Introduction

La physique doit plaire, c'est, nous dit-on, urgent : en ce début du troisième millénaire, l'audience baisse, nous allons manquer de physiciens. Bien des enseignants répondront qu'elle doit plaire de toute manière, dès lors qu'elle est proposée comme matière d'enseignement. Maintenant, comment plaire ?

Ce texte propose une réponse partielle. Partielle mais relative à un aspect essentiel, du moins pour de nombreux enseignants. Certes, les objectifs d'enseignement relèvent d'un choix avant tout politique. Mais pour choisir, il faut connaître ce qu'il y a d'accessible au catalogue, à un prix abordable. Il est question ici de la satisfaction intellectuelle de ceux qui apprennent[1]. Le lecteur jugera lui-même à quoi peut bien servir le fait que nos élèves éprouvent du plaisir à raisonner en physique. Ce texte s'attache à présenter des éléments susceptibles d'aider les enseignants qui le souhaitent à agir de manière plus accentuée sur ce terrain.

Les enseignants, bien sûr, cela compte beaucoup plus que les textes officiels, même si l'influence de ces derniers est forte. Si on leur parle de satisfaction intellectuelle, beaucoup diront qu'ils n'ont pas attendu des encouragements pour avoir cette belle ambition. Mais tant de contraintes s'interposent ! Le réalisme est donc un incontournable invité dans ce débat, et la modestie est nécessaire. Pourtant il n'est pas interdit d'envisager que les moyens à l'origine de tel ou tel effet bénéfique puissent se partager largement, dans un contexte réaliste d'enseignement ou d'information scientifique.

Dans quelle mesure et comment peut-on enseigner dans des conditions réalistes tout en favorisant la satisfaction intellectuelle de nos élèves ?

1 Plusieurs chercheurs ont inscrit l'expression même de « satisfaction intellectuelle » dans leur problématique de recherche. Ainsi Viennot L. (2006) Teaching rituals and students, intellectual satisfaction, *Phys. Educ.* **41**, 400-408 (http://stacks.iop.org/0031-9120/41/400) ; Feller I. (2008) *Usage scolaire de documents d'origine non scolaire en sciences physiques. Eléments pour un état des lieux et étude d'impact d'un accompagnement ciblé en classe de seconde*, Thèse, Université Paris Diderot (http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00366318/) ; Feller I., Colin P. & Viennot L. (2009) Critical analysis of popularisation documents in the physics classroom. An action-research in grade 10, *PE*C, 17**(17)**, 72-96 ; Mathé S. & Viennot L. (2009) Concern for coherence in journalists and science mediators-to-be: are they open to this prospect? *PEC,* 11 **(11)**, 104-128.

Chapitre 1

Comprendre : des outils incontournables

1.1 Des mots qu'il faut comprendre

Si l'on décide d'entrée que, pour s'approprier un raisonnement, un élève doit comprendre les termes employés, on tombe dans le registre « mission impossible ». Comprendre ? Oui mais jusqu'où ? Il faudrait chaque fois définir le niveau précis de compréhension visé, en tout cas celui qui permet une intelligibilité (minimale ?) d'un raisonnement donné. Donnons quelques exemples, juste pour attirer l'attention sur des pseudo-évidences que l'on peut souhaiter surveiller de plus près :

– Un texte de mécanique parle de « particule », ou de « point matériel ». Considérer qu'il s'agit d'un point de masse m est un peu court … et bien peu physique, vu la densité de masse infinie que cela semble impliquer. On peut souhaiter aller plus loin dans la compréhension de ce modèle.
– Un exercice d'optique amène à trouver la « région de l'espace » visible dans un miroir par un « œil » situé à telle distance de ce miroir, lequel est carré et de telle dimension. Un raisonnement mené en réponse à cette question devrait assumer une signification pour « région d'espace » (décrite via une longueur ? une surface ? un angle ? un angle solide ?) et « œil » (modélisé par un point ? une pupille suivie d'une lentille et d'un écran ? un système visuel comprenant la zone correspondante du cerveau ?)[12].
– Le fait qu'un mouvement soit « uniforme » ne concerne pas, dans les usages en cours, sa direction, mais dire qu'un champ vectoriel – magnétique par exemple – mérite cet attribut, c'est affirmer que sa direction est aussi partout la même : le décodage est indispensable, pour comprendre les raisonnements relatifs à ces domaines.

12 Voir Chapitre 4, Exercice 4.2.

La difficulté, s'il s'agit d'aider à l'appropriation d'un raisonnement, est de se situer juste à la limite, chez l'interlocuteur, entre la zone d'évidence où l'explicitation serait lassante et celle des incompréhensions insoupçonnées : si un terme chinois est inséré, la question du sens de ce terme se posera toute seule, mais rien n'attire l'attention sur un terme familier dont la signification n'est pourtant pas évidente. Cette question du sens des termes employés est cruciale en vulgarisation scientifique, même si elle est loin d'être la seule à faire obstacle. Ainsi l'usage des métaphores, déjà répandu au sein même des disciplines, y est porteur de bien des embûches : trous noirs et matière noire : s'agit-il du même noir ? Et, même en restant sur un terrain relativement scolaire et familier, cette question du sens des mots employés se pose de manière beaucoup plus aigüe que l'on ne pourrait le croire. Que dire de « l'agitation thermique », grande vedette de nos cours de thermodynamique, dès la classe de seconde : parle-t-on de vitesse, ou d'énergie cinétique[13] ?

Préciser le sens des mots : voilà typiquement un terrain où seuls les exemples prendront un éventuel intérêt, les discours généraux souffrant, eux aussi, d'une apparente évidence.

Les obstacles à l'appropriation d'un raisonnement sont parfois subtils, et résident dans des absences, dans ce qui n'est ni explicité ni évoqué par une image. Sans doute est-ce là la catégorie la plus représentée dans nos exemples. Mais, comme pour le vocabulaire, on est dans un registre appelant mesure et nuances : pas question de tout expliciter, évidemment. Les choix sont à faire en fonction des risques d'incompréhension, à évaluer donc en fonction de la cible.

Entre évidence, redondance et sous-estimation des difficultés, la marge est parfois faible et le parcours d'explication difficile à négocier. Point de règles générales ici, mais quelques exemples qui mettront en contraste la désinvolture dont l'usage d'enseignement ou de vulgarisation semble parfois témoigner et les bénéfices d'un effort d'explicitation à coût raisonnable.

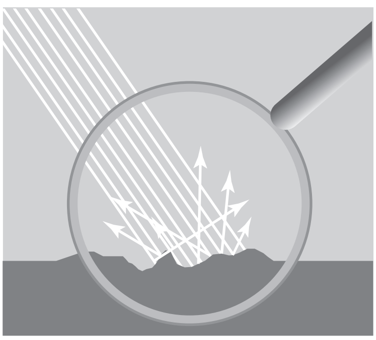
1.2 L'image : parle-elle vraiment d'elle-même ?

En collaboration avec Philippe Colin

Pour compléter l'explicitation verbale et/ou autoriser une description allégée, on peut choisir de s'appuyer sur une image. Puissant auxiliaire du discours, l'image n'a guère besoin d'être défendue, car elle n'est que peu questionnée par les enseignants. Pourtant, en analysant les enquêtes menées dans le sillage d'illustrations d'ouvrages

13 Voir Chapitre 3, notes 48 et 49.

d'enseignement ou de textes d'examen, elle peut éveiller des soupçons[14] : les figures 1.1 à 1.6 fournissent des exemples choisis en optique et susceptibles d'intervenir dans l'enseignement à un niveau élémentaire comme avec des étudiants plus avancés. Ces exemples d'image ne comportent pas, à proprement parler, d'erreurs, mais elle peuvent induire des interprétations qui, du point de vue de la physique, posent problème (références en note 14). Dans chaque figure, sont présentés sur la gauche des schémas ou figures recontrées dans les ouvrages scolaires ou universitaires dans un contexte qui est rappelé. Sur la droite de la figure, on trouve des interprétations formulées par les étudiants, éventuellement la légende qui peut poser problème et une mise au point de notre part ou une suggestion.



Interprétation d'élèves : Les « rayons » seraient des objets visibles …
« La loupe est utilisée pour montrer que les rayons sont très petits. » (Seconde)
« La loupe sert à voir la trajectoire des rayons qui sont infiniment petits et que nous ne pouvons pas voir. » (Terminale)
« La figure nous montre que la lumière se propage en ligne droite (grâce à la lumière blanche que l'on peut voir). » (Terminale)

Mise au point : Un faisceau lumineux éclaire la surface rugueuse et cette lumière est diffusée dans toutes les directions. Les « rayons » sont des outils théoriques et non des objets visibles.

Figure 1.1 - *A model for a rough surface which diffuses the light (Un modèle pour une surface rugueuse qui diffuse la lumière) d'après* KARPLUS[15]

14 COLIN P., CHAUVET F. & VIENNOT L. (2002) Reading images in optics: students « difficulties and teachers » views, *International Journal of Science Education*, **24** (3), 313-332 ; VIENNOT L., CHAUVET F., COLIN P. & REBMANN G. (2005) Designing Strategies and Tools for Teacher Training, the Role of Critical Details. Examples in Optics, *Science Education*, **89** (1), 13-27. Pour tout ce qui concerne interférences et diffraction, voir, dans le sillage de la thèse de P. COLIN : COLIN P. & VIENNOT L. (2000) Les difficultés des étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'imagerie optique, *Didaskalia,* **17**, 29-54 ; COLIN P. & VIENNOT L. (2001) Using two models in optics: Students, difficulties and suggestions for teaching, *Physics Education Research, American Journal of Physics Sup*. **69** (7), S36-S44. Pour un résumé sur ces thèmes : VIENNOT L. (2002) *Enseigner la Physique*, De Boeck, Bruxelles, chapitres 1 et 5.
De façon plus générale, la « grammaire de l'image » et ses modalités de décodage ont fait l'objet de très nombreuses études. Voir par exemple KRESS G. & VAN LEEUWEN T. (1996) *Reading Images: the Grammar of Visual design*, ROUTLEDGE & KEGAN Paul, London.

15 KARPLUS R. (1969) *Introductory physics. A model approach*, Benjamin INC., New York, W.A., 124.

2.3 La propagation des signaux mécaniques

Des signaux mécaniques comme une bosse sur une corde ou un son dans l'air peuvent se décrire par une onde dont la vitesse ne dépend que du milieu[26]. Que l'on demande maintenant ce qu'il advient lorsque l'émetteur du signal est plus puissant – la corde est secouée « plus fort » ou quelqu'un crie plus fort – et voilà qu'une bonne proportion des personnes interrogées[27] prédit que l'ébranlement se propagera plus vite. Pourtant l'énoncé enseigné – la vitesse ne dépend que du milieu – est connue chez ces personnes. Mais, ce qui est certain, c'est que celles-ci n'ont pas réalisé une partie de ce que cela signifiait, c'est-à-dire une chose surprenante : la puissance de l'impulsion n'intervient pas dans la vitesse de propagation.

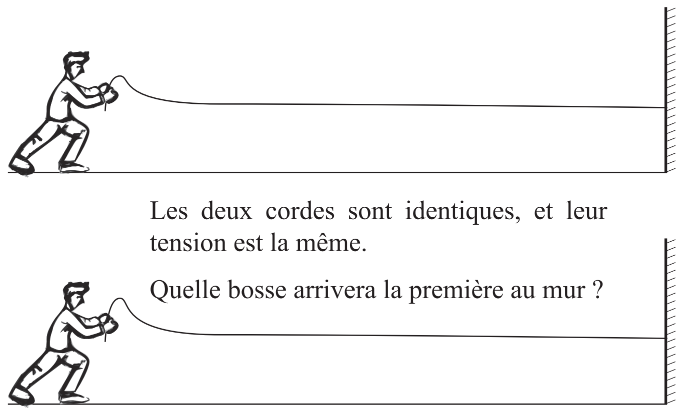


Figure 2.1 *- Une situation pour souligner la signification d'un énoncé bien connu : « Pour une corde tendue, la vitesse de propagation d'une bosse ne dépend que de la masse linéique et de la tension. » Dans ce modèle, la course de bosses est jouée d'avance : Egalité !*

Profiter d'une connaissance comme celle-ci, à l'énoncé rituel – la vitesse de propagation ne dépend que du milieu – implique de questionner pour les uns, de mettre en valeur pour les autres, une invariance surprenante. On mesure alors que les théories physiques ne sont pas juste un recueil d'analyses de situations que l'on sait traiter,

26 Ceci dans un milieu dit « non dispersif », où les ondes de fréquences variées se propagent toutes à la même célérité, la forme de la « bosse » se conservant. L'expression de la vitesse de phase (ou célérité) du son est $c = \left[\frac{RT\gamma}{M}\right]^{1/2}$, où R est la constante des gaz parfaits, M la masse molaire du gaz, T la température absolue et γ un coefficient dépendant du nombre d'atomes présents dans une molécule de gaz ; celle de la vitesse de propagation d'un ébranlement sur une corde est $c = \left[\frac{T}{\mu}\right]^{1/2}$ où T est la tension et μ la masse linéique de la corde.

27 Voir Maurines L. & Saltiel E. (1988) Mécanique spontanée du signal *Bulletin de l'Union des Physiciens*, **707**, 1023-1041 ; Viennot L. (1996) *Raisonner en physique*, De Boeck, Bruxelles, p 158-160.

5.3 L'effet Doppler version graphique

En collaboration avec Jean-Luc Leroy-Bury

Notre exercice de style unificateur peut sans peine être poussé plus loin.

Prenons l'effet Doppler, affaire de signaux qui se propagent, donc bon candidat au regroupement avec nos premiers exemples.

De quoi s'agit-il ?

On s'en souvient : des signaux périodiques (de période T_S ou de fréquence ν_S), leur source (S), un récepteur (R), une vitesse de propagation c (pour une onde : vitesse de phase, que nous notons **c** pour la lumière dans le vide). En cas de mouvement relatif entre récepteur et source (de vitesse relative v_R), la période de réception T_R est donnée par une relation du type $\frac{T_R - T_S}{T} = \frac{v_R}{c}$. Selon les cas[62], la période T à mettre au dénominateur s'identifie à T_R ou à T_S.

Comment le montrer, au-delà des classiques figures de fronts d'onde qui se rapprochent ou s'éloignent les uns des autres avec le mouvement de la source, ou que rencontre avec une plus ou moins grande fréquence un observateur qui se déplace ?

A une dimension[63], il est fréquent de représenter le phénomène à l'aide d'objets déposés par une source sur un élément transporteur (bouchons dans une rivière, tache d'encre sur un tapis roulant) lequel avance par rapport au milieu à la vitesse de propagation du signal c.

La source est susceptible de se déplacer à la vitesse v_S par rapport à ce même milieu. Ce modèle s'adapte facilement au cas où c'est le récepteur, voire la source et le récepteur, qui se déplace(nt) par rapport au milieu.

La figure 5.4 résume ce modèle élémentaire et le petit calcul qui conduit à la formule appropriée, dans le cas d'un récepteur qui s'éloigne d'une source.

62 Pour une source en mouvement par rapport à un milieu (v_S), récepteur immobile, $(T_R - T_S)/T_S = v_S/c$; pour un récepteur en mouvement (v_R), par rapport à un milieu, source immobile, $(T_R - T_S)/T_R = v_R/c$. Le cas de l'effet Doppler relativiste (c'est-à-dire de la propagation de la lumière dans le vide) légèrement plus complexe, n'est pas abordé ici. Pour de faibles vitesses relatives entre source et récepteur, toutes les expressions se rejoignent au premier ordre. Voir par exemple Bouyssy A., Davier M. & Gatty B. (1988) *Physique pour les sciences de la vie, tome 3 : les ondes,* Belin, Paris.

63 Toute la fin de ce chapitre est reprise d'une étude en collaboration avec J.L. Leroy Bury. En particulier, les figures sont reprises de l'une ou l'autre des publications suivantes : Leroy-Bury J.L. & Viennot L. (2003) Doppler et Römer : physique et mathématique à l'œuvre, *Bulletin de l'Union des Physiciens,* **859**, 595-1611 ; Viennot L. & Leroy J.L. (2004) Doppler and Römer: what do they have in common? *Physics Education*, **39** (3), 273-280.

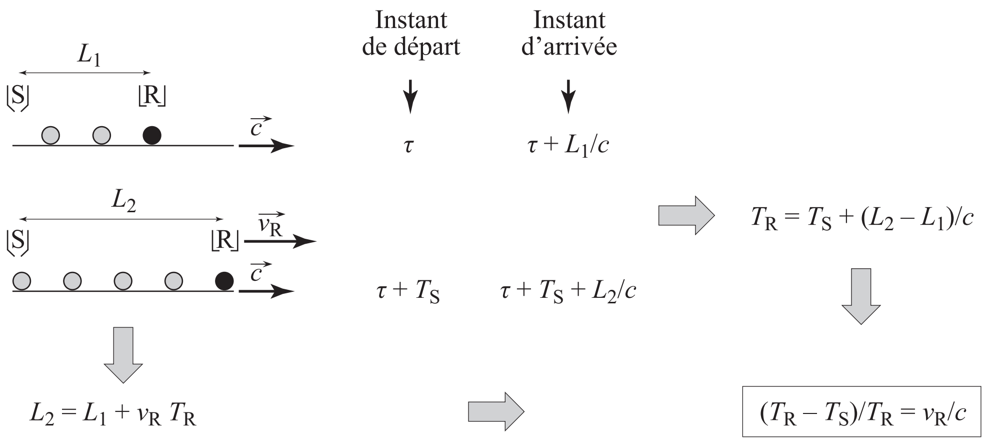


Figure 5.4 *- Exemple de modèle et de calcul élémentaires pour un cas d’effet* DOPPLER
Des taches sont déposées sur un tapis roulant (de vitesse c par rapport au milieu) par une source S (de période T_S, immobile par rapport au milieu). Les tâches sont recueillies par un récepteur R (de période T_R), en mouvement par rapport à la source à la vitesse constante $\vec{v_R}$

Quel rapport avec notre affaire de relation linéaire, à part la formule $d = vt$ évidemment à l’œuvre dans ce calcul ? Et même : où est le problème, s’il y en a un ?

Il y en a un. De nombreux élèves à divers niveaux pensent bien, avant ou après enseignement, que le décalage en période entre signaux reçus et émis est dû à la vitesse relative entre récepteur et source. En témoignent leurs « waaaaahhoouou » évocateurs de courses de formule 1, ainsi que des résultats d’enquêtes plus formelles[64]. Mais ils répondent aussi comme si, cette vitesse relative étant donnée, la distance comptait dans cette histoire, alors que cette grandeur ne figure pas dans la relation traduisant l’effet DOPPLER.

Ils ont de bonnes raisons de penser cela, chaque fois que distance et vitesse relative sont couplées. C’est le cas de la vitesse radiale (projetée sur la ligne qui joint source et récepteur) et de la distance au mobile lorsque, par exemple, une voiture de formule 1 passe à vitesse constante devant la tribune où est l’observateur, à bonne distance.

64 Références en note précédente.

Chapitre 6

Les rapprochements entre approches différentes d'un même phénomène

Le chapitre précédant rapprochait des phénomènes à première vue différents sous la bannière d'une même relation entre variables. Celui-ci déclinera le thème des liens d'une manière complémentaire : c'est ici un seul phénomène, ou du moins un seul contexte, qui rassemble nos réflexions. Il y sera question d'approches différentes, notamment par l'échelle de description adoptée : macro ou mésoscopique, ou même particulaire. Une fois encore, l'exemple sera banal, et la physique adaptée réputée simple.

6.1 Une montgolfière d'enseignement

Si l'on s'autorise un ton un peu caustique, on peut définir l'objet « montgolfière d'enseignement ». Pour une telle montgolfière, l'enveloppe ouverte à la base définit un espace intérieur de volume V, à l'intérieur duquel se trouve de l'air à température T_{int} et pression p_{int}. L'ensemble, voyageurs compris, a une masse M. Il faut bien simplifier, et oublier provisoirement, par exemple, les turbulences générées par les brûleurs pour admettre qu'il y a équilibre. Dans un premier temps, les résultats n'en pâtiront pas trop et l'on pourra peut-être comprendre déjà beaucoup de choses. L'extérieur est également à définir : de l'air à la pression atmosphérique ($p_{\text{ext}} = p_0$) et de température T_{ext}. Il est tout à fait courant[70] d'ajouter à la modélisation l'égalité des pressions intérieure et extérieure ($p_{\text{int}} = p_{\text{ext}} = p_0$), au motif que l'enveloppe est ouverte.

Une solution classique repose sur le théorème d'Archimède : la poussée de l'air extérieur sur l'ensemble est opposée au poids d'un volume V[71] d'air extérieur. Reste

70 A titre d'exemple : D.C. Giancoli (2005) Physics (6th ed): « Instructor Resource Center » CD-ROM, *Prentice Hall.*

71 En négligeant par rapport à cette valeur celle du volume des matériaux de la nacelle et des cordes de suspension.

à évaluer ce poids ainsi que celui de l'air intérieur, pour faire un bilan de forces qui puisse légitimer l'équilibre requis. Les poids en question, correspondant au même volume, se différencient par suite de valeurs différentes de la densité de l'air, elle-même liée aux variables déjà introduites par la relation des gaz parfaits, à peine transformée : $\rho = \frac{Mp}{RT}$. En trois ou quatre écritures facilitées par l'égalité des termes de pression, on peut relier les températures (via leurs inverses) et les données du problème[72]. Nous voilà en mesure de savoir jusqu'à quelle température chauffer l'air intérieur pour envisager un décollage, ou encore une stabilité ultérieure une fois en l'air.

6.2 Un rituel qui pactise avec l'incohérence

Faut-il s'inquiéter des simplifications inhérentes à cette approche commune du problème, classiquement proposée, notamment aux étudiants de première année universitaire ?

Certes oui. La physique, on le sait, commence par simplifier ses objets par la pensée. Mais là, on tombe sur une hypothèse qui, prise au pied de la lettre, enverrait la montgolfière au sol encore plus vite que le temps pris pour en saisir la raison. Si les pressions étaient, en tout point, égales à une valeur unique (« la pression atmosphérique »), la résultante des forces de pression sur l'enveloppe, de la part des gaz présents, serait nulle. En effet chaque portion de l'enveloppe subirait deux forces exactement opposées. Ou encore, aucune direction de l'espace ne serait privilégiée pour ce qui est des gaz : pourquoi pousseraient-ils alors vers le haut ? Ou encore, et c'est sans doute le plus choquant, utiliser le théorème d'ARCHIMÈDE, c'est exploiter la condition *sine qua non* de sa pertinence : l'existence de gradients de pression, accompagnateurs indispensables de l'hydrostatique en situation de gravité. La pression de l'air externe diminue entre le niveau de l'ouverture et celui du sommet. Il en est de même pour l'air interne. Mais comme celui-ci est moins dense, la pression diminue moins vite, de bas en haut, à l'intérieur qu'à l'extérieur. Partant d'une valeur considérée comme identique au niveau de l'ouverture, les pressions internes et externes ne sont plus égales ailleurs, notamment au sommet de la montgolgière :

72 Pour une montgolfière de masse totale m_c (pour les éléments solides), compte tenu de l'expression de la masse volumique ρ dans un gaz parfait de masse molaire (moyenne) M, $\rho = \frac{Mp}{RT}$ et du théorème d'ARCHIMÈDE, le bilan d'équilibre newtonien s'écrit : $m_c + \frac{M}{R}\frac{p_{\text{int}}}{T_{\text{int}}}V = \frac{M}{R}\frac{p_{\text{ext}}}{T_{\text{ext}}}V$. En admettant que les pressions moyennes intérieure et extérieure sont très voisines de leur valeur p_0 à l'ouverture, ce bilan conduit à la relation : $[1/T_{\text{ext}} - 1/T_{\text{int}}] = m_c\, R/(p_0 MV)$.

la plus élevée est la pression interne. On commence alors à saisir que l'enveloppe puisse être gonflée et maintenue en l'air malgré le poids de l'ensemble.

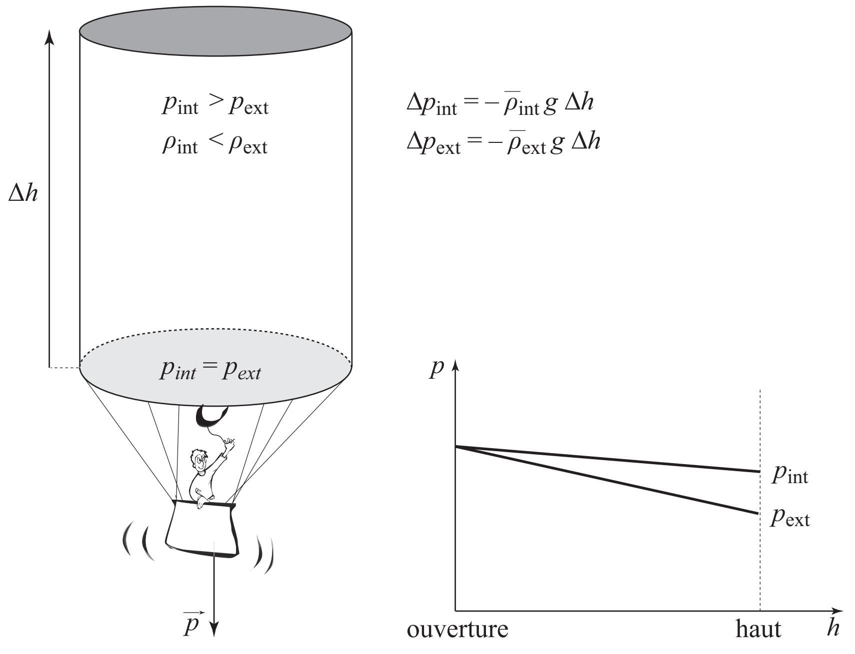


Figure 6.1 *- Eléments pour comprendre la sustentation d'une montgolfière, ici représentée avec une forme cylindrique pour faciliter la compréhension de l'effet des forces de pression sur l'enveloppe (voir le texte et la note 73).*

Cette analyse est résumée en figure 6.1 et illustrée avec une étrange montgolfière, cylindrique pour raison d'économie formelle : point besoin d'intégrale compliquée pour admettre (et même vérifier formellement) que le théorème d'ARCHIMÈDE se réconcilie avec l'analyse locale des forces agissant sur l'enveloppe. L'analyse globale qu'autorise le théorème du gradient[73] et sa conséquence en hydrostatique (l'expression de l'interaction d'ARCHIMÈDE) rejoint le bilan mécanique, local et plus direct, des forces en jeu. Deux approches, s'éclairant mutuellement, concourent à la

73 Théorème du gradient, applicable à une surface fermée S délimitant un volume V, et à un champ scalaire, ici p : $\iint_S p\,\overrightarrow{dS} = \iiint_V \overrightarrow{grad\, p}\; dV$; or dans un fluide en équilibre de masse volumique ρ on a $\overrightarrow{grad\, p} = \rho\, \vec{g}$. Le théorème d'ARCHIMÈDE en découle immédiatement.
Ce théorème amène ici à la relation $[1/T_{ext} - 1/T_{int}] = m_c\, R/(p_0 MV)$ (voir note précédente).
Autre approche, ici avec une montgolfière cylindrique de hauteur Δh et de surface de base S, on a au premier ordre, au niveau *du haut* de celle-ci : $p_{ext} \approx p_0 - \bar{\rho}_{ext}\, g\Delta h$ *et* $p_{int} \approx p_0 - \bar{\rho}_{int}\, g\Delta h$. La force de sustentation qui en découle sur la face horizontale supérieure, de surface S, équilibre le poids des éléments solides si et seulement si $m_c\, g = (p_{int} - p_{ext})\, S$, ce qui conduit à la même expression que par le traitement global $[1/T_{ext} - 1/T_{int}] = m_c\, R/(p_0 MV)$.