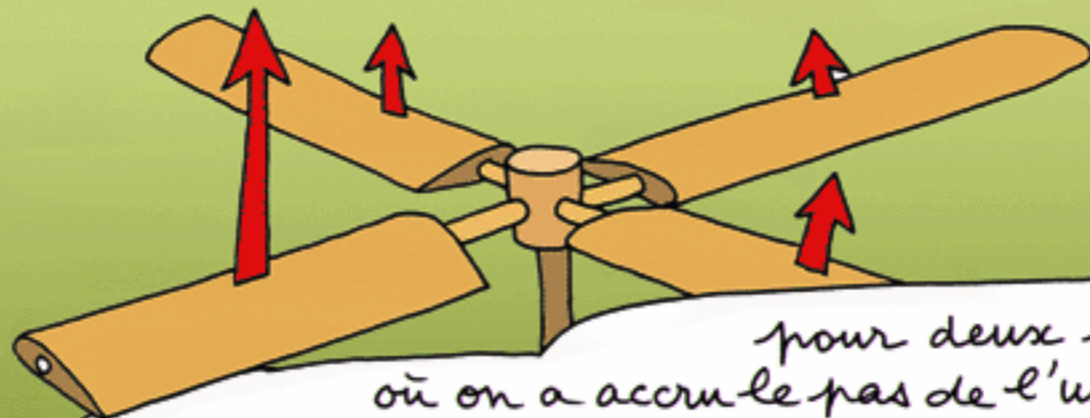
et elle est partie en ...marche arrière!



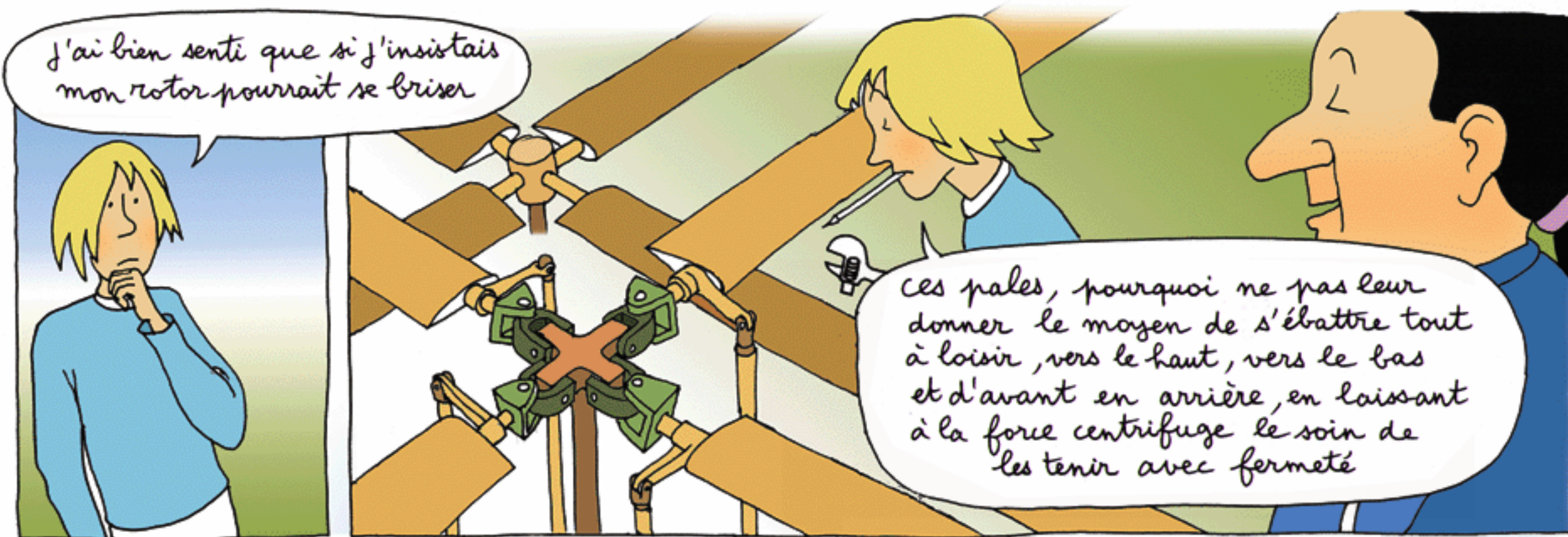
avec le déplacement sont apparues des vibrations si terribles que j'ai bien cru que le rotor allait se briser et que ma dernière heure était arrivée

voilà qui est des plus fâcheux. Mais n'avez-vous pas pu jusqu'ici trouver des remèdes frappés du sceau du bon sens?

j'ai bien senti que la machine était secouée dès que j'ai mis en oeuvre 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



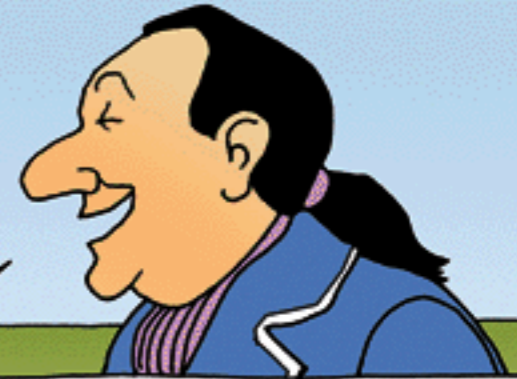
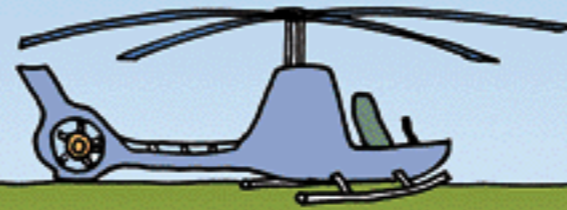
Ce qui veut dire que votre machine obéit à vos
ordres, mais en exerçant les effets à ... 90°

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



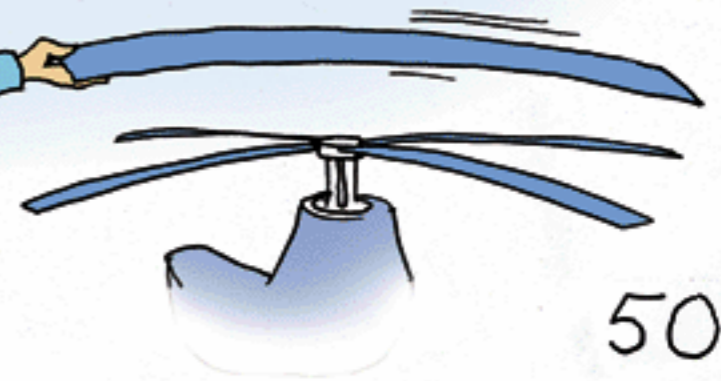
Candide, Candide, combien de choses ont pour nous des apparences familières alors que leur essence nous reste étrangère. Voyez : Le Soleil tourne autour de la Terre et nous ne savons pas pourquoi. Nous n'avons point percé la nature de cette horreur du vide qui fait monter le mercure dans les baromètres. 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 ?



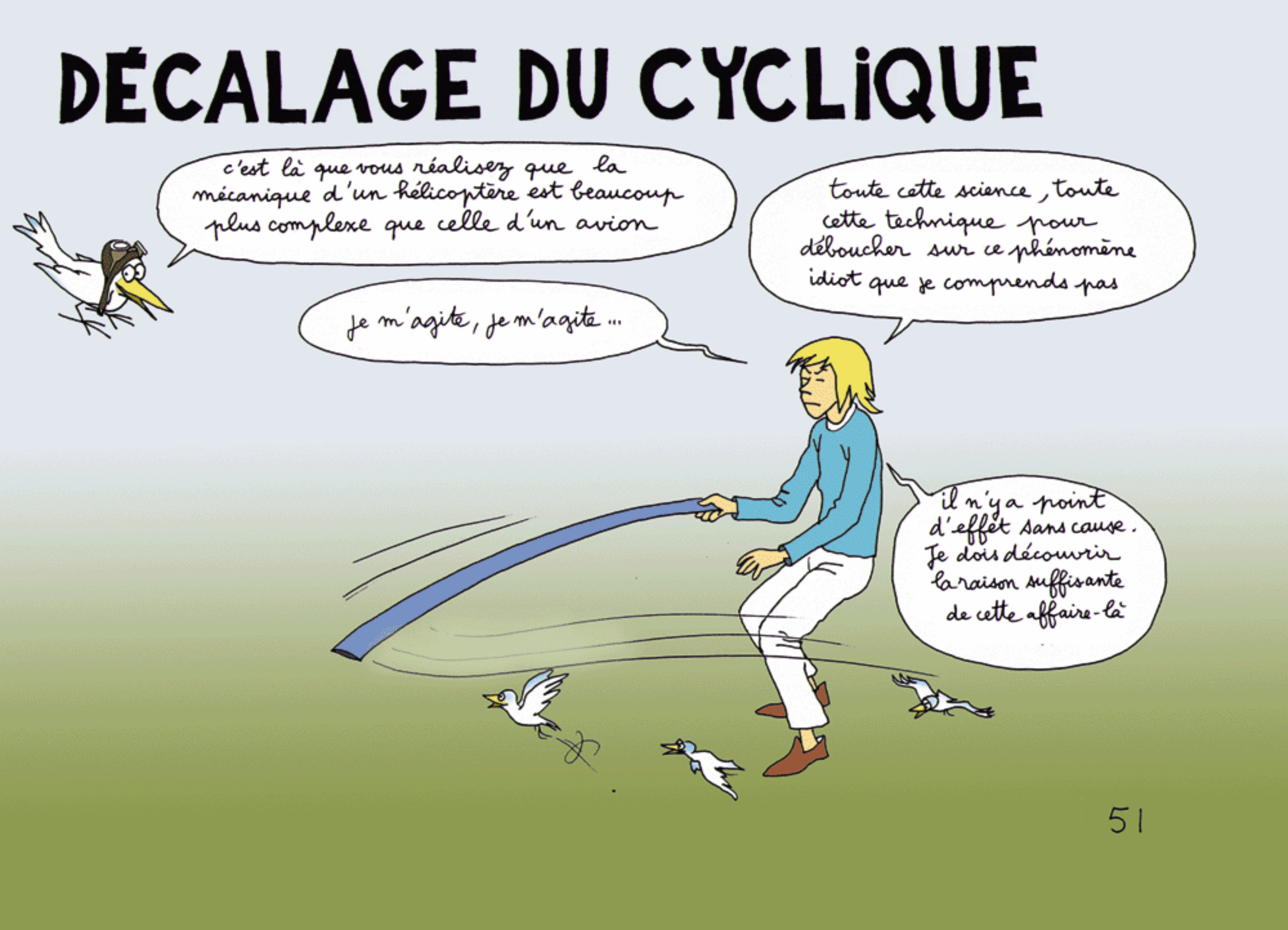
et l'amour, Candide, les tendres sentiments que vous portez à mademoiselle Cunégonde ?



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



DÉCALAGE DU CYCLIQUE



c'est là que vous réalisez que la mécanique d'un hélicoptère est beaucoup plus complexe que celle d'un avion

toute cette science, toute cette technique pour déboucher sur ce phénomène idiot que je comprends pas

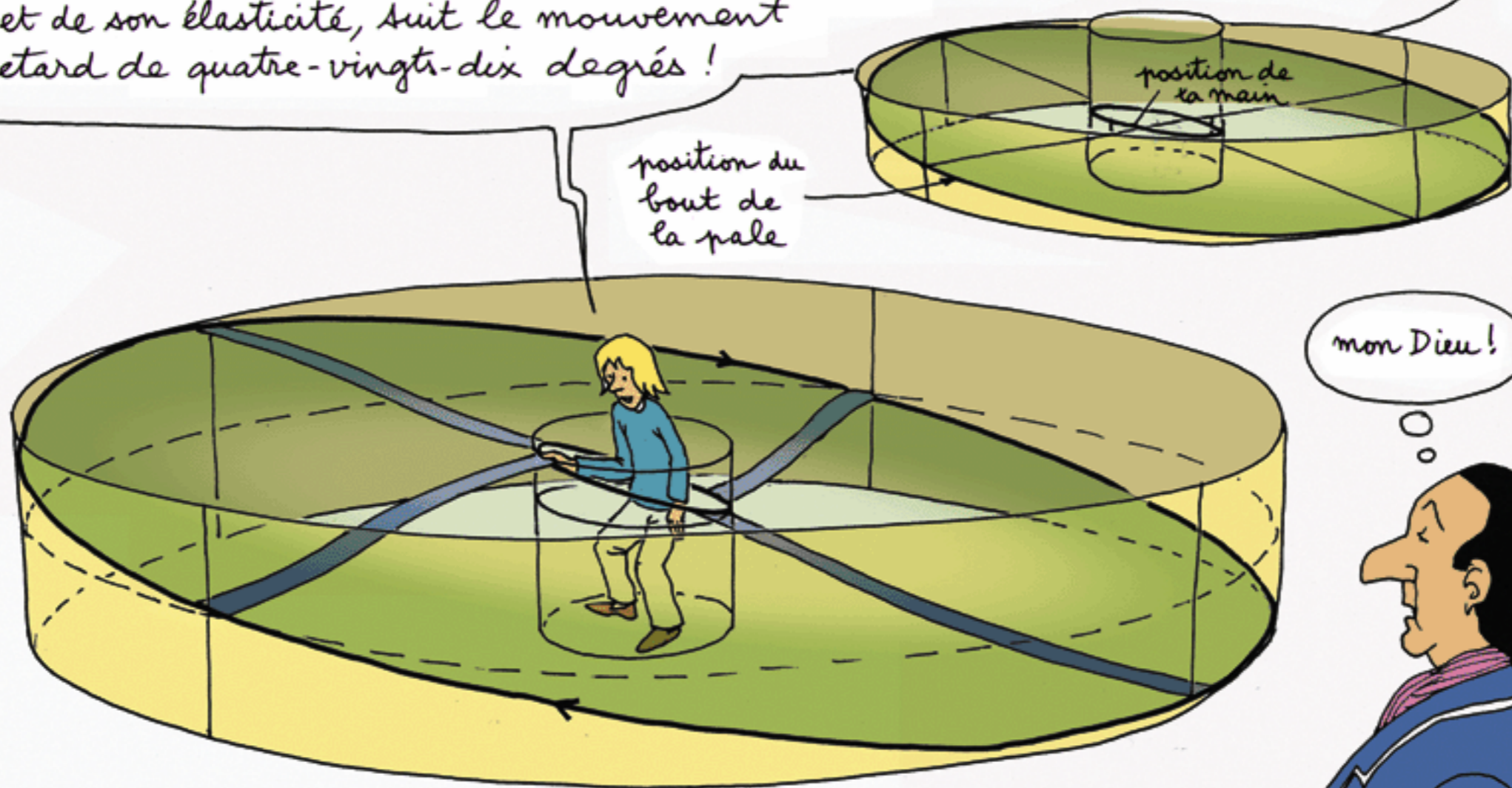
je m'agite, je m'agite ...

il n'y a point d'effet sans cause. Je dois découvrir la raison suffisante de cette affaire-là

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-vingt-dix degrés !

position du
bout de
la pale

position de
la main



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

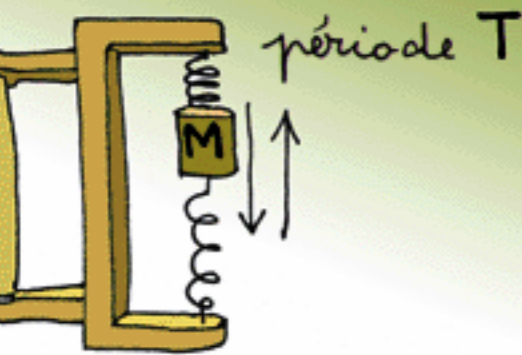
Vous allez comprendre, mon maître, grâce à cet appareil qu'on appelle un ELASTOTRON

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



en quoi est ce que la mécanique des fluides vous concerne?

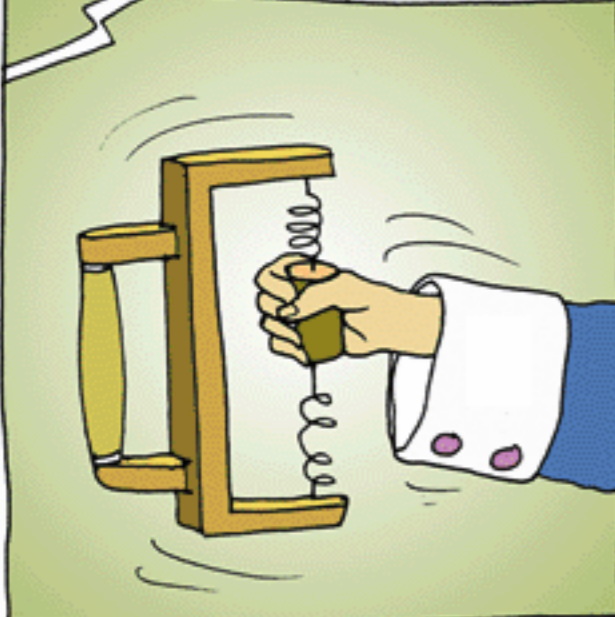
Je suis sûr que vous devez nager comme un pied !



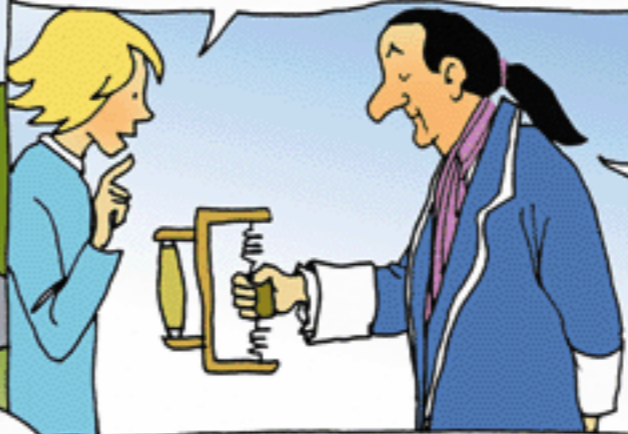
nager?

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**

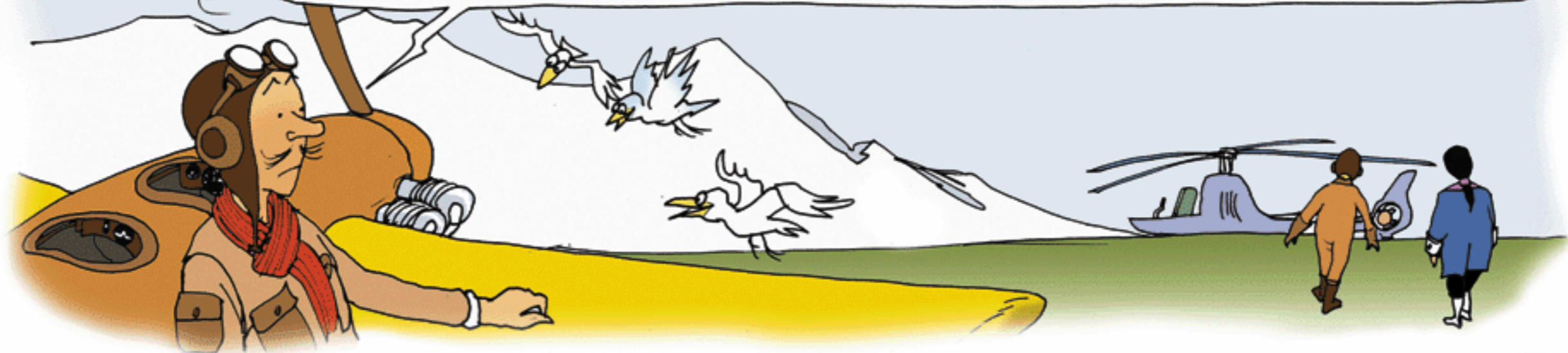


hmm, je vois...



la seconde articulation est l'ARTICULATION DE TRAÎNÉE, qui permet aux pales d'osciller comme ceci. Si ces articulations (ou fixations souples) n'existaient pas, l'hélicoptère subirait de terribles vibrations, pouvant entraîner la rupture du rotor (*)

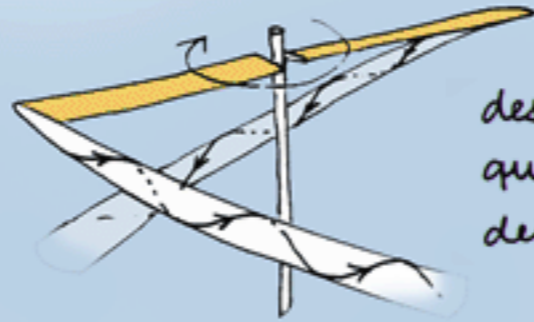
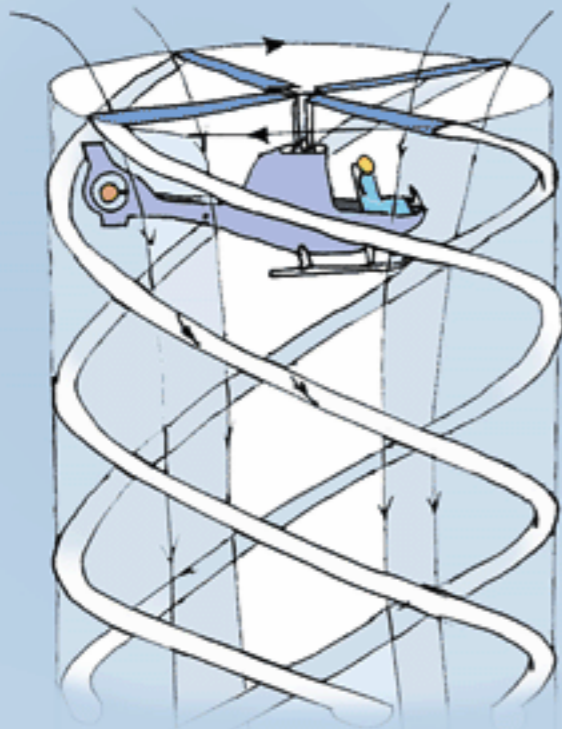
est-ce que j'ai des problèmes de réponse de systèmes du deuxième ordre ?



(*) 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



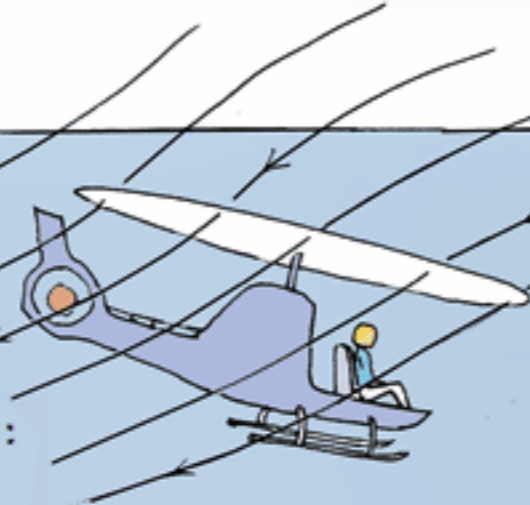
ce sont ces tourbillons qui se créent en bout d'aile qui provoquent en haute altitude des condensations de vapeur d'eau (traînées de condensation)

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

J'avoue que je ne comprends rien à cette histoire de **TRANSITION**



c'est pourtant simple.
Regarde comment on décolle



pour se maintenir en stationnaire on dépense de l'énergie en créant de la turbulence



en translation l'air file avec moins de turbulence, entre les plumes. On brasse toujours de l'air vers le bas, mais en dépensant moins d'énergie

et dans la transition inverse ?



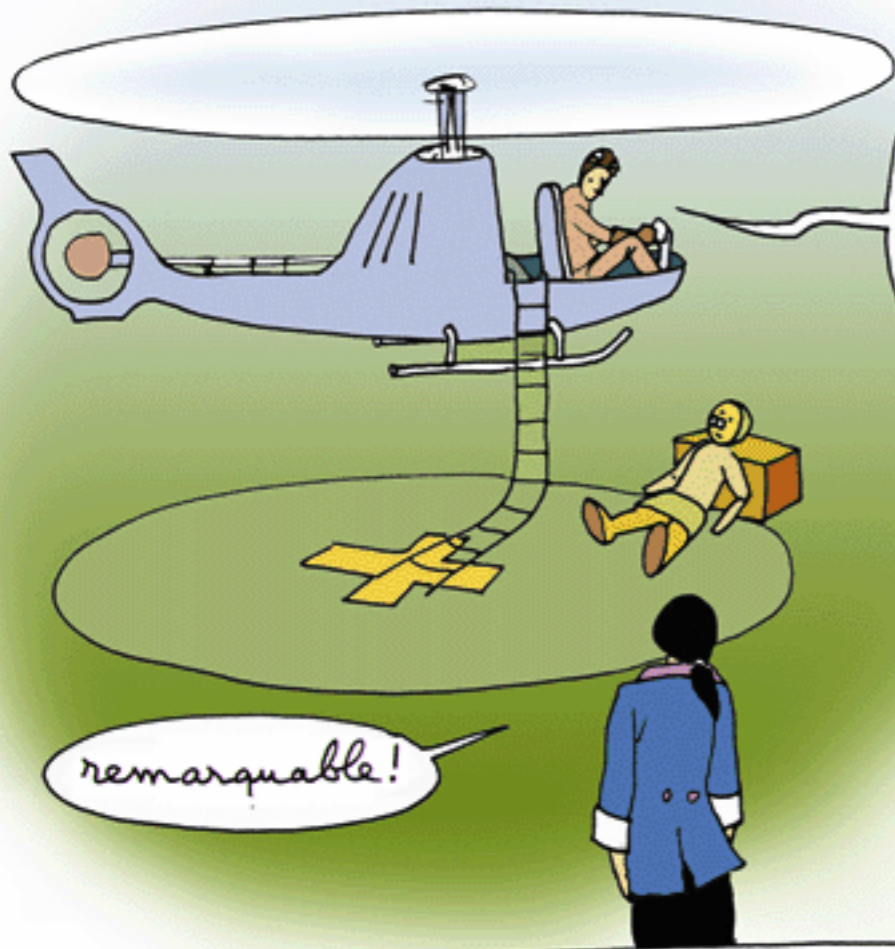
c'est pas dur. Tu vois un truc intéressant en bas, un poisson ...



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



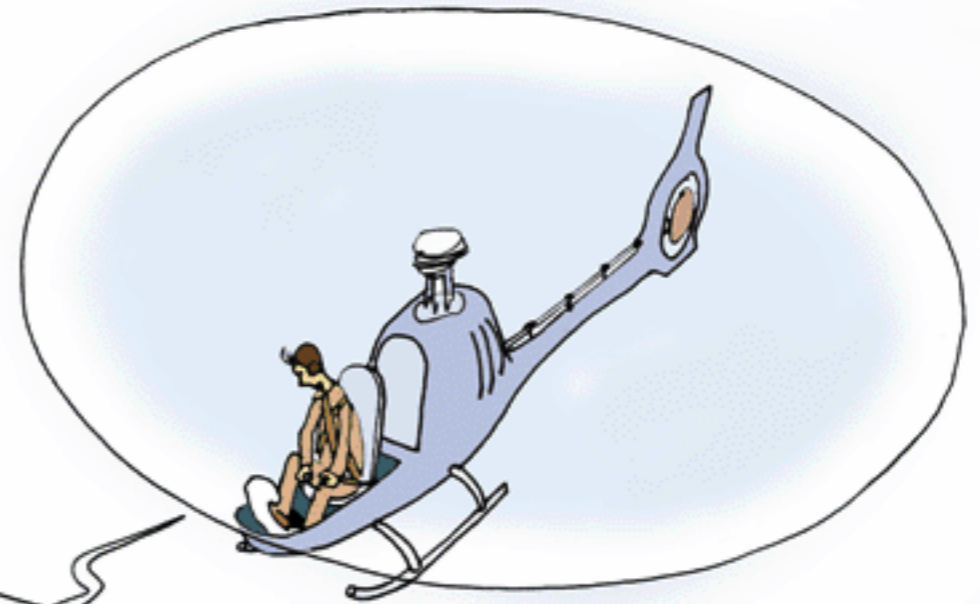
et là tu reviens en régime de vol stationnaire, en créant une forte turbulence, donc en consommant plus d'énergie



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

remarquable!

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!

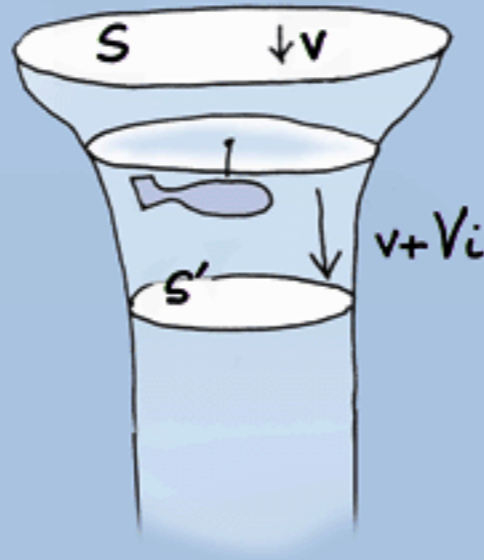
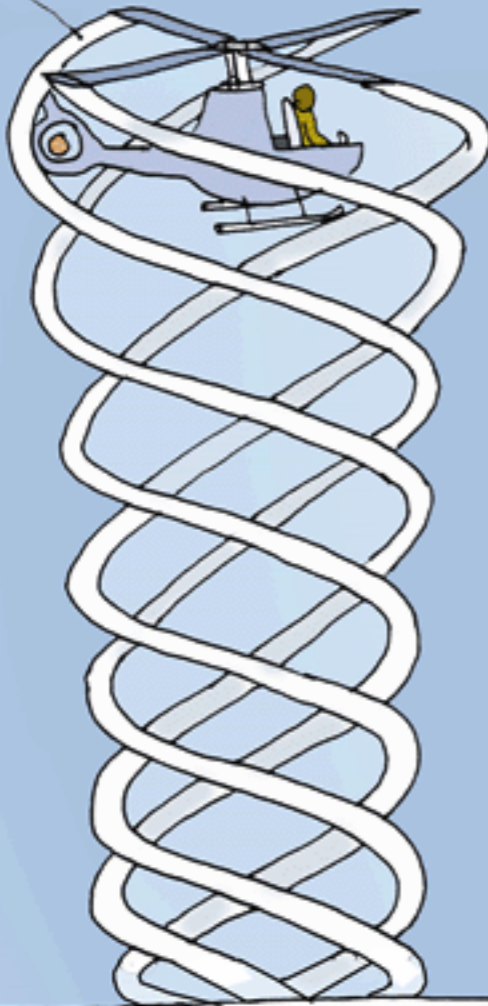
J'ai loupé la cible, Pangloss. L'approche complètement verticale, ça ne va pas



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



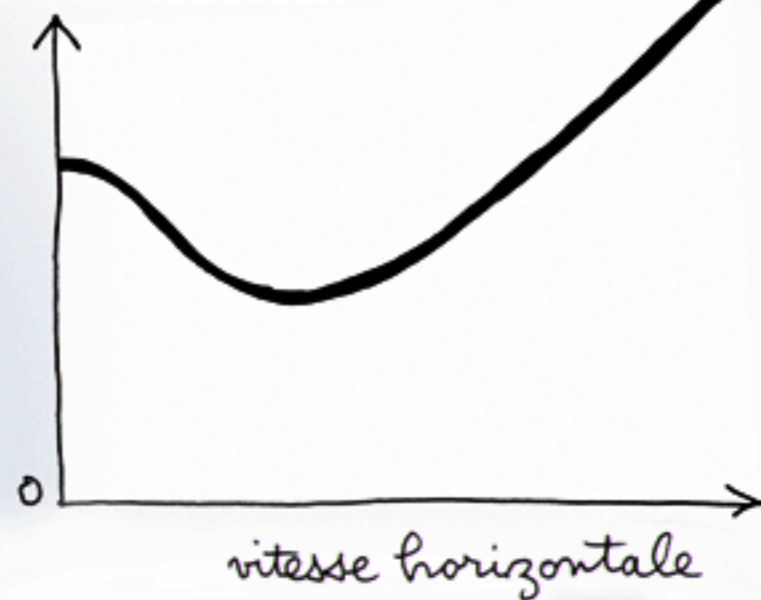
tourbillon marginal

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

(*) 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

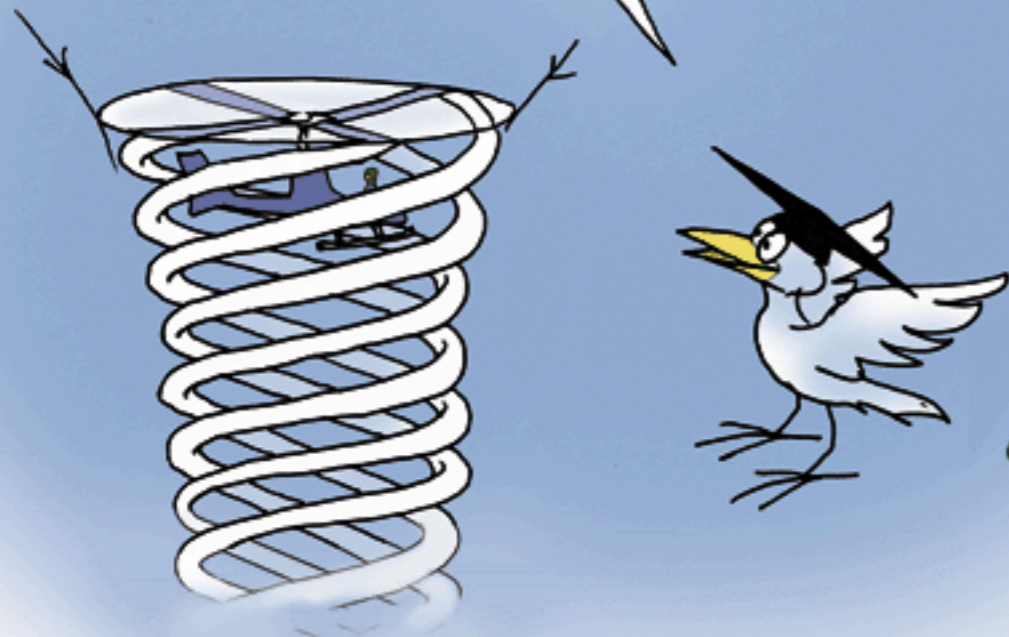
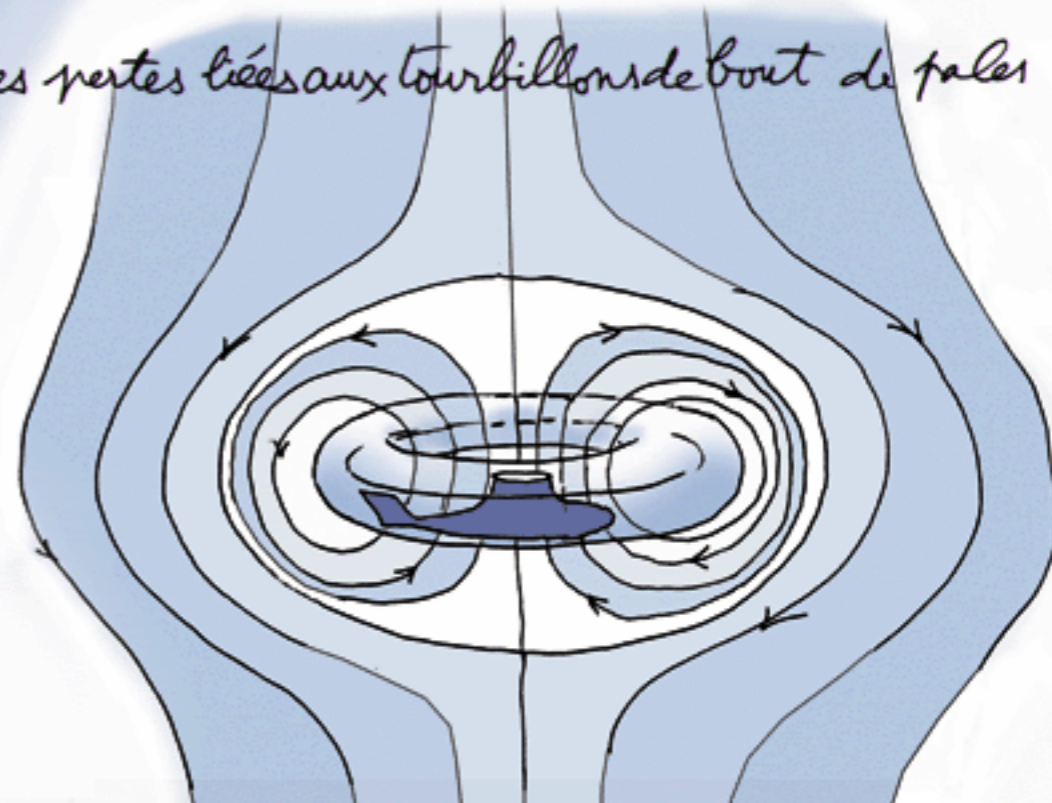
tout ce qui est **TOURBILLONNAIRE** représente une perte d'énergie. le vol en translation contraire l'établissement du régime tourbillonnaire. Cette façon de se maintenir à altitude constante est donc moins consommatrice en énergie

Puissance nécessaire au vol



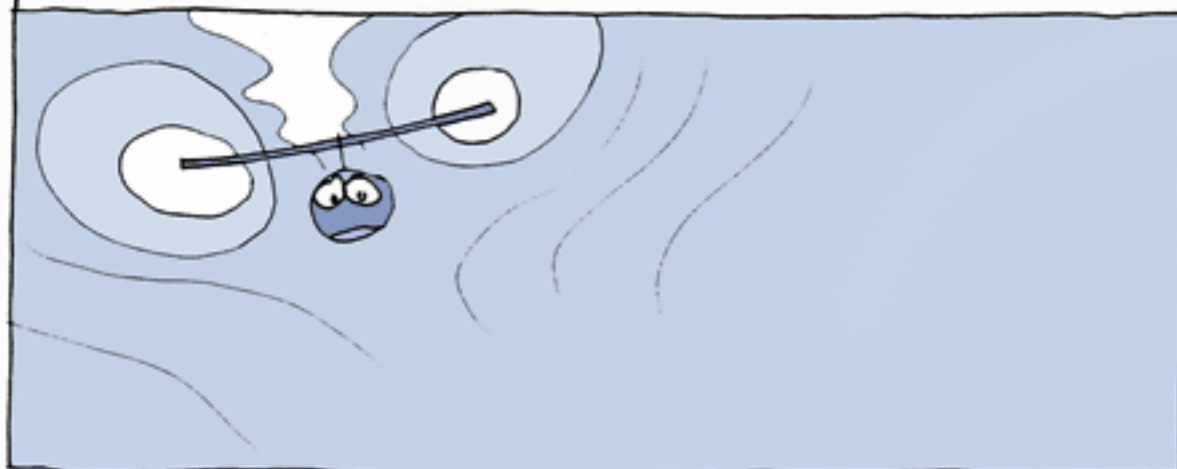
moins importance des pertes liées aux tourbillons de bout de pales

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

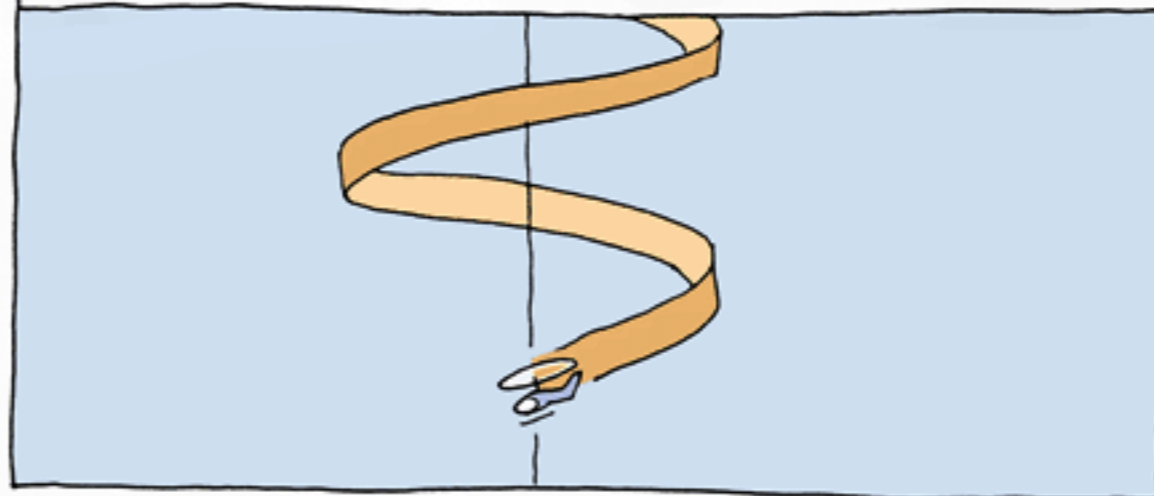


quand la vitesse de descente atteint les trois-quarts de la vitesse induite V_i les tourbillons se fondent en donnant naissance à un gros **VORTEX** de forme torique

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



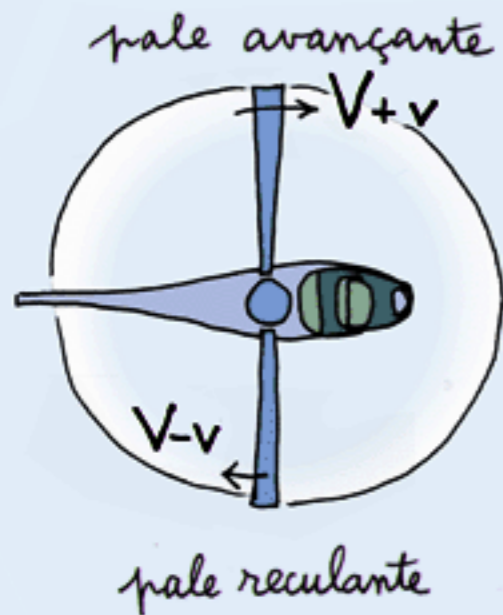
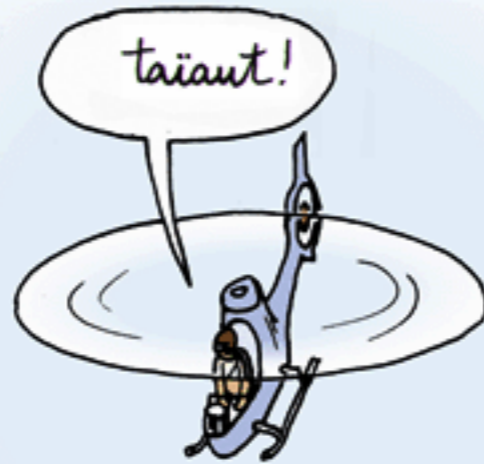
moralité = j'approcherai le haut de la tour en vol horizontal. Je casserai ma vitesse au dernier moment, en passant en vol stationnaire et en effectuant une dernière descente à vitesse verticale modérée, disons à un mètre par seconde



pour éviter ce dangereux passage en **RÉGIME TOURBILLONNAIRE**

maintenant, reprenons nos essais en vol

DÉCROCHAGE SUR PALE RECVLANTE



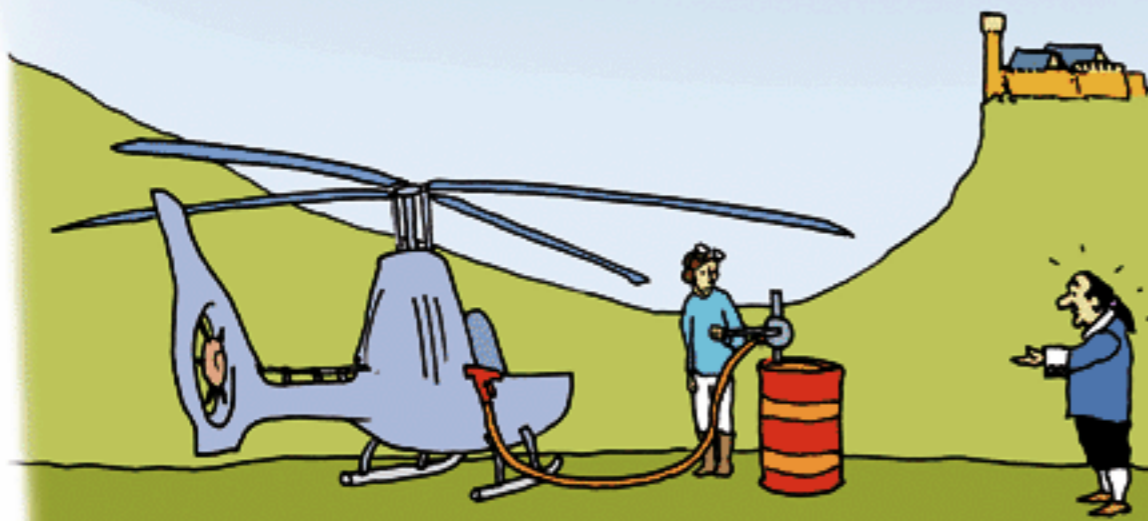
soit V la vitesse de la pale à sa périphérie. Soit v la vitesse de vol de l'hélicoptère. le VENT RELATIF auquel est soumise la PALE AVANÇANTE est $V+v$. celui auquel est soumise la PALE RECVLANTE est $V-v$. Les forces de pression qui s'exercent sur les deux pales sont donc différentes



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



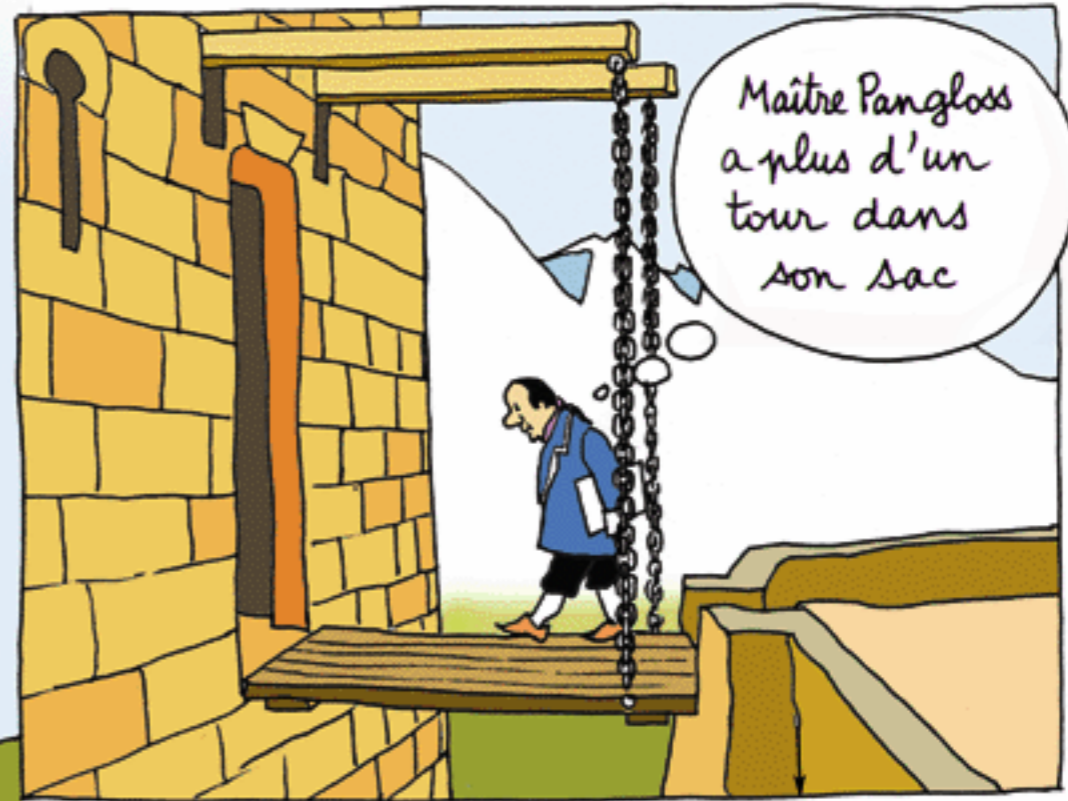
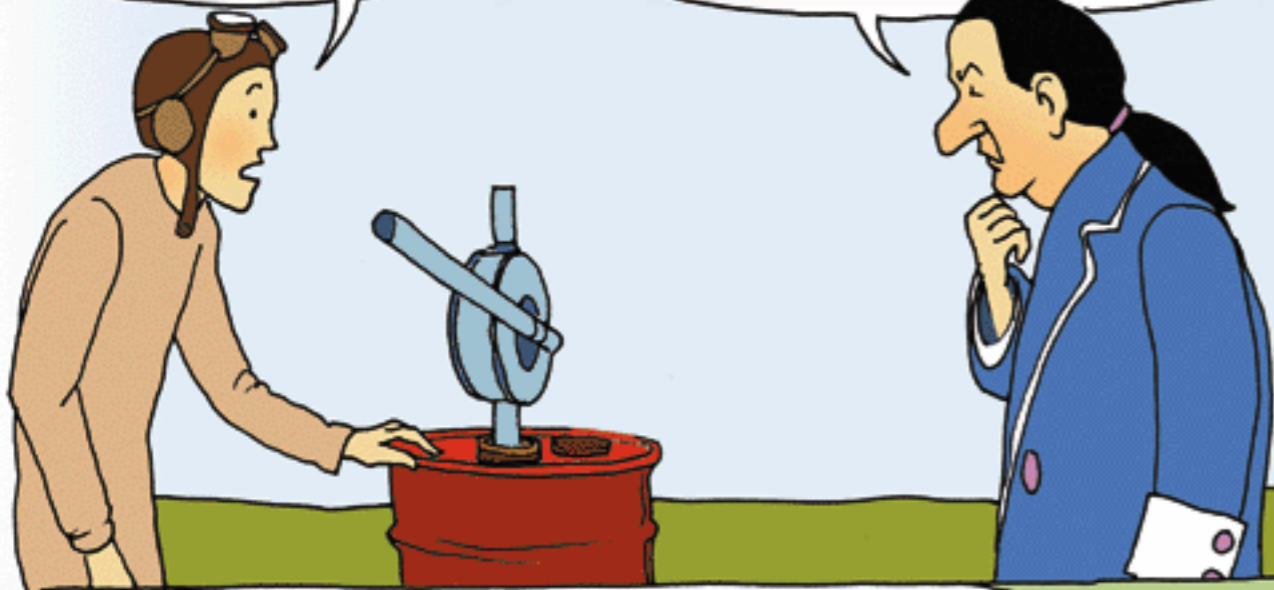
les sens de rotation des rotors différent selon les pays -
Ainsi, pour les hélicoptères français la pale avançante est à gauche alors qu'elle est à droite sur les machines américaines. Mais cela ne change rien à tout ce qui a été dit ici - la Direction



Candide, je pense à une chose. Le baron ignore tout de vos projets. Mais mademoiselle Cunégonde également. Qu'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

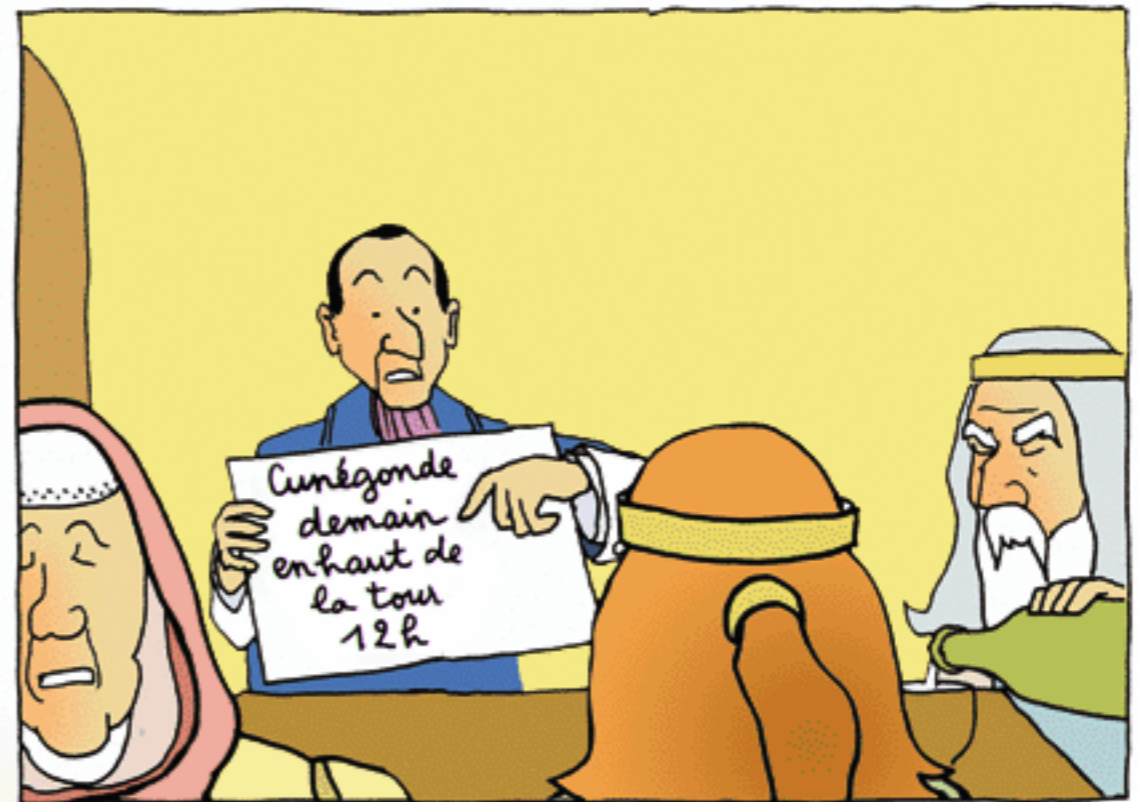
Ah, Maître Pangloss, que ne nous contez-
vous pas une belle histoire, pleine de
philosophie, dont notre éervelée de fille
puisse faire le plus sage des profits

oh oui, maître, ici nous prisonns
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



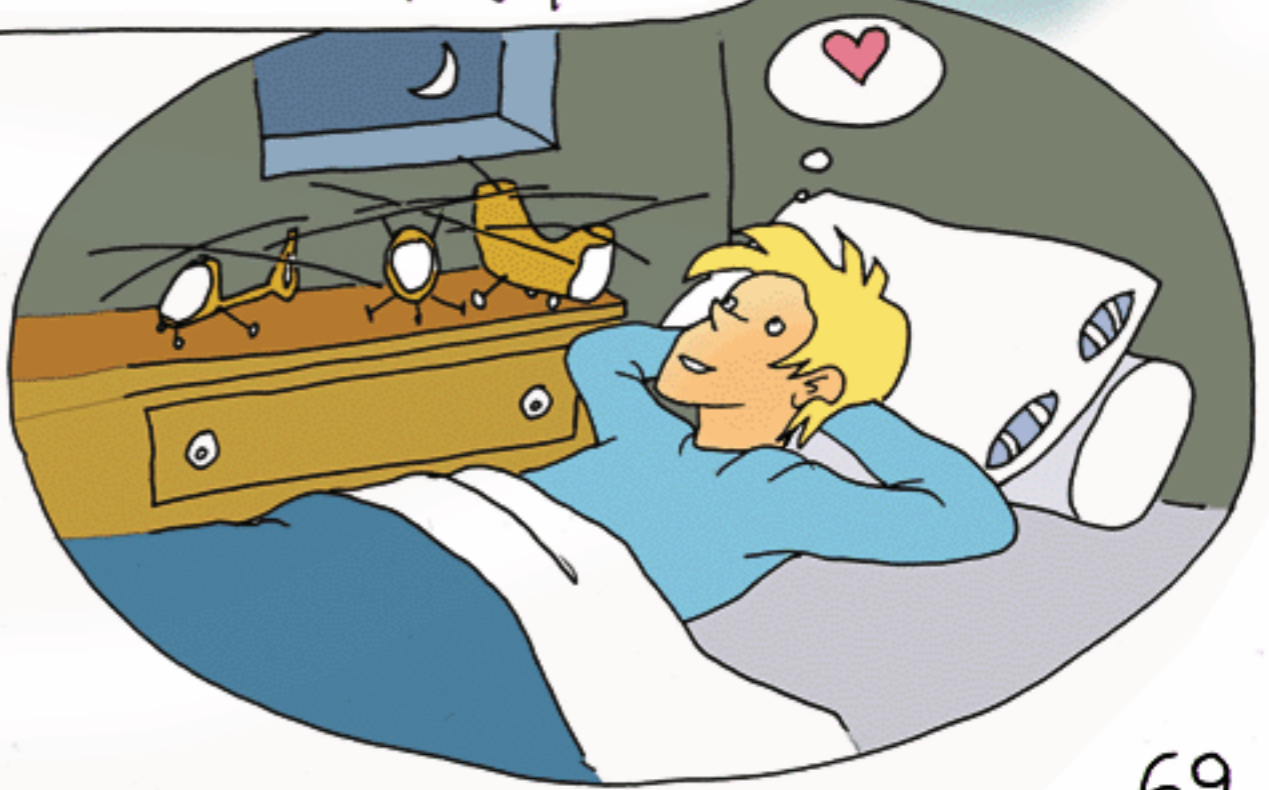
c'était une belle histoire, Pangloss, bien que je n'aie pas saisi... hum... toutes les implications philosophiques

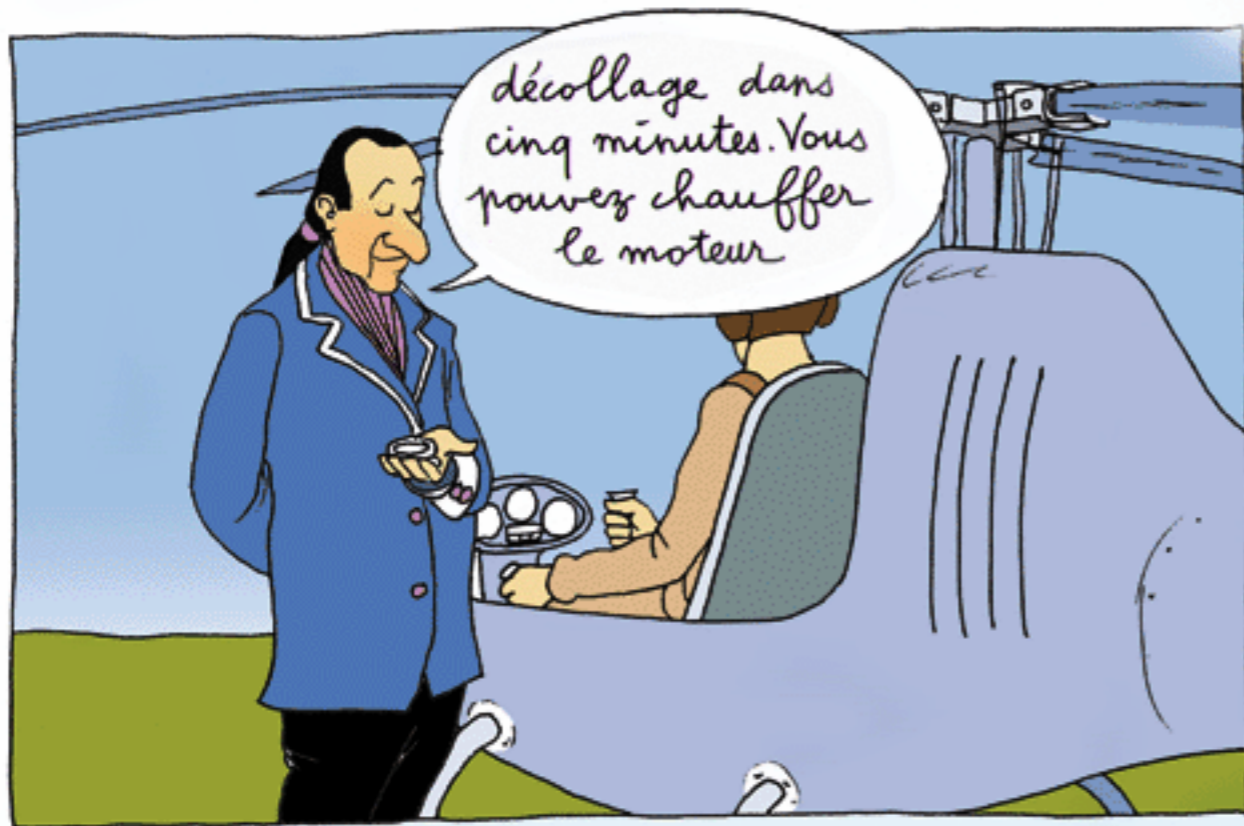




des princes qui viennent avec des tapis volants! C'est contre les lois de la physique!!

ce Pangloss, il a des côtés rêveur, parfois





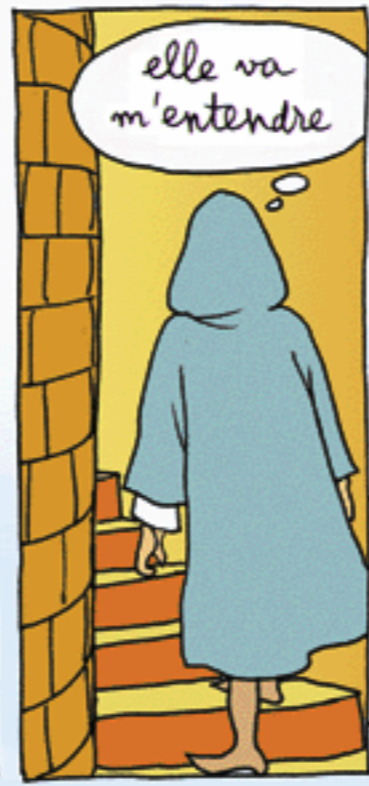
décollage dans cinq minutes. Vous pouvez chauffer le moteur

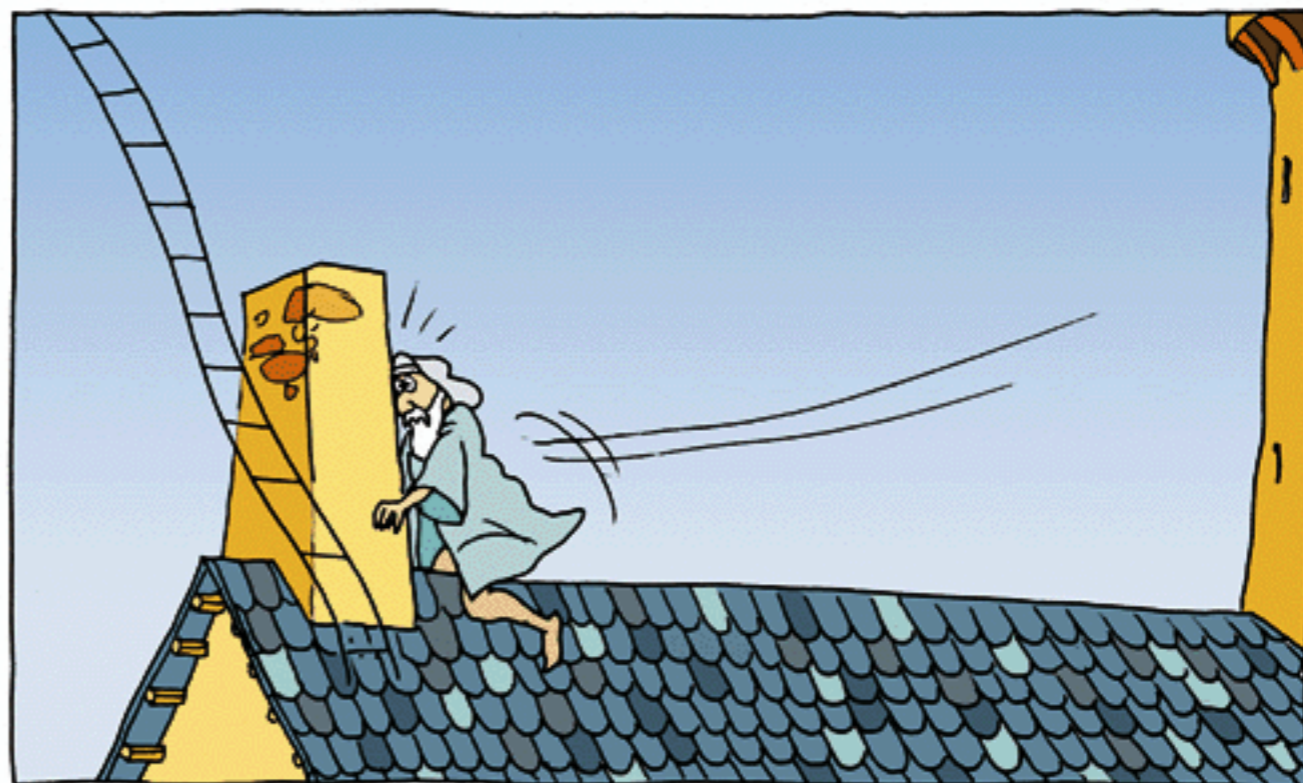
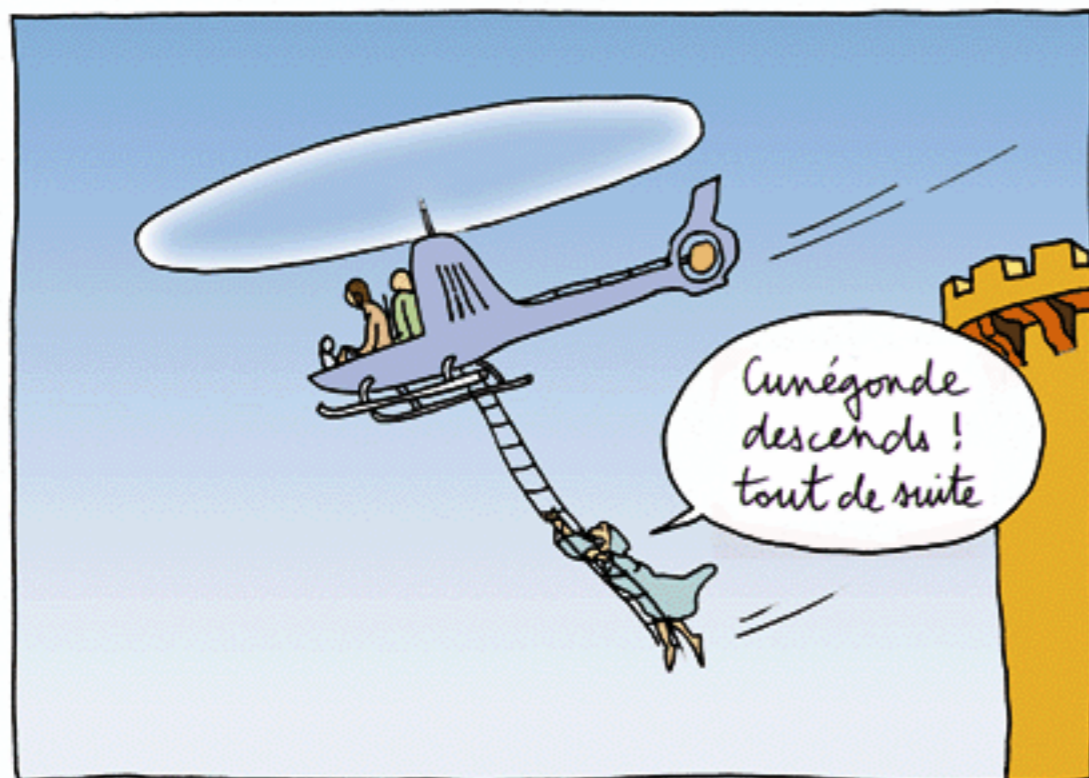


Pangloss a dit midi. L'horloge commence à sonner. Il faut que je monte sur la terrasse



la voilà !!!







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

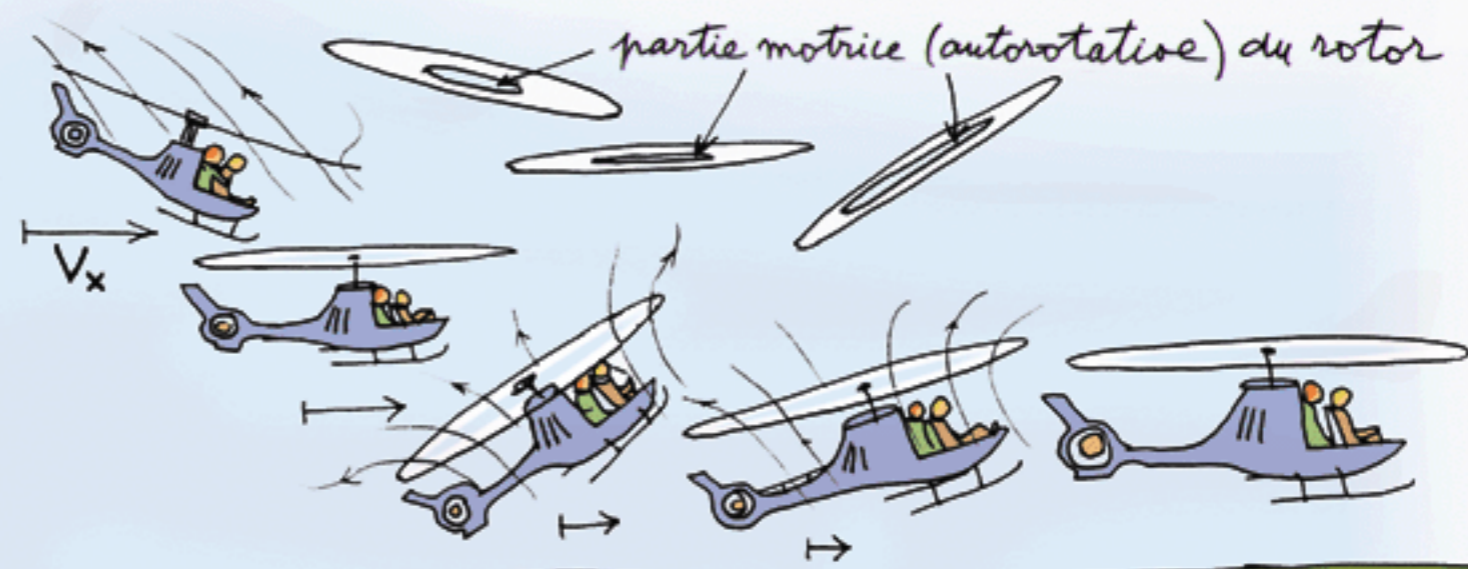


$$(*) V_{(m/s)} = \sqrt{2gz} = \sqrt{20z} \text{ (mètres)}$$

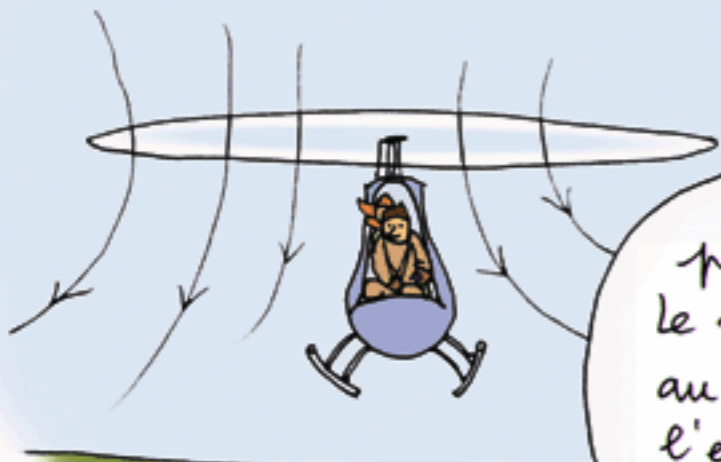


LE FLARE

il va falloir que j'improvise
une manoeuvre 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 manoeuvre est fortement consommatrice d'adrénaline



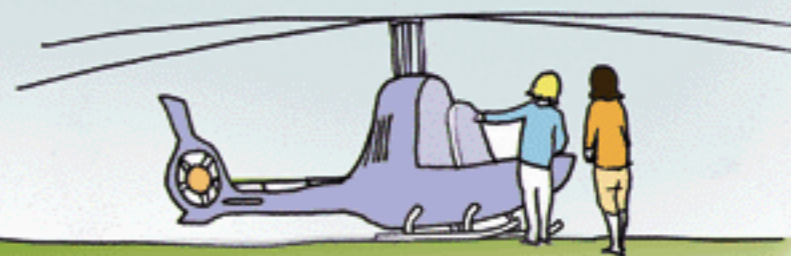
Comme ce baron est ennuyeux. Pour une fois qu'apparaît quelque chose d'un peu amusant il veut mettre l'inventeur sous les verrous. Nous allons arranger cela. Plissonneau, passez-moi mon épée, je vous prie



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



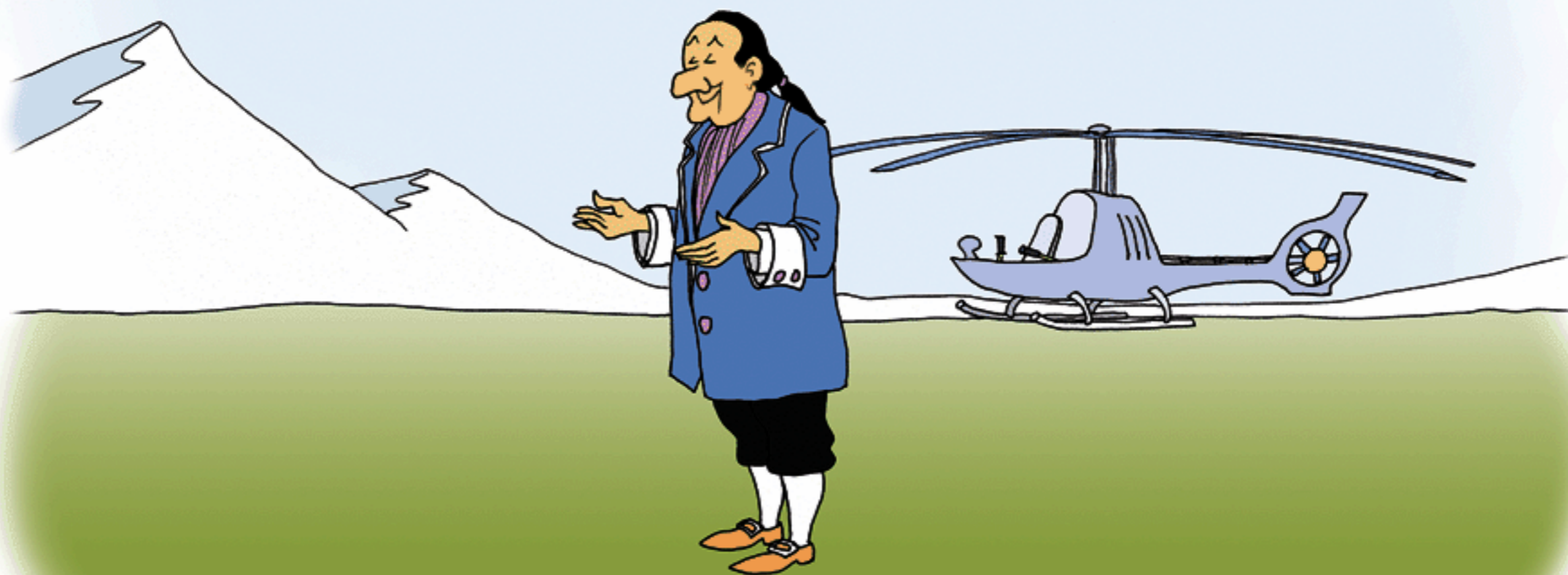
et marquis, c'est beaucoup mieux que baron. Alors maintenant papa, tu nous lâche un peu



FIN

76

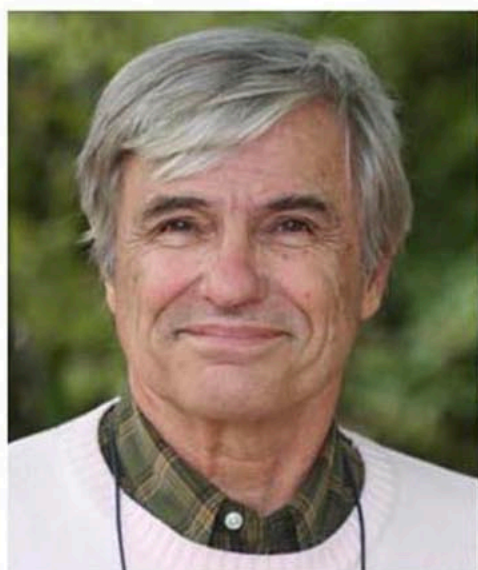
vous voyez donc, mon cher Candide, que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles. Car, si vous n'aviez pas été jeté à la porte du château par monsieur le baron à grands coups de pied dans le derrière vous n'auriez pas inventé l'hélicoptère



Un grand merci à Pascal Chrétien pour ses précieux conseils techniques

Savoir sans Frontières

Association à but non lucratif créée en 2005 et gérée par deux scientifiques français. But : diffuser des connaissances scientifiques en utilisant la bande dessinée à travers des pdf gratuitement téléchargeables. En 2020 : 565 traductions en 40 langues avaient ainsi été réalisées. avec plus de 500.000 téléchargements.



Jean-Pierre Petit



Gilles d'Agostini

L'association est totalement bénévole. L'argent des dons est intégralement reversé aux traducteurs.

Pour faire un don, utilisez le bouton Paypal sur la page d'accueil du site Internet

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Coordonnées bancaires France → Relevé d'Identité Bancaire (RIB) :

Etablissement	Quichet	N° de Compte	Cle RIB
20041	01008	1822226V029	88

Domiciliation : La banque postale
Centre de Marseille
13900 Marseille CEDEX 20
France

For other countries → International Bank Account Number (IBAN) :

IBAN
FR 16 20041 01008 1822226V029 88

and → Bank Identifier Code (BIC) :

BIC
PSSTFRPPMAR

Les statuts de l'association (en français) sont accessibles sur son site. La comptabilité y est accessible en ligne, en temps réel. L'association ne prélève sur ces dons aucune somme, en dehors des frais de transfert bancaire, de manière que les sommes versées aux traducteurs soient nettes.

L'association ne salarie aucun de ses membres, qui sont tous des bénévoles. Ceux-ci assument eux-mêmes les frais de fonctionnement, en particulier de gestion du site, qui ne sont pas supportés par l'association.

Ainsi, vous pourrez être assurés, dans cette sorte « d'œuvre humanitaire culturelle » que quelle que soit la somme que vous donniez, elle sera *intégralement* consacrée à rétribue les traducteurs.

Nous mettons en ligne en moyenne une dizaine de nouvelles traductions par mois.