

Le défi de Cyrano : un ballon gonflé avec du vide

Cyrano de Bergerac n'est pas seulement un personnage de littérature : il a réellement existé et vivait à Sannois, près de Paris. Il n'était pas qu'un fameux duelliste, il était aussi un savant et l'un des premiers auteurs de science-fiction.

Il décrit, dans l'un de ses romans, un engin volant soulevé par un globe de cuivre dans lequel on avait fait le vide grâce à une pompe actionnée par l'énergie solaire. Car, en effet, un récipient rempli d'un gaz plus léger que l'air subit une force dirigée vers le haut : *la poussée d'Archimède*.

Il s'agit de la force qui fait flotter les bateaux et les bathyscaphes et qui fait voler la « Rozière » de Steve Fosset ou son aïeule, la montgolfière de Pilâtre de Rozier. Au niveau de la mer, l'air a une masse volumique non négligeable de $1,3 \text{ kg/m}^3$ (ou $1,3 \text{ g/l}$).

Un solide quelconque de 1 m^3 de volume est donc soumis à une force dirigée vers le haut, équivalent au poids d'une masse de 1,3 kg. Evidemment, dans la pratique, on néglige cette force, mais elle est toujours présente et il faut en tenir compte lors des pesées de haute précision : le poids apparent varie avec la pression atmosphérique et donc avec l'altitude.

Le « vide », constitué de gaz raréfié, est bien évidemment un fluide plus léger que l'air. Si le poids du solide est inférieur au poids de l'air déplacé, le solide doit donc s'envoler.

Ce raisonnement posé par Cyrano était loin d'être une billevesée : tout le problème étant de trouver un récipient capable de résister à la pression atmosphérique.

C'est un problème ardu. Voyons ce qui se passe lorsqu'on aspire l'air contenu dans une bouteille d'eau en plastique à l'aide un aspirateur ménager : la pression écrase la bouteille. Même résultat avec un faitout en aluminium, à priori plus résistant. Une autre expérience classique est celle dite du « crève-vessie » : une membrane de cellophane ou de polyéthylène est tendue sur l'orifice d'un tube en métal d'environ dix centimètres de diamètre. A l'aide d'une pompe, on fait le vide sous la membrane qui ne tarde pas à éclater en provoquant un bruit assourdissant. Voilà bien la preuve que pour résister à la pression atmosphérique, il faut des enceintes robustes ; c'est un problème résolu depuis longtemps.

FABRICE DAVID

« Tout corps plongé dans un fluide reçoit une poussée de bas en haut égale au poids du volume de fluide déplacé... »

Observons le tube cathodique d'un ordinateur : à l'arrière de l'écran, on trouve un milieu raréfié comparable à l'environnement spatial d'un satellite en orbite basse. L'épaisseur du verre au plomb, et la courbure que les ingénieurs lui ont donnée, nous permet de travailler en toute sécurité malgré la pression atmosphérique qui appuie d'un kilogramme sur chaque centimètre carré de l'écran. Est-il cependant allégé par la poussée d'Archimède ?

Nous allons en faire la preuve : emballons un vieux tube cathodique dans un sac postal en toile épaisse et pesons-le. Notons le poids p_1 . Laissons le tomber d'une certaine hauteur et mesurons et notons à nouveau, après implosion, son poids p_2 : il n'est pas rare de remarquer un accroissement apparent de poids supérieur à

20 grammes. Il nous faut rajouter, sur l'autre plateau de la balance, un beau cylindre de laiton estampillé afin de retrouver l'équilibre. Attention : l'expérience n'est pas sans danger. L'implosion en chaîne de tubes cathodiques sous vide a été à l'origine de la récente mise hors service du détecteur de neutrinos japonais « Super Kamiokande ». Si les gros tubes photomultiplicateurs sous vide étaient bien conçus pour résister à la pression atmosphérique, l'un des tubes situés au fond de l'immense cuve souterraine, remplie avec de l'eau, n'a pas résisté à la pression hydrostatique qui augmente d'une atmosphère tout les dix mètres de profondeur. Un tube a implosé et l'onde de choc qui en a résulté a brisé de nombreux tube tout au long de sa course.

A l'époque de Cyrano, afin d'éviter une telle catastrophe, les hommes de l'art auraient été obligés de construire son engin volant avec du cuivre épais, et il n'aurait jamais pu décoller. Est-il possible de construire un tel engin avec la technique actuelle ? Cette question a fait l'objet d'un débat entre deux élèves de 5^eB de l'Ecole Notre Dame de la Providence à Enghien (ville proche du lieu d'origine de Cyrano). Avec les matériaux modernes, notamment la fibre de carbone, peut-on construire un récipient suffisamment léger et capable de résister à la pression atmosphérique ? Afin de trancher cette question par l'expérience et le calcul, la classe s'est mise au travail dans le cadre d'un projet pédagogique diversifié (PDD).

Coupe du monde oblige, les élèves ont donné au ballon « cyrano » la forme d'un dodécaèdre tronqué, autrement dit d'un ballon de football. Le dodécaèdre tronqué est un des solides décrit par Archimède (appelés « solides archimédiens »). Il existe d'autres solides réguliers qui sont les solides platoniciens : le tétraèdre (4 côtés triangulaires), le cube (6 côtés carrés), l'octaèdre (8 côtés triangulaires), le dodécaèdre (12 côtés pentagonaux) et l'icosaèdre (20 côtés triangulaires). Ces solides réguliers fascinaient les anciens : sous l'apparente simplicité des nombres de leurs arêtes et de leurs faces, de leurs volumes et des sphères qui s'y inscrivent, se cachent, sans aucun doute, les réponses aux mystères de notre univers.

Quant à notre ballon de football, il comporte 12 faces pentagonales et 20 faces hexagonales. Pour le réaliser, on découpe dans du cuir les 12 pièces pentagonales et 20 pièces hexagonales que l'on va assembler en les cousant. On mettra, ensuite, à l'intérieur un ballon en caoutchouc que l'on gonflera. Afin de réaliser leur ballon « cyrano » les collégiens ont fait le contraire : ils ont construit 12 pentagones en tube de fibre de carbone puis ils ont assemblé ces tubes afin d'obtenir une cage à 60 sommets.

Les pièces servant à relier les tiges de carbone sont des pièces de plastique standard pour modèles moléculaires (hybridation sp³). Les arêtes de 12cm de long sont sciées dans des flèches en fibre de carbone, sacrifiées par les jeunes archers du collège.

Le squelette de leur ballon ressemble à une grosse molécule, et ce n'est pas un hasard : il existe effectivement une classe de molécules qui possèdent un squelette de carbone de ce type : les fullerènes ou footballènes. Cette quatrième forme de carbone a été proposée par le professeur David Jones de l'Université de Newcastle dans les années soixante mais son article est, aujourd'hui tombé dans l'oubli. Il a fallu attendre 1986 pour que les fullerènes soient mis en évidence dans la suie par le chimiste, Harold Kroto. Il a baptisé ces molécules du nom de fullerènes en l'honneur de l'architecte américain, Buckminster Fuller, l'inventeur des « dômes géodésiques ». Le fullerène, de formule C₆₀, forme des petits cristaux transparents solubles dans le benzène. Avant cette date, on ne connaissait que trois formes de carbone : diamant, graphite et la forme « amorphe » du charbon. Les composés à la base des fullerènes possèdent des propriétés remarquables : certains sont des supraconducteurs à haute température. Soumises à une forte pression, ces molécules s'écrasent et les liaisons chimiques se réarrangent : on obtient de la poudre de diamant.

C'est, justement, le sort que les élèves voulaient éviter à leur ballon. Il faut se prémunir contre ce que les ingénieurs appellent le « flambage », c'est-à-dire la rupture brusque de symétrie d'un objet sous la contrainte, suivie d'une série de pliures ou de cassures catastrophiques. Si la structure quasi sphérique du ballon s'ovalise légèrement sous l'action de la pression atmosphérique, cette déformation va aller en s'amplifiant et la structure va céder. Les collégiens

ont résolu le problème de façon élégante en haubanant intérieurement le squelette de carbone avec du fil de kevlar. La structure ne peut, alors, plus s'ovaliser et les haubans internes déchargent les forces qui se concentraient sur les arêtes. Ils ont utilisé du fil de pêche multibrin très fin et très résistant. Ce fil supporte un poids de 20 kilogrammes. Chaque sommet du ballon a été relié aux cinq sommets opposés. Le solide obtenu est remarquablement résistant. Il peut tomber sans se briser et il rebondit comme s'il était constitué d'un élastomère très léger.

L'étape suivante consistera à réaliser un sac en filet ajusté et cousu autour du squelette puis d'enserrer le tout dans un grand sac poubelle en plastique, de sceller le sac avec un appareil chauffant de type « soud'sac » et de pomper

l'air progressivement, avec précaution. Cette étape de pompage est programmée en dehors de la présence des élèves, par mesure de sécurité. Evidemment, il n'était pas question de prétendre faire décoller ce ballon expérimental. Avec 60 centimètres de diamètre, il est trop petit pour que la poussée d'Archimède équilibre son poids.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Le diamètre du ballon est d'environ 59 centimètres (pour une longueur des arêtes de 12 centimètres). Son volume est donc $V = (4 \cdot \pi \cdot R^3)/3$ soit environ 0,107 m³. L'air a une masse volumique de 1300 g / m³ donc la masse de l'air déplacé par le ballon est de 139 g, qui est la valeur de la poussée d'Archimède. Le poids du squelette de fibre

de carbone, du sac et de la valve de bicyclette est supérieur à 300 g (sans compter le filet). Leur ballon ne pouvait donc pas décoller mais les collégiens voulaient tester le concept.

La fin de l'année est venue interrompre les expériences. Le professeur de sciences a bien tenté de faire un vide partiel dans le ballon à l'aide d'une trompe à eau sans attendre la réalisation du filet (il s'était muni, pour l'occasion, de lunettes, d'un casque de motocycliste et de protège tympan). Par chance pour les fenêtres de la salle de Travaux pratiques, la structure a résisté mais des fuites sont apparues aux endroits où le sac de plastique repose sur les sommets. Il faudra impérativement prévoir un filet et des protections en mousse afin d'éviter la crevaison du sac.

CONCLUSION

Les disciples de Cyrano ne sont pas parvenus à faire décoller leur ballon mais ils estiment (sans l'avoir calculé de façon précise) que la poussée d'Archimède sur un engin de plus de deux mètres de diamètre pourrait équilibrer largement son poids. En effet, la poussée d'Archimède augmente comme le volume, selon une loi en R³, alors que le poids augmente comme la surface, selon une loi en R². Pour un certain diamètre, les courbes du poids et de la poussée doivent donc se croiser.

La voie est ainsi tracée pour qu'une école d'ingénieurs ou bien une grande société aéronautique relève le défi lancé il y a trois cents ans par Cyrano de Bergerac.



Les élèves de 5^e et le squelette dodécaédrique du ballon.