

L'invention du ballon à air chaud

Claudette Balpe

Évoquant l'évasion, la puissance, mais aussi la simplicité car elle fonctionne sans moteur – et ne fait donc pas de bruit –, la montgolfière fascine aussi par son mystère : car enfin, comment une grosse nacelle accrochée à un ballon rempli de gaz peut-elle s'élever « toute seule » ? Les élèves seront aiguillonnés par le désir de comprendre « comment ça marche » autant que par celui de découvrir comment ses inventeurs l'ont imaginée et sont parvenus à la fabriquer.

Du mythe au jeu : comment s'élever dans les airs ?

Des fables de l'Antiquité au mythe d'Icare, puis aux machines imaginaires ou dessinées par Bacon et Léonard de Vinci – pour les plus célèbres de ces précurseurs –, le désir de s'élever dans les airs a toujours taraudé les hommes. Les enfants ont conservé ce rêve, d'où le plaisir qu'ils prennent à jouer avec des objets en papier, des ballons de baudruche, etc.

Le travail pédagogique peut commencer par un recensement des objets aériens sans moteur que connaissent les enfants ou avec lesquels ils jouent : avions ou fusées en papier, cerfs-volants, ballons de baudruche ou ballons de foire, parachutes ascensionnels, planeurs, etc. Cela pour permettre à la classe de se familiariser avec le sujet et pour commencer à dégager quelques caractéristiques.

Se pose d'emblée la question du comment de l'ascension. Les causes en sont vite repérées : énergie musculaire de la main qui lance l'avion en papier, force du vent et tension du fil pour le cerf-volant et le parachute ascensionnel, traction par un autre avion pour le planeur, etc. Plus mystérieux pour les enfants, le cas du ballon de foire renvoie implicitement à celui de la montgolfière, qui, elle aussi, se déplace apparemment toute seule dans l'air. C'est cet implicite qui est source de représentations erronées sur le fonctionnement de la montgolfière, et pas seulement chez les plus jeunes.

Si, lors de la discussion préliminaire, les enfants évoquent les avions ou les fusées, on argumentera de la présence d'un moteur (à combustion pour l'avion, à propulsion pour la fusée) pour mettre à part ces cas où le mouvement est provoqué par un dispositif de transformation de l'énergie produite lors d'une combustion. Cette distinction ne sera peut-être pas facile à comprendre pour les enfants car, dans le cas de la montgolfière, même si du gaz brûle sous l'orifice de l'enveloppe, le ballon n'est pas poussé par un moteur à combustion (comme l'est une voiture) : la combustion du gaz a seulement pour fonction de chauffer l'air contenu dans le ballon. Lorsqu'on arrête de chauffer, la montgolfière

ne tombe pas brutalement, elle peut continuer son ascension un petit moment encore puis redescendre au fur et à mesure que l'air du ballon se refroidit.

Opérer un classement permettra de se repérer et d'identifier les questions à poser. Les enfants recenseront les différents facteurs à prendre en compte dans le déplacement des objets aériens non motorisés : cause du déplacement, forme de l'objet (une fusée de papier ne plane pas comme un avion), nature du matériau, etc. Ils prendront ainsi également conscience de l'énigme que posent le déplacement du ballon de foire gonflé à l'hélium ou celui de la montgolfière : qu'est-ce qui les fait s'élever ? pourquoi ne se maintiennent-ils pas toujours en l'air ? comment les diriger ?

Deux pistes se présentent à l'enseignant pour enrichir les activités proposées dans ce chapitre :

- une piste historique : quels moyens les hommes imaginèrent-ils pour s'élever dans les airs avant qu'ils inventent les moteurs thermiques ? On en profitera pour rechercher comment était faite la première montgolfière (voir le cédérom) ;
- une piste scientifique ouvrant dans plusieurs directions, que nous explorerons ci-dessous : pourquoi un ballon de foire ou une montgolfière s'élèvent-ils seuls alors que celui gonflé par notre souffle finit par retomber au sol ? pourquoi chauffer l'air de la montgolfière ? Enfin, pourquoi les ballons gonflés à l'air chaud, comme ceux gonflés à l'hélium, se maintiennent-ils en l'air sans moteur ?

Savoir tirer profit de ses observations

Pour comprendre comment un ballon gonflé par l'air chaud comme l'était la montgolfière s'élève, l'enfant se heurte à différentes représentations initiales qui correspondent souvent à des croyances erronées. Ainsi pense-t-il qu'il suffit de gonfler n'importe quel ballon pour le voir s'élever ; de même, la description de la montgolfière lui fait croire que le ballon s'envole poussé par l'air chaud... Sa vision est mécanique. Or, son appréciation du mécanisme est fautive : il ne connaît que les forces de traction (à l'aide de fils, de tiges, etc.) et, ici, ne comprend pas « ce qui pousse ou tire le ballon ». L'enfant ignore la poussée d'Archimède, pourtant au cœur du processus de l'ascension. D'où la nécessité de lui permettre d'appréhender de façon qualitative les mécanismes de flottaison dans un fluide.

La poussée d'Archimède

Pour introduire la poussée d'Archimède, on peut évoquer l'expérience des enfants à la mer ou à la piscine : l'impression de peser moins lourd, d'être soulevé, notamment en faisant la « planche ». Cette notion est cependant complexe : divers facteurs interviennent en même temps, d'où la difficulté à l'étudier au niveau élémentaire. On recherchera essentiellement une approche simple et qualitative, sans chercher à établir aucune formule.

Pour cela, on pratiquera par manipulations en s'attachant, à chaque fois, à

comparer l'influence d'éléments pris deux à deux (rapport poids/volume/forme). Les quelques expériences suivantes constituent ainsi des situations-problèmes élémentaires.

Première expérience :

Matériel :

- cinq gobelets identiques en plastique dur (gobelets 1) ;
- des bacs en plastique (10 litres) transparents remplis d'eau ;
- une balance électronique précise au gramme près ;
- du sucre en poudre, de la semoule, de la pâte à modeler, du riz, du sirop de fruits.

Réunis en groupes, les élèves doivent remplir progressivement de sucre, semoule, etc., leur gobelet placé dans un bac en s'arrêtant avant qu'il ne prenne l'eau : c'est-à-dire jusqu'à la « limite de flottaison » (le bord du gobelet est au ras de l'eau, le reste est sous la surface, « immergé »). Une fois l'équilibre réalisé, la quantité de matière introduite dans le gobelet est pesée.

Les groupes mettent alors en commun leurs résultats et constatent généralement que les masses obtenues par chacun sont égales au gramme près entre elles malgré la différence de nature des produits utilisés.

Des questions s'ensuivent : notamment, que se passerait-il si on allégeait le gobelet ? Les élèves émettent leurs hypothèses puis les testent.

Lors des manipulations, chaque groupe mesure la hauteur émergente du gobelet et la relie à la masse de produit retirée. D'où un ensemble de résultats que l'on peut consigner dans un tableau à double entrée. L'analyse de la variation de la hauteur en fonction de la diminution de la masse permet d'établir une conclusion : pour un volume donné (celui du gobelet), plus la masse est allégée, plus le gobelet s'élève au-dessus de la surface de l'eau (on peut faire un tableau de mesures : masse/élévation).

Deuxième expérience :

Le matériel utilisé est le même que celui rassemblé pour la première expérience, à l'exception des gobelets, que l'on remplace par d'autres plus volumineux (plus larges et plus hauts) – ce seront les gobelets 2.

Pour comparer les gobelets 1 et 2, l'enseignant peut interroger la classe sur ceux qui présentent le plus grand volume, en demandant quelle expérience permettrait de vérifier la réponse avancée. Généralement, les groupes remplissent à ras bord un gobelet 2 et en versent le contenu dans un gobelet 1... qui déborde. On peut aussi recourir à un verre doseur pour mesurer exactement les volumes.

Une seconde question s'attache au problème suivant : que se passe-t-il si l'on verse dans le gobelet 2 la quantité de matière qui « fait flotter à ras bord » le premier ?

Les élèves émettent leurs suppositions (« Ça s'enfonce plus ou ça flotte mieux », etc.), réalisent l'expérience (avec le sucre, la semoule, etc., chaque

groupe travaillant avec le produit qu'il a utilisé au départ) et procèdent aux constatations : le gobelet 2 remonte à la surface de l'eau (émerge) quel que soit le produit concerné.

D'où la conclusion : pour une même masse, c'est le gobelet le plus volumineux qui assure la meilleure flottaison.

L'ensemble de ces manipulations permet ainsi de mettre en évidence la complexité du phénomène de flottaison, en une première approche du concept de poussée d'Archimède, tout en permettant d'approcher qualitativement – sans formule mathématique – les divers volets de sa signification concrète. On aboutira finalement à identifier et relier les deux facteurs qui interviennent : le volume et le poids.

Alors que nous avons travaillé jusque-là dans l'eau avec différents produits – sucre, semoule, etc. –, et que les conclusions ont été valables quel que soit celui employé, il reste maintenant à passer à l'air.

La dilatation de l'air

Une expérience peut montrer que chauffer l'air augmente son volume. On a besoin pour cela de deux bouteilles en verre identiques. Toutes deux seront débouchées et coiffées d'un ballon de baudruche et l'une sera placée au bain-marie. Les deux expériences peuvent être présentées par l'enseignant à l'ensemble des élèves, mais elles sont suffisamment simples pour être réalisées par les groupes devant leurs camarades.

L'enseignant invite les élèves à comparer les volumes et les masses des deux bouteilles : ils sont identiques deux à deux puisque les bouteilles sont les mêmes et qu'elles contiennent donc, au départ, la même quantité d'air. Après quelques minutes, la classe peut constater que le ballon coiffant la bouteille au bain-marie se gonfle. Comment expliquer ce phénomène ?

Les enfants font des suppositions et pointent les différences : l'air contenu dans la bouteille placée au bain-marie a été chauffé. On peut dès lors parvenir aux conclusions suivantes :

- pour un volume d'air identique au départ (celui de la bouteille), le ballon se gonfle au-dessus du goulot lorsque l'air est chauffé ;
- si la baudruche gonfle, c'est que l'air de la bouteille correspondante afflue vers le haut : il faut pour cela que l'air chauffé augmente de volume (on dit qu'il se « dilate ») ;
- le volume du dispositif (bouteille + ballon) a augmenté sans qu'on ait « rajouté d'air » : la masse de l'ensemble est donc conservée bien que le volume ait augmenté (ici, pour lever la confusion masse/volume, on peut peser l'équipage à froid puis à chaud – à condition d'aller vite...).

On retrouve là la conclusion de l'activité précédente : pour une même masse, c'était le gobelet qui avait le plus grand volume qui assurait une plus grande flottaison.

Après discussion, on peut, par analogie, imaginer que la bouteille soit remplacée par une « bulle d'air » et l'on comprendra que chauffée, cette bulle d'air

deviendra plus volumineuse. Il s'ensuivra donc, qu'à l'image du gobelet 2 – qui s'élève sur l'eau parce qu'il est plus volumineux –, la bulle, devenue plus grosse parce que chauffée, s'élèvera dans l'air. Et pour la montgolfière ? Plus l'air est chauffé, plus la masse contenue dans le volume est allégée et plus le ballon s'élève, une hypothèse que l'on vérifiera en en fabriquant une (voir plus loin).

Lorsque l'air contenu dans l'enveloppe de la montgolfière est chauffé, il se dilate, donc son volume augmente. Mais comme l'enveloppe qui le contient n'est pas extensible, une partie de l'air doit s'échapper par l'ouverture : il y aura donc une masse moindre d'air chaud dans l'enveloppe que lorsqu'elle était remplie d'air froid. La montgolfière remplie d'air chaud pèse finalement moins que la montgolfière remplie d'air froid et elle peut alors s'élever. Mais lorsqu'elle prend de l'altitude, l'air contenu dans l'enveloppe se refroidit, il diminue de volume. De l'air froid extérieur entre dans l'enveloppe : la montgolfière s'alourdit, et descend.

Une fois ces principes acquis, on s'interrogera sur le choix du gaz utilisé – l'air chaud pour la montgolfière, l'hydrogène pour le ballon inventé par le savant Charles à la même époque. On comprendra (en se référant aux données sur les gaz – 1 litre d'air froid pèse 1,3 g, 1 litre d'air chaud moins de 1 g et 1 litre d'hydrogène un dixième de gramme – et à des calculs sur les poids comparés de deux volumes égaux de gaz différents) qu'un ballon d'air chaud pèse davantage que le même ballon rempli d'hydrogène (ce gaz a été abandonné depuis la tragédie du dirigeable Hindenburg, en 1937).

À l'origine de la découverte

Ce travail sur la montgolfière est aussi l'occasion de faire prendre conscience aux enfants que cette invention marqua en fait l'aboutissement de tout un processus multiforme, à la fois technologique, scientifique, économique et politique. S'attacher à ceux qu'on a coutume d'appeler les « précurseurs » invite à déplacer la question du génie individuel vers celle de la pensée collective. L'étude des textes historiques permettra aux enfants de retracer les différentes étapes de l'invention de la montgolfière en examinant à rebours l'importance des faits de tous ordres annonciateurs de cette découverte.

Ainsi est-il intéressant de savoir que, bien avant de se lancer dans leurs travaux autour du ballon à air chaud, les frères Montgolfier s'intéressaient déjà à la navigation aérienne et aux propriétés des gaz sur lesquels ils avaient lu plusieurs ouvrages. Il conviendra à cet égard d'étudier le « Rapport fait à l'Académie des sciences, sur la machine aérostatique de MM. de Montgolfier » (voir le cédérom), lequel présente l'influence des différentes recherches antérieures.

La part du hasard sera encore minorée lorsque les enfants aborderont l'anecdote de la chemise de Joseph séchant devant la cheminée. Cet épisode serait resté sans conséquence si Joseph n'avait réfléchi en même temps au moyen de s'élever dans les airs tout en scrutant une gravure représentant le siège de

Gibraltar par les Espagnols...

La suite des différents essais laissera encore apparaître l'importance du rôle de l'Académie des sciences pour certifier la découverte, et celle de Louis XVI, qui espérait que cette découverte prometteuse lui permettrait d'accomplir son projet de transport d'hommes à des fins militaires – une idée que partageaient les académiciens, comme on peut le voir dans le rapport précité.

Enfin, les enfants pourront remarquer qu'au XVIII^e siècle, les inventeurs n'étaient pas forcément des savants. Que l'ingéniosité, la ténacité tenaient parfois lieu de savoir scientifique ou technique : l'analyse de la longue liste des essais menés par les frères Montgolfier, avec toutes les modifications et améliorations successives, mettra en lumière toutes les qualités leur ayant permis de parvenir à leurs fins.

Fabriquer une montgolfière et éprouver son fonctionnement

Les enfants ont étudié le principe physique qui prévaut dans le fonctionnement de la montgolfière, et ils savent désormais comment et pourquoi elle peut s'élever sans moteur dans les airs. L'histoire des frères Montgolfier montre bien qu'ils n'ont pas fait « voler » leurs engins avant de maîtriser les principes scientifiques expliquant leur « flottaison » dans le ciel. Mais de l'intellect à l'expérience vécue, la distance est grande...

Les enfants reproduiront un modèle déjà conçu. Car les problèmes qu'ils vont rencontrer seront surtout techniques, et redoutables à ce niveau ! Et ce d'autant qu'il leur faudra construire leur montgolfière avec les matériaux dont ils disposent dans la vie courante (cette utilisation d'éléments qui évoquent ceux utilisés par les frères Montgolfier apporte une dimension culturelle à laquelle les enfants sont sensibles). Les élèves ne disposent pas d'outils spécialisés, ni de colle ultraforte. Ils doivent découper soigneusement, ajuster... La coopération est nécessaire !

Pour assurer le succès de l'opération, l'enseignant doit organiser le travail des groupes en développant les « étapes de la fabrication », dans une démarche habituelle aux activités techniques menées en classe. C'est l'occasion pour lui de faire réfléchir les enfants sur l'organisation des tâches, le matériel nécessaire, les solutions techniques (quelle colle ? quel papier ?), les bons gestes, la répartition du travail, etc.

Quelques conseils sont disponibles sur le site <http://www.inrp.fr/lamap/activites/air/idees/temoignage/montgolfiere.htm> (voir également la fiche des Cemea en ligne sur le site de La main à la pâte).

L'école de Gourgé a suivi le protocole suivant :

Matériel :

- six feuilles de papier de soie de couleur ;
- du papier cartonné ;
- une paire de ciseaux ;

– le gabarit d'un demi-fuseau (il y aura donc six fuseaux).

Construction :

- prends les feuilles de papier de soie et plie-les en quatre ;
- prends le gabarit et trace ses contours avec ton crayon de papier sur les feuilles ;
- découpe sur les traits : tu obtiens des fuseaux qu'il faut décorer ;
- colle les fuseaux bord à bord de façon à obtenir l'enveloppe de la montgolfière ;
- découpe un cercle de papier de soie et colle-le en haut de la montgolfière pour que l'air ne passe pas par en haut.

Une fois la montgolfière construite, il faut la faire « s'envoler », et donc chauffer de l'air. On procède d'abord à l'étude des moyens de chauffage : sèche-cheveux, radiateur soufflant, décapeur thermique ou petit brûleur de camping-gaz. On peut aussi faire brûler un peu de produit combustible dans une grosse boîte au-dessus de laquelle on tiendra la montgolfière, qui se gonflera peu à peu (attention, quel que soit le moyen adopté, le chauffage devra se faire en extérieur, dans la cour de l'école). Un classement indiquera les propriétés, avantages ou limites de chacune de ces propositions. Le choix sera discuté et argumenté : si l'on choisit un décapeur thermique, il faut savoir que le temps de gonflage de la montgolfière sera beaucoup plus long qu'avec un camping-gaz ; mais si l'on a recours à ce dernier, il faudra prévoir un cylindre métallique qui fasse cheminée pour diriger l'air chaud dans la montgolfière, et encore ce dispositif nécessitera-t-il, pour éviter les pertes de chaleur, de maintenir étroitement serrée une collerette ininflammable sur le cylindre. On profitera du fait que les enfants soutiennent la montgolfière pendant le chauffage pour souligner que la réussite de l'opération demande que certaines conditions soient réunies : l'objet, fragile, doit être maintenu avec précaution, dans une position verticale, etc. Les élèves découvriront également l'importance de deux autres facteurs : le poids du papier (ils comprendront ainsi pourquoi le papier de soie est utilisé préférentiellement à un autre matériau) et un collage bien hermétique.

En classe élémentaire, un sèche-cheveux placé à l'ouverture permet de voir la montgolfière s'élever de quelques centimètres pour quatre ou cinq secondes de chauffage.

Intéressons-nous enfin à la nacelle de la montgolfière : quelle masse un ballon de 1 m^3 peut-il soulever ?

La force ascensionnelle est la différence entre le poids déplacé (air froid, $1,3 \text{ g/l}$) et le poids réel (air chaud, $0,77 \text{ g/l}$), soit environ $0,5 \text{ g/l}$. Plus on chauffe, plus l'air occupe de place : pour un volume donné, plus la différence entre le poids de l'air froid et celui de l'air chaud est grande, plus la force ascensionnelle est importante.

Un ballon de 1 m de diamètre a un volume d'environ $0,4 \text{ m}^3$, soit 400 l . On peut estimer qu'un tel ballon peut soulever environ 200 g ... masses de l'enveloppe et de la nacelle comprises.

La montgolfière aujourd'hui, ou la renaissance d'une technique

À la suite de l'invention des frères Montgolfier, toute l'Europe se prend d'engouement pour les « plus légers que l'air ». La course à la vitesse commence et, avec elle, la mode de la traversée de la Manche par aérostat. La concurrence entre Charles et Pilâtre de Rozier, l'un des pionniers des vols en ballon à air chaud, se solde par la mort du second : pour aller plus vite, il avait emmené avec lui un ballon à hydrogène, qui s'enflamma... Cet épisode mit en évidence le danger des ballons, quels qu'ils soient, et les ballons à hydrogène cessèrent brutalement d'être utilisés. Les montgolfières, quant à elles, seront presque abandonnées jusqu'à la seconde moitié du xx^e siècle : en effet, on ne pouvait transporter suffisamment de paille pour aller aussi loin qu'avec un ballon à hydrogène. Si, au début du xx^e siècle, Louis Godard invente le brûleur à propane, ce dernier est encore trop peu efficace pour redonner aux montgolfières une véritable utilité et il faut attendre les années 1960, avec l'invention de nouveaux matériaux et, surtout, l'utilisation de brûleurs à propane plus performants pour les voir réapparaître.

Les enfants pourront se renseigner sur les nouveaux usages de la montgolfière : elle réapparaît soit comme support publicitaire, soit comme objet de loisirs destiné aux amoureux d'ascensions aériennes.

Ce sera l'occasion pour la classe d'examiner une montgolfière moderne si l'on en a l'opportunité. Mais les élèves pourront déjà mener des recherches sur la structure de ces engins. Ils noteront l'importance des nouveaux matériaux utilisés pour la fabrication de l'enveloppe – matériaux non inflammables, légers, résistant à de hautes températures – et rechercheront les caractéristiques du brûleur et de son usage.

Le principe du brûleur à propane est très simple : le gaz contenu dans les bouteilles est sous pression, donc liquide. Il passe dans un serpentin de vaporisation, dans lequel il se détend et se vaporise : il peut alors être brûlé. L'air de l'enveloppe est ainsi chauffé jusqu'à une centaine de degrés et le ballon devient plus léger que le même volume d'air environnant. Le talent du pilote consiste à chauffer au bon moment. En effet, le brûleur n'est pas utilisé de manière continue mais par à-coups et, l'effet ne se faisant sentir qu'au bout d'une dizaine de secondes, le pilote doit anticiper le refroidissement du ballon.