

Prévision de la trajectoire d'un ballon sonde stratosphérique

Le but de cette activité est d'établir la prévision de la trajectoire d'un ballon sonde stratosphérique.



Pas à pas et en répartissant les tâches sur un groupe d'élèves, l'activité permet d'obtenir la trajectoire du ballon en trois dimensions en 2h de travail. L'activité se compose d'un ensemble de fiches apportant les connaissances nécessaires aux élèves et qui ont un lien avec les notions abordées au programme du Brevet d'Initiation à l'Aéronautique (BIA, voir document « Programme BIA ballon sonde »). Les connaissances sont présentées de manière générales avec l'appui de fiches de travail «Fiches élèves» afin de permettre la pratique de la démarche d'investigation. Toute souplesse et liberté pédagogique est donnée afin de prendre en main l'activité et de l'intégrer dans un cours de BIA plus ou moins classique, en fonction des attentes de l'encadrant et des élèves. En fonction du niveau de ces derniers, en collège ou en lycée, des outils mathématiques sont proposés. Ils permettent aux élèves d'effectuer tout ou parti des calculs nécessaire à la prévision de la trajectoire.

L'activité atteindra son plein potentiel si elle est menée en parallèle d'un projet de développement d'un ballon au sein de l'établissement. Le principe est de construire une nacelle en matériaux légers embarquant différents capteurs développés par les élèves et mesurant les paramètres physico-chimiques de l'atmosphère tels que la pression, la température, l'humidité, la luminosité. Les nacelles peuvent aussi embarquer des caméras et un traceur GPS. Si le suivi GPS en temps réel est à la portée du groupe de jeunes, la prévision de la trajectoire et le trajet réel pourront alors être comparés.



Développement d'activités de formation pratiques préparant au BIA à l'aide de ballons sondes

Plusieurs enseignants et animateurs qui ont mené des projets ballon avec leurs élèves ont publié leurs savoir faire ainsi que les activités expérimentales qu'ils ont menées sur leur site internet ou sur Eduscol. Quelques mots clés sur les moteurs de recherche permettent de les trouver.

Lorsque l'on débute dans ce genre de projet, il n'est pas évident de prendre en main tous ses aspects. Des organismes proposent d'aider les jeunes et les encadrants dans leur démarche. Un des plus connus est l'association Planète Sciences qui est le partenaire historique du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) dans ce type d'opération. L'opération CNES/Planète Sciences correspondante est l'opération Un Ballon Pour l'Ecole (UBPE). Dans certaines régions, les associations de radio-amateurs sont aussi des partenaires de poids dans ce type de projets.

Même si les ballons de jeunes sont des ballons considérés « légers » il convient de prévenir les autorités aériennes nationales et européennes, civiles et militaires, lors d'un lâcher de ballon. Notamment il faut monter un dossier au niveau de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Il est de plus responsable de se couvrir en cas de problème par une assurance et d'être expérimenté dans la mise en œuvre de la chaîne de vol le jour du lâcher. C'est ce qu'offre en général le travail avec un partenaire professionnel. Le CNES et Planète Sciences prennent en charge toutes les démarches et les assurances. Ils mettent de plus à la disposition de l'encadrant des jeunes un soutien technique et scientifique, le matériel nécessaire au lâcher (réflecteur, parachute, ballon, hélium, télémètre), ainsi que les compétences d'un aérotechnicien agréé.

L'activité présentée s'appuie sur les supports bibliographiques suivants :

- "Prévision de la trajectoire d'un ballon", version 7, Avril 2010, Planète Sciences/CNES
- Wikipedia

Le modèle

L'association Planète Sciences et le CNES mettent à disposition des applications permettant de prévoir la trajectoire d'un ballon sonde. Elles sont régulièrement utilisées par leurs aérotechniciens. Leurs fonctionnements est entièrement décrit dans le document associé "Prévision de la trajectoire d'un ballon", version 7, Avril 2010. A toute fin utile il est intéressant d'utiliser ces applications pour comparer les résultats qui seront obtenus avec les outils pédagogiques proposés aux élèves.

Le modèle utilisé dans la présente activité est très proche du modèle Planète Sciences. Seule la surface du parachute et la prise en compte de l'altitude à culmination diffèrent.

Préparation de la séance :

La séance est prévue pour durer environ 2h si les élèves mènent l'ensemble des calculs sans les outils. Toutefois les relations entre l'altitude, la pression et la masse volumique de l'air comportent une fonction exponentielle dont les coefficients dépendent de l'altitude. Ainsi les outils de calculs devraient être utilisés au moins pour ces relations. On peut aussi pré-remplir les colonnes des feuilles de calcul correspondantes pour simplifier l'activité. En effet il suffit que les élèves aient compris la manière dont la pression et la masse volumique de l'air dépendent de l'altitude. Le coeur de l'activité repose sur la compréhension et le calcul des vitesses ascensionnelles, de chute, de dérive vers le Nord et vers l'Est du ballon.

Pour préparer la séance il faut au minimum :

- Télécharger les données NOAA les plus récentes et en faire une fiche avec le windgram sous forme graphique au recto et au format texte au verso. L'outil "Import NOAA data.ods" permet d'importer ces données sur une feuille de calcul. Elles ils seront plus facilement lisibles.
- Choisir une précision pour les calculs et calculer toutes les valeurs du modèle avec les feuilles de calcul "Prévision groupe – enseignant". Il est important de bien connaître l'altitude à culmination du ballon pour limiter le nombre de couches atmosphériques à faire prendre en considération aux élèves. En général, un ballon de jeune est gonflé pour atteindre la dernière couche du modèle et donc il faut considérer toutes les couches.
- Préremplir les feuilles de calcul "Prevision groupe" avec les données que les élèves ne devront pas estimer, laissées à l'appréciation de l'encadrant.
- Imprimer les fiches communes. On fera un ou plusieurs lots de fiches en fonction de la gestion de la séance souhaitée (travail seul, en binôme sans déplacements dans la salle, interaction entre plusieurs binômes, ...).
- Imprimer les fiches élèves.

Déroulement de la séance

Il faut utiliser une salle équipée avec un vidéoprojecteur et des ordinateurs avec tableurs et connectés à internet. Veiller à ce que Google Earth soit installé et fonctionne correctement au niveau du serveur de l'établissement.

- Introduire l'activité en lien avec le cours de BIA et/ou le projet ballon mené par les élèves.
- Expliquer comment la trajectoire d'un ballon peut être calculée. Expliquer la structuration de l'atmosphère, l'ascension et la chute d'un ballon, que la vitesse et la direction des vents et donc du ballon dépendent de l'altitude. Afficher le windgram NOAA et l'expliquer.
- Afficher les feuilles de calcul "Prévision groupe" au vidéoprojecteur. Expliquer aux élèves qu'ils devront y reporter leurs résultats de calcul de trajectoire. Le travail est réparti sur l'ensemble des élèves de la classe. En fonction du nombre d'élèves, on peut attribuer une couche par élève ou plus, une ou deux couches par binôme, ...
- Distribuer les fiches aux élèves. Tous les élèves reçoivent un lot de 4 fiches élèves. Chaque élève doit remplir les quatre fiches. Les fiches 2 et 3 correspondent aux calculs spécifiques d'une couche atmosphérique.
- Mettre à disposition des élèves le lot de fiches communes contenant les connaissances.
- Mettre à disposition ou non tout ou partie des outils de calcul.
- Expliquer aux élèves que lorsqu'ils ont fini de compléter la fiche 2, ils doivent la faire valider par l'encadrant et aller mettre les résultats sur les feuilles de calcul projetées au tableau.
- Démarrer la séance de travail.
- Lorsque le tableau est complet, les élèves peuvent l'utiliser pour compléter la fiche 3.
- Expliquer aux élèves que lorsqu'ils ont fini de compléter la fiche 3, ils doivent la faire valider par l'encadrant et aller mettre les résultats sur les feuilles de calcul projetées au tableau.
- Lorsque toutes les données ont été remplies par les élèves, expliquer aux élèves comment la mise en commun de leurs calculs permet d'obtenir la trajectoire.
- Obtenir la trajectoire avec les élèves. Produire le fichier 3D .kml et le distribuer aux élèves.
- Les élèves affichent la trajectoire 3D sur Google Earth et complètent leur fiche 4.
- Conclure sur la séance.

En fonction du degré d'autonomie des élèves et du temps à disposition, on peut leur laisser plus de liberté dans une démarche d'investigation. Ils devront par exemple comprendre par eux-même qu'il faut faire les calculs par couche atmosphérique et qu'il est nécessaire de répartir le travail pour gagner en efficacité. Des élèves possédant une bonne maîtrise du tableur pourraient automatiser les calculs pour chaque couche atmosphérique.

Si un projet ballon est mené en parallèle des cours, on peut prévoir un temps pour comparer le résultats des calculs à la trajectoire réelle, notamment les coordonnées du point de chute.

Utilisation des fiches élèves

Fiche élève 1

Les élèves y reportent les caractéristiques de leur chaîne de vol. La masse d'hélium se calcule grâce à la formule donnée dans la fiche "Forces". Ils complètent aussi le graphique avec les valeurs des forces intervenant et les altitudes d'éclatement et de plafonnement. Ils utilisent pour cela les fiches "Forces", "Culmination", "Pression atmosphérique" et "Densité air". Les élèves expliquent aussi comment l'action de l'air intervient sur le ballon, l'origine des forces et le vol du ballon. Pour cela ils s'appuient sur les fiches communes à disposition et les explications de l'encadrant.

Dans le plan horizontal le ballon est soumis à l'action des vents. Les frottements étant importants, le ballon va à la même vitesse et dans la même direction que les vents. Lors de l'ascension, le ballon monte à cause de la poussée d'Archimède. La densité de l'air étant plus élevée à l'extrémité inférieure du ballon qu'à celle supérieure, la force de pression y est plus importante. Ainsi le ballon est plus poussé vers le haut que poussé vers le bas. Il s'élève. Le poids et les frottements s'opposent à cette force et la compensent. D'après le principe d'inertie, la chaîne de vol évoluerait à vitesse constante. Mais comme cette vitesse dépend de la masse volumique de l'air, elle va augmenter en montant. Voir à ce sujet la fiche "Vitesse verticale". Lors de la descente, la chaîne de vol est soumise à l'attraction terrestre qui la ramène vers le sol. Les frottements de l'air s'opposent à cette force et la compensent. D'après le principe d'inertie, la chaîne de vol évoluerait à vitesse constante. Mais comme cette vitesse dépend de la masse volumique de l'air, elle va diminuer en descendant. Le ballon va éclater car son altitude d'éclatement est inférieure à l'altitude de plafonnement.

Fiche élève 2

Chaque élève ou groupe remplit une à deux fiches. Il reporte dans l'encadré l'isobare des données NOAA qui lui a été attribuée ainsi que les valeurs de la direction et de la vitesse du vent correspondant. On peut représenter la hampe de vent dans la rose des vents. Les conversions sont effectuées avec la fiche "Vents". Les vitesses vers le Nord et vers l'Est sont obtenues par projection :

$$v_{\text{Nord}} = v \cdot \cos(\text{direction} + \pi)$$
$$v_{\text{Est}} = v \cdot \sin(\text{direction} + \pi)$$

Pour chaque isobare, l'altitude et la masse volumique sont données par les formules des fiches "Pression atmosphérique" et "Densité air". Les forces à la montée et à la descente sont calculées à partir des formules de la fiche "Forces".

Fiche élève 3

A partir des données des fiches élève 2, les élèves reportent l'altitude inférieure et supérieure de la couche dont ils ont la charge. Ils en déduisent son épaisseur et les vitesses moyennes du vol du ballon vers le Nord, vers l'Est, lors de la montée et lors de la descente. Le temps passé dans la couche est calculé en divisant l'épaisseur par la vitesse ascensionnelle ou de chute. Les dérives en mètres vers le Nord et vers l'Est se calculent en multipliant les vitesses moyennes par le temps passé dans la couche. Les conversions en degrés de latitude et de longitude se font à partir de la fiche "GPS". Comme les degrés de longitude dépendent de la latitude, l'encadrant pourra donner la correspondance d'un degré de longitude pour la latitude du lieu de lâcher pour aider les élèves.

Fiche élève 4

On y reporte les résultats de la trajectographie.

Utilisation des feuilles de calcul "Prévision groupe – enseignant"

Ce fichier est destiné à l'encadrant. A partir du téléchargement des données NOAA il permet d'établir automatiquement la trajectoire prévisionnelle du ballon. Il permet de préparer la séance de travail en classe en calculant toutes les valeurs qu'auront à estimer les élèves, avec la précision souhaitée. Les calculs sont menés exactement de la même manière qu'avec les feuilles de calcul "Outils de calcul". Toutefois la prévision enseignant est prévue pour la trajectographie d'un ballon de 1200 g culminant dans la dernière couche atmosphérique du modèle NOAA. C'est le but recherché lors d'un lâcher de ballon : atteindre l'altitude maximale possible pour un ballon sonde. Si ce n'est pas le cas, il faudra en conséquence modifier certaines valeurs et formules des feuilles de calcul.

Ouverture et utilisation des feuilles de calcul :

A l'ouverture il faut activer les macros et donc changer les règles de sécurité les concernant dans les options du tableur utilisé. La macro sert uniquement à générer la trajectoire 3D. Elle n'est donc pas utile si on utilise les feuilles de calcul dans le seul but d'obtenir les coordonnées du point de chute.

Les feuilles de calcul présentent les données que doivent obtenir et reporter les élèves sur leurs fiches. Par rapport aux feuilles "Prévision groupe", seules les trois premières feuilles sont en plus. Les feuilles de calcul et les paramètres à modifier sont indiqués en rouge et en gras. Elles s'utilisent une par une, de la gauche vers la droite.

Feuille de calcul "Précision du modèle" :

Sur cette feuille on peut ajuster la précision du modèle en modifiant le nombre de chiffres après la virgule pris en considération dans les calculs pour chaque grandeur. En effet un nombre trop important de chiffres dans une grandeur peut être laborieux à reporter sur les fiches de calculs et donc source d'erreur. S'il est trop faible, la précision ne sera pas suffisante. Les valeurs par défaut donnent de bons résultats sans donner des nombres avec trop de chiffres à reporter. On peut réduire toutes les grandeurs à aucun chiffre après la virgule sauf pour le calcul de la masse volumique qui nécessite au moins deux chiffres et les coordonnées GPS qui nécessitent au moins 4 chiffres après la virgule.

Feuille de calcul "Chaîne de vol" :

Dans cette feuille il faut spécifier les caractéristiques de la chaîne de vol. Elle correspond à la "Fiche élève 1". Plus les valeurs seront proches des valeurs réelles, plus la prévision sera réaliste.

Feuille de calcul "Vents" :

Pour la compléter il faut télécharger les données NOAA les plus récentes à disposition et copier-coller la prédiction de la direction et de la vitesse des vents en fonction de la pression correspondant au jour et à l'heure du lâcher de ballon. L'heure est donnée en UTC. Il faut ajouter +2 en été et +1 en hivers. Pour lire les données NOAA on peut utiliser l'outil "Import NOAA data.ods".

Feuille de calcul "Données" :

Elle correspond aux calculs que doivent effectuer les élèves dans la "Fiche élève 2". Elle présente les valeurs des forces agissant sur le ballon à la montée et à la descente, les coordonnées GPS du point de lâcher dont les valeurs les plus précises possibles sont à spécifier. La feuille calcule aussi la pression, la masse volumique et l'altitude à culmination et plafonnement du ballon.

Feuille de calcul "Isobares" :

Cette feuille calcule les différentes vitesses pour les altitudes du modèle NOAA. Ce sont les valeurs que doivent obtenir les élèves en exploitant le reste de la "Fiche élève 2".

Feuille de calcul "Couches atmosphériques" :

Avec les deux suivantes, la feuille correspond aux calculs que doivent effectuer les élèves dans la "Fiche élève 3". Elle évalue pour chaque couche atmosphérique les vitesses moyennes ascensionnelles, de chute, de dérive vers le Nord et vers l'Est du ballon.

Feuilles de calcul "Montée" et "Descente" :

Pour chaque couche sont présentés les valeurs de son épaisseur, du temps passé par le ballon pour la traverser, et de la dérive du ballon vers le Nord et vers l'Est en mètres et en degrés.

Feuille de calcul "Trajectoire" :

Cette feuille utilise les données des feuilles précédentes pour estimer la trajectoire du ballon en fonction du temps : altitude, position en mètres et coordonnées GPS en degrés.

Feuille de calcul "Feuille de vol" :

Elle fait le bilan du vol du ballon : coordonnées du point de lâcher, du point d'éclatement et du point de chute, durées du vol, distance parcourue à vol d'oiseau et vitesse moyenne. Elle correspond à la "Fiche élève 4".

Construction et affichage du fichier 3D .kml :

Une fois les calculs terminés il suffit de cliquer sur l'icône "Build KML file" dans la barre de menu et de spécifier un nom de fichier. Le fichier est enregistré dans le même répertoire que les feuilles de calcul.

Utilisation des feuilles de calcul "Prévision groupe"

Les feuilles de calculs sont vidéoprojetées pour l'ensemble de la classe. Au fur et à mesure de leur avancé, les élèves viennent y ajouter leurs résultats.

Feuilles de calcul "Données" et "Isobares" :

Les élèves y inscrivent les résultats de la "Fiche élève 2". Concernant les données, plus les valeurs seront proches des valeurs réelles, plus la prévision sera fiable. Le plus difficile est d'obtenir précisément le volume d'hélium réellement introduit dans le ballon. Il peut être estimé grâce aux détendeurs lors du gonflage du ballon ou par calcul grâce à la fiche "Fiche de lacher". Une bonne méthode est sa mesure en attachant le ballon gonflé à un dynamomètre. On peut aussi prendre une photographie du ballon avec une échelle disposée juste à côté pour une estimation géométrique.

Feuilles de calcul "Couches atmosphériques", "Montée" et "Descente" :

Les élèves viennent y inscrire les résultats de la "Fiche élève 3".

Feuilles de calcul "Trajectoire" et "Feuille de vol" :

Ces feuilles reprennent les résultats de la précédente pour construire point par point la trajectoire du ballon.

Construction et affichage du fichier 3D .kml :

Une fois les calculs terminés il suffit de cliquer sur l'icône "Build KML file" dans la barre de menu et spécifier un nom de fichier. Le fichier est enregistré dans le même répertoire que les feuilles de calcul.