

# Résolution de problème en CPGE

GRIESP

2014-2015

## Résumé

Ce document présente l'activité de résolution de problèmes dans le cadre des enseignements de physique-chimie en classes préparatoires aux grandes écoles et propose différents exemples. Il fait suite à celui publié en juillet 2014 et intitulé « Résoudre un problème dès la seconde<sup>1</sup> » dont certaines ressources peuvent être exploitées en début de formation en classe de première année de CPGE.

## Sommaire

<b>I- Présentation</b>	<b>2</b>
1. Introduction . . . . .	2
2. Quels sont les contours d'une activité de résolution de problèmes? . . . . .	2
3. Quels sont les intérêts pédagogiques d'une activité de résolution de problèmes? . . . . .	4
4. Comment former les étudiants à la résolution de problèmes? . . . . .	5
5. Comment évaluer les étudiants lors de résolution de problèmes? . . . . .	6
<b>II- Banque de ressources</b>	<b>8</b>
1. Bibliographie - sitographie . . . . .	8
2. Présentation des exemples . . . . .	8
3. Exemples . . . . .	9
<b>Index</b>	<b>235</b>

Retrouver ce document sur le portail national physique-chimie (Éduscol) :  
<http://eduscol.education.fr/physique-chimie/>

---

1. Le document est téléchargeable à l'adresse suivante : <http://eduscol.education.fr/physique-chimie/actualites/actualites/article/resoudre-un-probleme-de-physique-chimie-des-la-seconde.html>

## I- Présentation

### 1. Introduction

La résolution de problèmes a été explicitement introduite dans les nouveaux programmes de CPGE après l'avoir été en spécialité physique-chimie de la classe de terminale S. L'aptitude à résoudre un problème fait partie des grandes compétences du XXI<sup>e</sup> siècle. D'après l'OCDE, on constate ces dernières décennies une forte augmentation des emplois requérant de solides compétences en résolution de problèmes. Cette compétence est également citée par la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI) lorsqu'elle décrit les capacités et compétences générales des ingénieurs diplômés.<sup>2</sup>

La mission des classes préparatoires aux grandes écoles est double : il s'agit d'une part de préparer les étudiants aux concours d'entrée aux grandes écoles et, d'autre part, de contribuer à développer des qualités qui leur seront utiles dans l'exercice de leur futur métier d'ingénieur ou de chercheur. La formation à la résolution de problèmes est un des éléments de formation en mesure de développer chez eux l'initiative, l'autonomie et l'aptitude à s'engager.

Ce document vise à proposer aux professeurs des pistes pour former les étudiants à la résolution de problèmes et des exemples de situations support de cette formation. Les propositions formulées n'ont naturellement aucun caractère normatif ni prescriptif. Les compétences mobilisées et la problématique de l'évaluation formative ou sommative seront également présentées car elles sont indissociables d'un apprentissage explicite, efficace et structuré.

### 2. Quels sont les contours d'une activité de résolution de problèmes ?

#### a) La résolution de problèmes dans les programmes de CPGE

Ce type d'activité est décrit dans le préambule du programme de physique-chimie de CPGE dans les termes suivants :

« Dans l'acquisition de l'autonomie, la « résolution de problèmes » est une activité intermédiaire entre l'exercice cadré qui permet de s'exercer à de nouvelles méthodes, et la démarche par projet, pour laquelle le but à atteindre n'est pas explicite. Il s'agit pour l'étudiant de mobiliser ses connaissances, capacités et compétences afin d'aborder une situation dans laquelle il doit atteindre un but bien précis, mais pour laquelle le chemin à suivre n'est pas indiqué. Ce n'est donc pas un «problème ouvert» pour lequel on soumet une situation en demandant «Que se passe-t-il?». L'objectif à atteindre doit être clairement donné et le travail porte sur la démarche à suivre, l'obtention du résultat et le regard critique porté à ce résultat.

La résolution de problèmes permet de se confronter à des situations où plusieurs approches sont possibles, qu'il s'agisse de la méthode mise en œuvre ou du degré de précision recherché. Ces situations se prêtent bien à une résolution progressive pour laquelle un premier modèle permettra d'obtenir rapidement un résultat, qui sera ensuite discuté et amélioré. Cette résolution étagée doit permettre à tous les étudiants d'aborder le problème selon leur rythme en s'appuyant sur les compétences qu'ils maîtrisent.

C'est sur la façon d'appréhender une question scientifique, sur le choix raisonné de la méthode de résolution et sur les moyens de vérification qu'est centrée la formation de l'étudiant lors de la démarche de résolution de problème. »

Il s'agit d'offrir aux étudiants des situations adaptées aux objectifs visés en matière de maîtrise des compétences et s'inspirant modestement de l'activité authentique d'un scientifique.

#### b) La résolution de problèmes sous l'éclairage des compétences

D'un point de vue pédagogique, ce type d'activité s'apparente à une tâche complexe, c'est-à-dire une tâche dont la résolution amène l'étudiant à utiliser, en les articulant, des ressources internes (culture, capacités, connaissances, etc.) et externes (documentation scientifique, aides méthodologiques, protocoles, notices, recherches sur Internet, etc.). Cette tâche complexe demande donc à l'étudiant de mettre en œuvre un ensemble de capacités et de compétences, ciblées par le professeur ; le tableau 1 (extrait du programme officiel) propose, pour la résolution de problème, une synthèse organisée des compétences et capacités associées, la liste des capacités n'est pas exhaustive.

2. On pourra consulter l'adresse suivante : [http://fond-documentaire.cti-commission.fr/fr/fond\\_documentaire/document/10/chapitre-element/450](http://fond-documentaire.cti-commission.fr/fr/fond_documentaire/document/10/chapitre-element/450)

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faire un schéma modèle.</li> <li>- Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> <li>- Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>- Relier le problème à une situation modèle connue.</li> <li>- ...</li> </ul>
Établir une stratégie de résolution (analyser).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposer le problème en des problèmes plus simples.</li> <li>- Commencer par une version simplifiée.</li> <li>- Expliciter la modélisation choisie (définition du système, ...).</li> <li>- Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>- ...</li> </ul>
Mettre en œuvre la stratégie (réaliser).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>- Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> <li>- Utiliser l'analyse dimensionnelle.</li> <li>- ...</li> </ul>
Avoir un regard critique sur les résultats obtenus (valider).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- S'assurer que l'on a répondu à la question posée.</li> <li>- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>- Comparer le résultat obtenu avec le résultat d'une autre approche (mesure expérimentale donnée ou déduite d'un document joint, simulation numérique,...).</li> <li>- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue.</li> <li>- ...</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présenter la solution ou la rédiger en expliquant le raisonnement et les résultats.</li> <li>- ...</li> </ul>

TABLE 1 – Compétences et capacités associées pour les résolutions de problèmes.

Il convient de souligner que la compétence «être autonome, faire preuve d'initiative», non mentionnée ci-dessus, est transversale. Elle est souvent mobilisée sur l'ensemble de l'activité de résolution de problèmes et elle participe à la définition du niveau de maîtrise des cinq autres compétences.

### c) La résolution de problème du point de vue de la démarche

Il est possible de dégager quelques invariants concernant la résolution de problèmes scientifiques où l'étudiant, confronté à une question précise, est amené à :

- prendre des décisions : sachant que les chemins de résolution sont multiples, la créativité, l'engagement doivent être encouragés (compétence «être autonome, faire preuve d'initiative») ;
- articuler des données issues de son expérience personnelle, de ses acquis et des documents mis à disposition. Les données utiles ne sont pas apportées par l'énoncé de manière séquentielle et locale, mais elles peuvent être regroupées au début ou à la fin du document présentant la résolution de problème ; il peut y avoir des données inutiles mais aussi des données manquantes que l'étudiant devra identifier et dont il devra éventuellement estimer une valeur, un ordre de grandeur (compétences «s'approprier» et «analyser») ;
- schématiser la situation physique ou chimique, identifier et nommer des grandeurs, mobiliser des modèles relevant de la physique ou de la chimie, jugés pertinents pour faire des prévisions et/ou apporter des arguments (compétences «s'approprier» et «analyser») ;
- construire et mettre en œuvre une stratégie qui peut recourir à l'expérience dans le cadre de résolutions de problème expérimentales (compétences «analyser» et «réaliser») ;
- rendre compte de ses travaux à l'écrit, comme à l'oral, individuellement ou collectivement (compétence «communiquer») ;
- avoir un regard critique sur le(s) résultat(s) trouvé(s) qui peut amener l'étudiant à reconsiderer sa démarche, à améliorer le modèle choisi (compétence «valider»).

Lors de sa formation, l'étudiant doit d'emblée prendre conscience des caractéristiques de la démarche attendue dans ce type d'activités afin d'adopter une posture d'engagement adaptée à la tâche. En effet, contrairement aux situations de formation auxquelles il est généralement confronté, l'étudiant doit savoir que :

- les questions posées n'induisent pas *a priori* une démarche de résolution ;
- la réponse n'est ni évidente, ni immédiate (sinon ce n'est plus une résolution de problème), ni forcément précise (ordre de grandeur parfois à choisir et valeurs de grandeurs à estimer) et pas toujours unique (la réponse dépend du modèle choisi, l'utilisation d'un modèle plus élaboré ou la prise en compte de paramètres négligés dans un premier temps peuvent conduire à des réponses différentes) ;
- toute démarche cohérente, même si elle ne débouche pas sur un résultat abouti, sera évaluée positivement par le professeur. Il en est de même de toute analyse critique du travail réalisé et des résultats obtenus.

La formulation mathématique du problème à partir de l'analyse de la situation et la résolution des équations établies à l'aide des modèles restent des objectifs importants de l'activité de résolution de problème ; l'initiative et le raisonnement y sont aussi particulièrement valorisés.

## 3. Quels sont les intérêts pédagogiques d'une activité de résolution de problèmes ?

### a) Du point de vue de l'étudiant

#### Raisonnez

La stratégie de résolution n'est pas guidée et, souvent, elle n'est pas unique ; ainsi chaque étudiant élabore un raisonnement personnel, qui peut être différent des stratégies initialement envisagées par l'enseignant. Les étudiants sortent ainsi du cadre d'un exercice classique à étapes imposées et peuvent contourner une difficulté en ayant recours à une stratégie qui peut s'avérer efficiente.

#### Se tromper

L'erreur est source d'apprentissage ; à propos de l'erreur, Thomas Edison a dit : « I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work ». Ainsi, lors de l'élaboration d'une stratégie, les professeurs doivent permettre aux étudiants de suivre des pistes non fructueuses et les amener à les améliorer (voire à les abandonner...), si possible par eux-mêmes, en faisant évoluer la stratégie initialement adoptée. La possibilité de pouvoir essayer sans crainte des démarches de type « essai-erreur » est très propice à la construction de savoirs mieux ancrés.

#### Travailler autrement

Les activités de recherche d'une résolution de problème doivent être adaptées au niveau des connaissances requises et de l'accessibilité des modèles ; il convient notamment d'éviter des domaines où les étudiants n'ont pas encore atteint un niveau d'expertise suffisant. Ces activités procurent une motivation supplémentaire aux étudiants qui apprécient de travailler plus librement, souvent en groupe et dans un cadre collaboratif. Les étudiants sont plus actifs, échangent entre eux, confrontent leur point de vue et prennent confiance dans des mises en situations *a priori* déroutantes.

Par une mise en œuvre plus régulière et dans une logique de découverte de situations de plus en plus complexes, on espère ainsi que l'étudiant se détachera de l'attitude classique «reconnaître rapidement et reproduire»

ou bien «abandonner», en prenant l'habitude de développer des stratégies nécessitant la construction d'une réponse inédite et un peu plus de persévérance. Un travail de synthèse personnalisé, proposé en fin de recherche ou après le temps imparti envisagé par l'enseignant pour l'activité et analysant la ou les démarches choisies, est recommandé pour renforcer l'efficacité de la formation et mettre les étudiants en confiance.

### b) Du point de vue du professeur

Les professeurs qui s'engagent dans ce type de tâches y trouvent généralement beaucoup d'intérêt. Citons quelques arguments qui poussent les professeurs à diversifier leurs pratiques en incluant assez régulièrement ces activités de résolution de problème :

- dans une posture d'accompagnant, le professeur a la possibilité d'observer les étudiants se posant des questions, tâtonnant, réfléchissant, etc. Il peut ainsi plus efficacement repérer les obstacles, et apporter des aides ciblées au fur et à mesure des besoins sur des difficultés bien identifiées ;
- il est possible, dans une même classe, d'anticiper une différenciation pédagogique des compétences travaillées, en proposant deux ou trois variantes dans la formulation de la tâche à réaliser et/ou de l'affiner en apportant, le cas échéant et en temps réel, des aides personnalisées sous la forme par exemple de «coups de pouce». Cela permet de porter davantage son attention sur les étudiants encore «peu experts».

## 4. Comment former les étudiants à la résolution de problèmes ?

### a) Une programmation à prévoir

Les exercices de type résolution de problèmes nécessitent un certain temps d'exposition pour que étudiants puissent acquérir les comportements et les compétences attendus aux concours, à l'issue de deux années de formation en CPGE.

Par conséquent, une formation des étudiants à la démarche de résolution de problèmes s'inscrit dans une programmation annuelle, voire bisannuelle, en organisant une progressivité dans la complexité des situations proposées, en différenciant par groupes de compétences, notamment en exploitant la possibilité d'utiliser les différentes versions (niveaux initiation / confirmé / expert) d'un même sujet et en gérant au mieux les fiches d'aide. Ce qui amène à articuler dans un ordre variable :

- un travail collaboratif et interactif notamment, mais pas de manière exclusive, dans le cadre des séances d'enseignement en classe entière ou lors des séances à effectif réduit (travaux dirigés et travaux pratiques pour les résolutions de problèmes à caractère expérimental) ;
- un travail plus individualisé à réaliser en classe, à la maison ou lors d'une évaluation (formative ou sommative) écrite ou orale, en particulier lors des interrogations orales qui constituent des moments adaptés à la mise en œuvre de ce type de démarches.

Soulignons enfin que le caractère chronophage, souvent attribué à l'activité de résolution de problèmes, ne doit pas constituer un frein à une mise en œuvre régulière par le professeur. Il s'agit, dans le cadre du parcours de l'étudiant en CPGE, de parvenir à un juste équilibre en recourant à toutes les typologies d'exercices, depuis ceux comportant des questions guidées qui participent de l'acquisition d'automatismes et de savoir-faire, jusqu'aux résolutions de problèmes qui développent l'autonomie et l'initiative, en passant par ceux qui proposent une progressivité dans les difficultés et la complexité et/ou qui proposent quelques questions ouvertes nécessitant de faire preuve d'initiative. Ces approches sont complémentaires et doivent être travaillées de concert.

### b) Travailler les capacités dans un cadre « complexe »

On peut noter que, lors des différentes activités consacrées à la résolution de problème, le professeur peut choisir de focaliser l'attention sur une étape particulière de la résolution, tout en la menant toujours à son terme, éventuellement au moyen d'une aide ciblée, ce afin de ne pas perdre le sens global de la tâche.

Pour développer certaines capacités mobilisées lors d'une résolution de problèmes, il pourra par exemple choisir de travailler plus spécifiquement :

- quelques techniques en lien avec la phase d'appropriation : identifier les grandeurs pertinentes, les nommer, en proposer des ordres de grandeurs, schématiser la situation physique, etc. ;
- les «stratégies de contournement» permettant par exemple de pallier une connaissance absente ou oubliée ;
- l'étape de proposition d'un schéma de résolution ;
- la recherche et le tri d'informations pertinentes contenues dans les éventuels documents ;
- la proposition d'un modèle de résolution plus élaboré que celui proposé initialement pour, par exemple, gagner en précision ;
- la vérification et la validation d'un résultat afin de montrer à l'étudiant l'importance de conserver un regard critique sur les résultats obtenus ;
- la présentation de la solution en montrant que celle-ci peut revêtir différentes formes, rédigées ou schématisées de manière plus ou moins approfondie.

### c) Les phases incontournables de la résolution de problèmes

La résolution de problèmes contribue à la formation des étudiants aux compétences de la démarche scientifique. En tant que telle, la formation ne peut être que progressive et construite dans la durée.

Le premier pas pour l'étudiant confronté à une résolution de problèmes est de décrypter le problème, c'est-à-dire de s'approprier celui-ci. Après lecture des documents, l'étudiant doit être en mesure d'expliciter les objectifs de l'exercice proposé, seul ou en groupe, à l'écrit comme à l'oral. La maîtrise de la compétence «s'approprier» demande en particulier à l'étudiant de questionner les documents, sans l'aide du professeur, pour identifier quelles informations ils apportent (en regard de la problématique), pour retranscrire les données utiles et commencer à les articuler entre elles et avec ses propres connaissances. Dans un deuxième temps, il s'agira d'analyser ces informations en les complétant par les lois et les principes qui semblent nécessaires pour modéliser la situation.

Ces phases préalables d'appropriation et d'analyse sont indispensables et ne doivent pas être négligées ; elles nécessitent un certain temps de réflexion car elles contribuent ensuite de manière essentielle à la construction de la stratégie. C'est l'étape dite de décontextualisation d'un problème où il va s'agir de coder l'information, ce codage s'appuyant sur un formalisme dédié (lexical, schématique, mathématique, etc.) ; cette étape est cruciale pour faire comprendre aux étudiants la manière dont la science répond de manière générale aux questions posées. Cette étape constitue une des difficultés majeures dans l'enseignement de notre discipline, les étudiants doivent y être pleinement entraînés.

### d) L'organisation du travail

La conduite d'une situation pédagogique à question ouverte demande de savoir articuler des temps de travaux de recherche individuelle ou en groupe et des temps de mise en commun. Une soigneuse anticipation des durées de ces phases de travail, même si ceci n'est pas aisée *a priori*, est nécessaire lors de l'élaboration du scénario pédagogique des séances. La posture du professeur au cours de ces séances alterne entre des phases d'observation et d'analyse silencieuses au cours desquelles il est en retrait, et des phases de courts échanges adressés à un étudiant ou à un groupe ou à l'ensemble de la classe pendant lesquelles des questions, des informations ou des bilans peuvent être partagés.

L'organisation du travail peut revêtir différentes formes mais on peut recommander qu'elle ne dépasse pas une durée d'une heure en classe. Pour des résolutions de problèmes éventuellement plus longues, il est possible, par exemple, d'anticiper le travail d'appropriation en amont de la séance ou bien de demander de le terminer hors la séance selon l'objectif visé. Le principe étant de toujours de mener la résolution du problème à son terme. Les interrogations orales peuvent être également l'occasion de proposer aux étudiants des résolutions de problèmes, puisque les échanges avec l'examinateur permettent justement d'amener l'élève à la résolution complète avec plus ou moins d'aides ciblées.

## 5. Comment évaluer les étudiants lors de résolution de problèmes ?

### a) La problématique de l'évaluation

Par nature, une résolution de problème ne peut pas être évaluée de manière classique et séquentielle en capitalisant des points obtenus pour chaque élément de réponse attendu. En effet, les voies de résolution suivies par les étudiants n'étant pas uniques, ni éventuellement linéaires, il n'est pas possible de procéder comme pour un exercice guidé comportant des questions successives qui structurent par avance le schéma de la résolution et de la correction.

La rédaction du corrigé nécessite, lors de la conception du sujet, d'avoir recherché le (ou les) schéma(s) de résolution envisageable(s) et d'en faire par exemple une représentation de type « algorithmique » visant à expliciter au mieux les étapes identifiables (on pourra se référer aux exemples suivants : « [Le cor des Alpes](#) » de la session de juin 2014 du baccalauréat S, « [Combien de photons pour une photo](#) » et « [La masse du diazote de l'atmosphère](#) » de la session 2013 du concours du CAPES).

Pour pouvoir analyser les productions des étudiants, il est nécessaire, à partir des schémas de résolution possibles, d'identifier les compétences du tableau 1 et les capacités mises en œuvre dans le contexte de la résolution, d'en déduire des exemples d'indicateurs de réussite, puis de repérer dans les différentes étapes de la démarche personnelle des étudiants si ces indicateurs sont présents ou non.

Pour le passage de cette analyse des productions d'élèves à une notation chiffrée, deux méthodes ont déjà été expérimentées lors des examens et des concours, une évaluation basée sur le niveau de maîtrise des compétences et une évaluation basée sur une approche globale ; elles seront explicitées et déclinées sur des exemples au [paragraphe 5.c](#)).

**b) L'auto évaluation est possible**

Si l'évaluation des compétences des étudiants est de la responsabilité du professeur, une auto-évaluation *a posteriori*, en utilisant la grille de compétences avec les indicateurs de réussite retenus, pourra être utilement exploitée par l'étudiant en lui demandant d'identifier ses points de réussite ou ceux qui ont fait défaut dans sa démarche.

**c) De l'évaluation de la production à l'attribution d'une note**

Du fait de la spécificité des productions des élèves, leur évaluation ne peut s'effectuer de manière traditionnelle comme cela a été déjà souligné ci-dessus. Le correcteur doit s'adapter à la démarche adoptée par l'élève, même si elle ne fait pas partie des schémas de résolution possibles envisagés en amont. Le doute doit bénéficier à l'étudiant, car on n'est pas dans un schéma habituel de résolution d'un exercice guidé.

La note maximale atteste qu'un schéma de résolution crédible a été construit et mis en œuvre et qu'une application numérique, si elle est demandée, a été faite; si celle-ci est cohérente par rapport au modèle choisi c'est parfait, si elle ne l'est pas une analyse critique pertinente du(es) résultat(s) peut compenser.

**L'attribution d'une note fondée sur le niveau de maîtrise des compétences**

Cette évaluation a l'avantage d'induire des pistes pour la formation des étudiants à la résolution de problèmes car elle s'appuie sur une attribution d'un niveau de maîtrise pour chaque compétence en analysant la production d'un étudiant à l'aide des indicateurs de réussite précédemment identifiés.

On élaboré un tableau jugeant les poids respectifs des compétences mobilisées : on leur attribue une importance relative les unes par rapport aux autres en fonction de leur complexité, leur difficulté et du temps à y consacrer.

Les résolutions de problèmes portant sur « [Le cor des Alpes](#) » (BAC S 2014) et « [Le jet-lev](#) » (IPhOs 2015) présentent des méthodes qui permettent de passer de l'analyse du niveau de maîtrise de chaque compétence à l'attribution d'une note.

Enfin une résolution de problème portant sur le thème de [la vidange d'une baignoire](#) présente une évaluation par compétences de la production d'un étudiant.

**L'attribution d'une note fondée sur une approche globale du niveau de réussite**

Cette approche globale s'appuie sur trois niveaux qualifiant la résolution : résolution satisfaisante, résolution partielle et pas de résolution.

Il convient pour ce faire d'identifier, dans la production de l'étudiant, les éléments qui peuvent être valorisés : les indicateurs de réussite identifiés en amont donnent l'état d'esprit général de l'évaluation, ce sont en quelques-sortes des repères qui doivent permettre au correcteur de positionner le niveau de réussite de la résolution, une identification exhaustive est illusoire. Des compétences comme l'initiative, l'aptitude à communiquer à l'écrit sont susceptibles de moduler l'appréciation du correcteur.

Ce type d'évaluation a été mis en œuvre au CAPES lors de la session 2013 et la double correction a fait état de très faibles écarts entre les correcteurs.

En évaluation sommative cette méthode peut être utilisée. En évaluation formative, elle présente l'inconvénient de ne pas fournir à l'étudiant d'informations explicites sur ses points de réussite et sur les compétences à travailler pour progresser.

## II- Banque de ressources

### 1. Bibliographie - sitographie

#### a) Ouvrages

- George Polya « Comment poser et résoudre un problème », deuxième édition augmentée, traduit par C. Mesnage, préface de G. Darmois, Paris, Dunod 1965, disponible aux éditions Jacques Gabay.  
Cet ouvrage a inspiré de nombreux travaux de didactique des mathématiques.
- Lawrence Weinstein et John A Adam « Guesstimation - Solving the World's Problems on the Back of a Cocktail Napkin », Princeton.  
Ce livre donne de nombreux exemples de questions ouvertes, résolution de problèmes, pour lesquelles de nombreuses estimations sont à faire pour parvenir au résultat.

#### b) Sites

- <http://eduscol.education.fr/physique-chimie/se-former/>  
on y trouvera la ressource produite par le Griesp et intitulée « Résoudre un problème de physique-chimie dès la classe de seconde ».
- [http://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1\\_639558/resolution-de-problemes](http://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_639558/resolution-de-problemes)  
site de l'académie de Paris : Accueil > Pédagogie CPGE > Résolution de problèmes.
- <http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA-Veille/82-fevrier-2013.pdf> : le dossier de l'IFÉ « des projets pour mieux apprendre » (Catherine Reverdy) évoque assez largement la résolution de problème, dans un contexte un peu différent.
- <http://wiki.upmc.fr/download/attachments/7733587/> : texte de Jean-Michel COURTY (Université Pierre et Marie Curie).
- <http://scitation.aip.org/content/aapt/journal/tpt/info/collections> : site de la revue américaine « The Physics Teacher ».  
On y trouve deux types de résolutions de problèmes (énoncés et solutions possibles) :
  - les « Fermi questions », posées tous les mois par Lawrence Weinstein, auteur de « Guesstimation » ;
  - les « Physics Challenges », problèmes posés en ligne. Les étudiants (ou équipes d'étudiants) peuvent proposer leur solution également en ligne.
- <http://www.rsc.org/learn-chemistry/resource> qui peut donner des idées pour les résolutions de problèmes de chimie dans la rubrique "resources for creative problems solving".

### 2. Présentation des exemples

#### a) Trois « niveaux »

La banque de ressources qui suit décrit des situations pédagogiques testées dans des classes de CPGE. Pour chaque situation proposée, un, deux ou trois «niveaux» peuvent être proposés :

- un niveau «d'initiation» en phase de découverte et d'appropriation par les étudiants de la démarche de résolution de problèmes ;
- un niveau «confirmé» qui permet de consolider les acquis ;
- un niveau «expert» pour les étudiants les plus volontaires pour s'engager. Il est parfois proposé, pour une même thématique, plusieurs contextes de résolution : à partir de documents, en utilisant un logiciel de simulation et en procédant à une étude expérimentale.

#### b) Contextualisation et documents

Les exemples proposés s'appuient chacun sur une situation contextualisée. Celle-ci utilise parfois des documents, plus ou moins longs ou difficiles à exploiter. Les professeurs doivent prendre en compte cette «porosité» incontournable entre les différentes activités - approches documentaires et résolutions de problèmes que l'étudiant rencontre dans sa formation.

#### c) Approche par compétences

De manière à évaluer l'impact des modifications apportées par les différentes versions d'une même résolution de problèmes sur les compétences mobilisées, des niveaux de difficulté, basés sur une échelle ordinaire à quatre niveaux, sont attribués à chaque compétence.

Le choix de l'ensemble des ressources proposées dans ce document est, même au stade de l'initiation, de toujours proposer aux étudiants un problème à résoudre. Il est apparu plus pertinent de placer les étudiants

dans des situations où ils doivent articuler plusieurs compétences, plutôt que de les exposer à la mise en œuvre des compétences isolées. En effet, la résolution de plusieurs tâches simples ne garantit pas automatiquement la capacité à résoudre un problème (tâche complexe).

Cependant, il est évidemment possible de choisir une autre stratégie pédagogique que celle présentée ici. Les professeurs sont donc invités à expérimenter d'autres voies de formation s'ils le souhaitent.

#### d) Exemples d'évaluations de résolution de problèmes

Quatre exemples de barèmes pour l'évaluation de résolution de problèmes sont proposés à la fin de la banque de ressources. La première concerne l'exercice de spécialité du baccalauréat de la session 2014 de la filière S ([Le cor des Alpes](#)), la seconde l'épreuve de sélection française des Olympiades internationales de physique 2015 ([Le jet-lev](#)) et les deux dernières ([La masse du diazote de l'atmosphère](#) et [Combien de photons pour une photo ?](#)) les épreuves écrites du Capes de physique-chimie de la session 2013.

Enfin une résolution de problème ([La baignoire](#)) présente une évaluation par compétences d'une production d'un étudiant.

### 3. Exemples de résolutions de problème

- [L'acidité d'une boisson au cola](#)
- [L'autonomie d'une lampe de vélo](#)
- [La baignoire](#)
- [Le bleu de bromothymol](#)
- [La boîte à électrons](#)
- [La carboxylase](#)
- [La coquille d'oeuf](#)
- [La carburation des aciers](#)
- [Le chauffe-plat](#)
- [Le coup-franc](#)
- [Une distillation industrielle](#)
- [L'échographie](#)
- [Enlever une nappe ... sans les assiettes](#)
- [L'étiquette d'un engras](#)
- [La fusée à eau](#)
- [Le glaçon qui coule](#)
- [La composition d'un gong](#)
- [Le haut parleur \(expérimental\)](#)
- [L'iceberg](#)
- [Le laser Lune](#)
- [Les lunettes 3D \(expérimental\)](#)
- [Le microscope](#)
- [L'objectif photographique](#)
- [L'œuf dur en rotation](#)
- [Le smartphone](#)
- [Le télésiège](#)
- [La tornade](#)
- [Le vaisseau spatial](#)
- [Le verre d'eau dans un réfrigérateur](#)
- [Le wifi](#)
- [Le cor des Alpes \(session 2014 du baccalauréat S\)](#)
- [Combien de photons pour une photo ? \(CAPES 2013\)](#)
- [La masse du diazote de l'atmosphère \(CAPES 2013\)](#)
- [Le jet lev \(élection française aux olympiades internationales de physique\)](#)

# L'acidité d'une boisson au cola

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les solutions aqueuses - programme de première année. Plusieurs versions d'une même résolution de problème sont proposées avec des approches différentes et des niveaux de difficulté différents.

La **version 1** se fait sur table, en séance de travaux dirigés par exemple. Elle présente quelques difficultés pour les étudiants car elle mobilise les connaissances de différents domaines ; les étudiants doivent identifier la (les) réaction(s) de titrage et analyser si elles sont successives ou simultanées. Ils doivent ensuite écrire la relation utile à l'équivalence et ainsi déduire la teneur en acide phosphorique de la boisson au cola.

La **version 2** du problème nécessite l'utilisation d'un logiciel de simulation. Elle présente les mêmes difficultés pour les élèves mais le sujet est rendu plus difficile par rapport à la version 1 car les élèves doivent identifier les acidifiants présents dans la boisson au cola en réalisant des simulations à faire.

La **version 3** du problème est une version expérimentale. Elle requiert la conception et la réalisation du protocole. Les élèves doivent alors évaluer eux-mêmes le volume de la prise d'essai.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
<b>version 1</b> "sur table"	2	2	2	2	2
<b>version 2</b> avec outil informatique	2	2	3	2	2
<b>version 3</b> expérimentale	1	3	4	2	2

**Cadre du programme officiel : première année**

Notions et contenus	Capacités exigibles
Réactions acide-base  Réactions acido-basiques <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité ;</li> <li>- diagramme de prédominance ;</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature - faible ou forte - des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, de la soude, la potasse, l'ion hydrogénocarbonate, l'ammoniac ;</li> <li>- solutions tampon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifier la nature des réactions en solutions aqueuses.</li> <li>- Extraire, de ressources disponibles, les données thermodynamiques pertinentes pour prévoir qualitativement l'état final d'un système en solution aqueuse ou pour interpréter des observations expérimentales.</li> <li>- Déterminer la valeur de la constante d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues.</li> <li>- Retrouver les valeurs de constantes d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).</li> </ul>
Dosages par titrage  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Titrages directs, indirects.</li> <li>- Équivalence.</li> <li>- Titrages simples, successifs, simultanés.</li> <li>- Méthodes expérimentales de suivi d'un titrage : pH-métrie, conductimétrie, potentiométrie à intensité nulle, indicateurs colorés de fin de titrage.</li> <li>- Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identifier et exploiter la réaction support du titrage (recenser les espèces présentes dans le milieu au cours du titrage, repérer l'équivalence, justifier qualitativement l'allure de la courbe ou le changement de couleur observé).</li> <li>- Proposer ou justifier le protocole d'un titrage à l'aide de données fournies ou à rechercher.</li> <li>- Mettre en œuvre un protocole expérimental correspondant à un titrage direct ou indirect.</li> <li>- Choisir et utiliser un indicateur coloré de fin de titrage.</li> <li>- Exploiter une courbe de titrage pour déterminer le titre en espèce dosée.</li> <li>- Exploiter une courbe de titrage pour déterminer une valeur expérimentale d'une constante thermodynamique d'équilibre.</li> <li>- Utiliser un logiciel de simulation pour déterminer des courbes de répartitions et confronter la courbe de titrage simulée à la courbe expérimentale.</li> <li>- Justifier la nécessité de faire un titrage indirect.</li> <li>- Distinguer l'équivalence et le virage d'un indicateur coloré de fin de titrage.</li> <li>- Déterminer les conditions optimales qui permettent à l'équivalence</li> </ul>

**Déroulement de l'activité :**

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'acidité d'une boisson au cola**  
 Enoncé

---

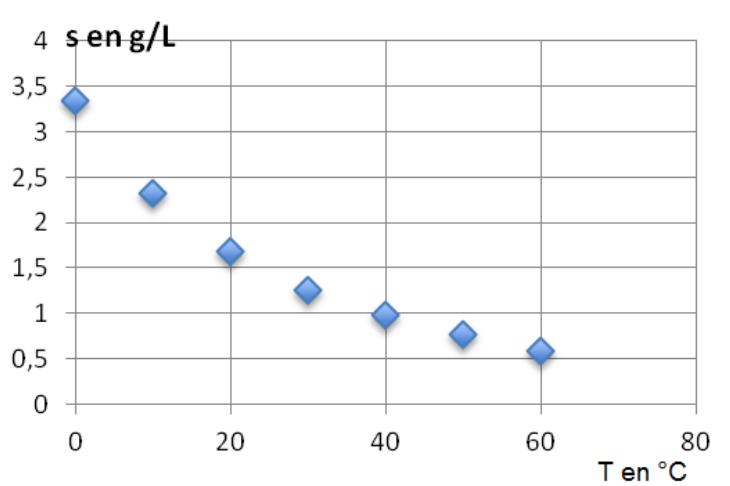
**version 1 : version « sur table »**

**Problématique :**

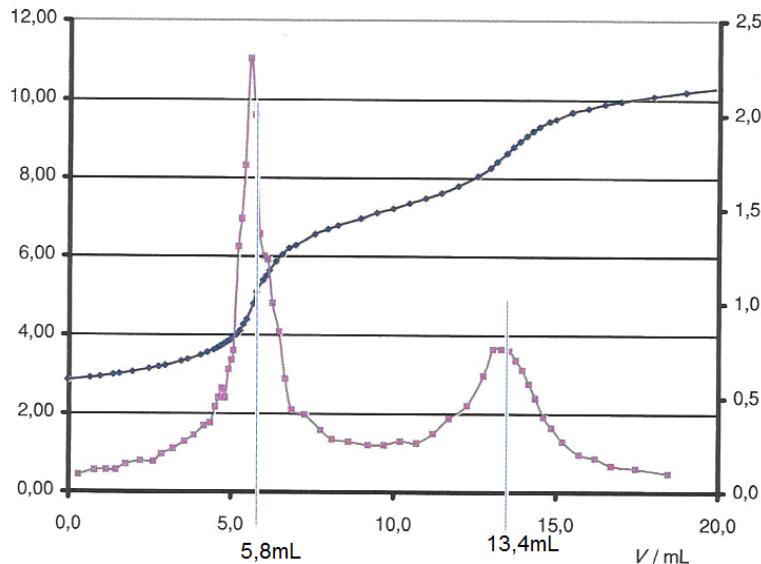
L'acide phosphorique (E338) est un additif acidifiant autorisé dans de nombreux produits, dont les boissons au cola. La dose journalière admissible (DJA) a été évaluée au niveau national et fixée à 70 mg/kg/jour. Grâce aux documents proposés, estimer le nombre de canettes de cola de 33 cL que peut boire un adolescent sans dépasser la DJA.

L'étudiant pourra se référer à toute table de données qui lui semble nécessaire.

**Document 1 : Évolution de la solubilité du  $CO_{2(g)}$  dans l'eau en fonction de la température.**



**Document 2 : Courbes  $pH = f(V)$  et  $d(pH)/dV = f(V)$  pour le titrage de  $V_0 = 10,0 \text{ mL}$  d'une boisson au cola par une solution de soude à  $C_B = 0,010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .**



---

**version 2 : version « avec logiciel de simulation »**

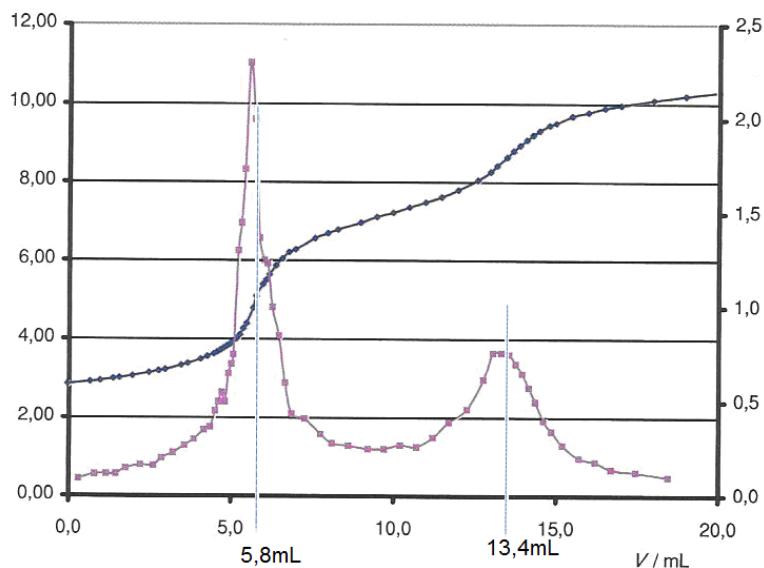

---

**Problématique :**

Grâce à un logiciel de simulation et aux documents fournis, identifier les acidifiants présents dans une boisson au cola, ainsi que leur concentration.

**Document 1 : Extrait Dossier Chimie Paris - n°337 - Juin 2012**

« La balance acide/sucré dans le Coca-Cola est très importante pour l'impression en bouche et pour le goût. L'acidité est obtenue par l'acide phosphorique (E338, issu du traitement de roches phosphatées) ou l'acide citrique (E330, extrait d'agrumes, mais préparé industriellement par fermentation). Ce dernier à un goût plutôt léger et fruité, tandis que le premier à un goût neutre et sec. En plus de ces acides on ajoute du CO<sub>2</sub> (E290) qui participe aussi à l'acidité de la boisson. »

**Document 2 : Courbes  $pH = f(V)$  et  $d(pH)/dV = f(V)$  pour le titrage de  $V_0 = 10,0 \text{ mL}$  d'une boisson au cola par une solution de soude à  $C_B = 0,010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .**

---

**version 3 : version expérimentale**

---

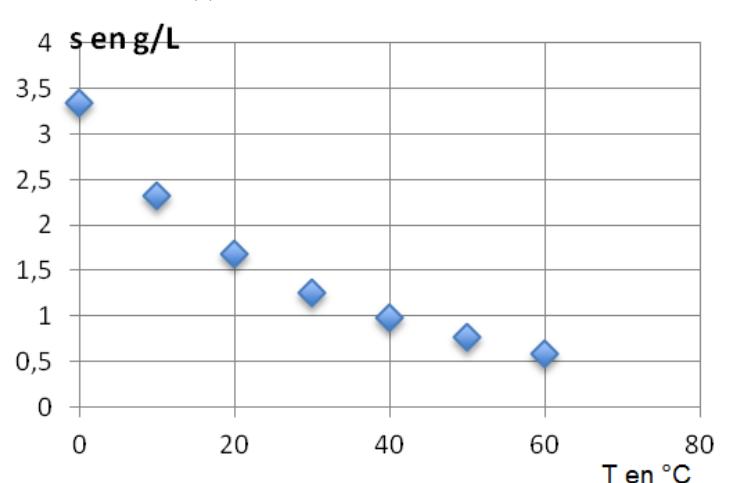
**Problématique :**

L'acide phosphorique (E338) est un additif acidifiant autorisé dans de nombreux produits, dont les boissons au cola. La dose journalière admissible (DJA) a été évaluée au niveau national et fixée à 70 mg/kg/jour. Il est indiqué que la teneur maximale légale en acide phosphorique d'une boisson au cola est de 6 g/L.

Proposer et réaliser un protocole expérimental permettant de déterminer le nombre de canettes de cola de 33 cL que peut boire un(e) adolescent(e) sans dépasser la DJA.

L'étudiant pourra se référer à toute table de données qui lui semble nécessaire et/ou utiliser un logiciel de simulation.

**Évolution de la solubilité du  $CO_2$  (<sub>(g)</sub>) dans l'eau en fonction de la température.**



**Résolution de problème**  
**L'acidité d'une boisson au cola**  
**Exemple de résolution**

<b>S'approprier le problème.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> </ul>
----------------------------------	--

La DJA est à prendre en compte pour calculer le nombre de canettes que peut boire l'individu.

Versions 1 et 3 :

D'après les données du problème, un titrage pH-métrique doit être mis en jeu afin de doser l'acide phosphorique dans la boisson au cola (version 3).

La solubilité du  $\text{CO}_2$  dans l'eau diminue avec la température.

Il est utile de savoir si les réactions de titrage du triacide sont successives. Ceci peut être vu grâce à des courbes de simulation ou grâce aux  $\text{pK}_A$  trouvés dans des tables.

Version 2 :

La boisson contient soit un mélange acide phosphorique /  $\text{CO}_2$ , soit un mélange acide citrique /  $\text{CO}_2$ .

Versions 1 et 2 :

Le volume titré est  $V_0 = 10 \text{ mL}$ ; le réactif titrant est à la concentration  $C_B = 0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . On cherche à déterminer  $C_A$ .

On peut observer deux volumes équivalents qui correspondent aux abscisses des maxima de la dérivée du pH par rapport au volume.

Version 3 :

La teneur maximale en acide phosphorique fournie peut permettre d'avoir une concentration approximative de l'acide phosphorique dans le cola afin d'avoir un ordre de grandeur sur la concentration de la solution de soude nécessaire et sur le volume de cola à doser.

<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
-----------------	---

Versions 1 et 3 :

Les  $\text{pK}_A$  des différents couples acido-basiques mis en jeu peuvent être obtenus, si besoin est, dans des tables ou grâce à un logiciel de simulation.

On fera l'hypothèse que l'adolescent(e) a une masse de 60 kg.

Équations des réactions support du titrage (les constantes d'équilibre sont déterminées à partir des données des  $\text{pK}_A$ ).

– Avant la première équivalence :  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HO}^- = \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{PO}_4^- K_1^\circ = 10^{11,8}$

– Entre les deux équivalences :  $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HO}^- = \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} K_2^\circ = 10^{6,8}$

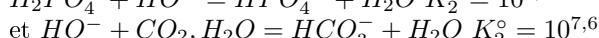
– Il y a ensuite la réaction entre les ions  $\text{HO}^-$  et l'ion hydrogénophosphate  $\text{HPO}_4^{2-}$ , mais celle-ci n'est pas quantitative :  $\text{HPO}_4^{2-} + \text{HO}^- = \text{PO}_4^{3-} + \text{H}_2\text{O} K_3^\circ = 10^{1,7}$  C'est pour cela que l'on observe uniquement deux équivalences sur la courbe de titrage.

Seule la première équivalence est utile pour déterminer la concentration en acide phosphorique de la boisson au cola. En effet, le premier titrage correspond à celui de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

On voit, d'après les courbes de distribution fournies (version 1) ou tracées (versions 2 et 3) que les acidités sont dosées successivement.

D'après le document fourni, la solubilité du  $\text{CO}_2$  diminue quand  $T$  augmente. La boisson a donc été préalablement chauffée à reflux afin d'éliminer le gaz dissous, c'est-à-dire le  $\text{CO}_2$ . En effet, il paraît difficile de prélever le bon volume de la boisson à doser si celle-ci contient des bulles. Le reflux permet d'éviter toute perte de matière.

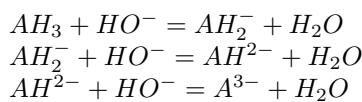
Pour vérifier que le chauffage a été efficace, il faut s'intéresser à la deuxième équivalence. En effet, s'il reste du  $\text{CO}_2$ , entre les deux équivalences, les deux réactions suivantes ont eu lieu :



Version 2 :

Il faut tracer la courbe de simulation du titrage d'un mélange acide citrique/ $\text{CO}_2$  et celle du titrage d'un mélange acide phosphorique/ $\text{CO}_2$ .

Dans le premier cas, les équations des réactions support du titrage de l'acide citrique sont : (on notera  $A\text{H}_3$  l'acide citrique)



Pour le titrage du  $CO_2$ , on a :  $HO^- + CO_2, H_2O = HCO_3^- + H_2O$   $K_3^o = 10^{6,7}$

Dans le deuxième cas, les réactions support ont été données plus haut.

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

### Version 3 :

Protocole expérimental, matériel et solution nécessaires :

- burette graduée
- agitateur magnétique
- bécher contenant la boisson au cola
- pipette pour prélever la boisson au cola
- pH-mètre + ECS + électrode de verre
- solution aqueuse de soude à  $C = 0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Au préalable, chauffer à reflux la boisson afin d'éliminer le  $CO_2$  dissous.

Comment déterminer le volume de boisson au cola à prélever pour le titrage ?

On peut utiliser la teneur maximale en acide phosphorique de la boisson au cola et supposer c'est à peu près la concentration en acide phosphorique dans la boisson.

On peut alors déduire que la concentration approximative en acide phosphorique est de :  $C' = 6/98 = 6 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Si on choisit une solution de soude à 0,01 mol/L alors le volume équivalent sera approximativement de 6 mL. Cela permet de faire un premier essai afin de voir si le volume équivalent trouvé est « correct ».

Lors du titrage pH-métrique, il faut resserrer la prise de points autour de l'équivalence.

### Versions 1, 2 et 3 :

D'après la première réaction support du titrage :  $H_3PO_4 + HO^- = H_2O + H_2PO_4^-$ , la relation à l'équivalence s'écrit :

$$n(H_3PO_4) = n(HO^-)_{eq1} \text{ soit } C_A V_0 = C_B V_{eq1}. \text{ AN : } [C_A = 5,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}]$$

Dans une canette de cola, la quantité de matière d'acide phosphorique est donc :

$$n_A = 5,8 \times 10^{-3} \times 0,33 = [1,9 \times 10^{-3} \text{ mol}] \text{ et la masse d'acide phosphorique est de : } [m_A = 0,19 \text{ g}]$$

La masse maximale d'acide phosphorique que peut ingérer par jour un adolescent de 60 kg est de :  $70 \times 60 = 4,2 \times 10^3 \text{ mg}$  soit  $[4,2 \text{ g}]$

Le nombre de canettes maximal est donc de  $4200/188 = [22 \text{ canettes}]$ .

On peut comparer  $2V_{eq1}$  et  $V_{eq2}$  pour savoir si tout le  $CO_2$  a été éliminé. En effet, s'il n'y a que de l'acide phosphorique, alors on devrait avoir  $V_{eq2} = 2V_{eq1}$ .

Ici  $2V_{eq1} = 11,6 \text{ mL}$  et  $V_{eq2} = 13,4 \text{ mL}$ .

On a donc versé 1,8 mL de soude « en trop » entre les deux équivalences.

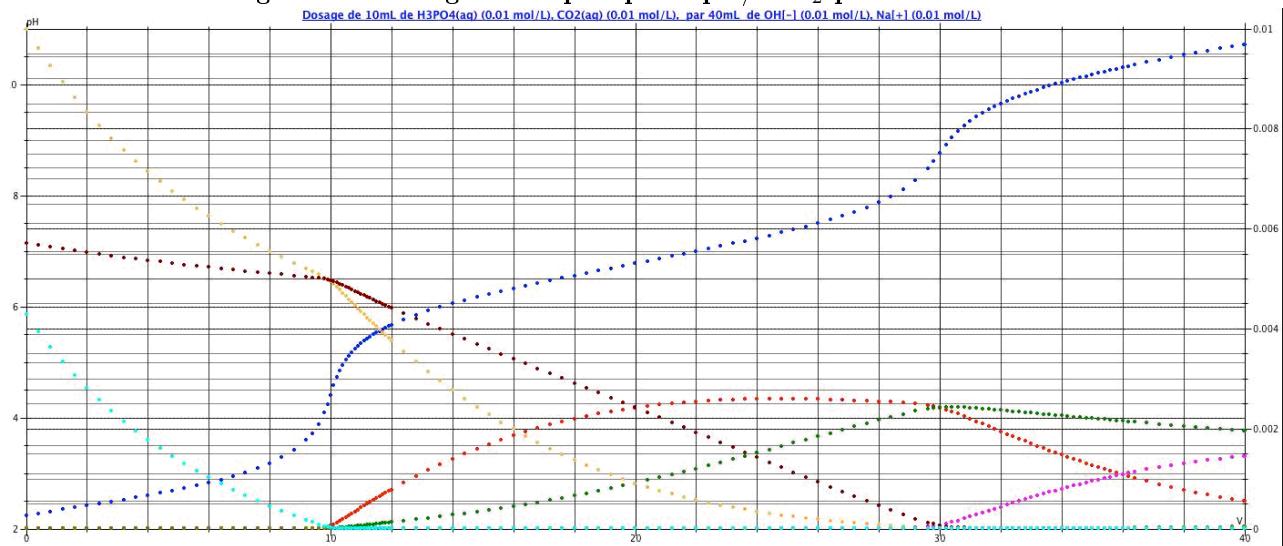
Il y a eu en plus cette réaction :  $HO^- + CO_2, H_2O = HCO_3^- + H_2O$ .

Il reste encore :  $1,8 \times 10^{-3} \times 0,01/0,01 = 1,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  de  $CO_2$  dissous.

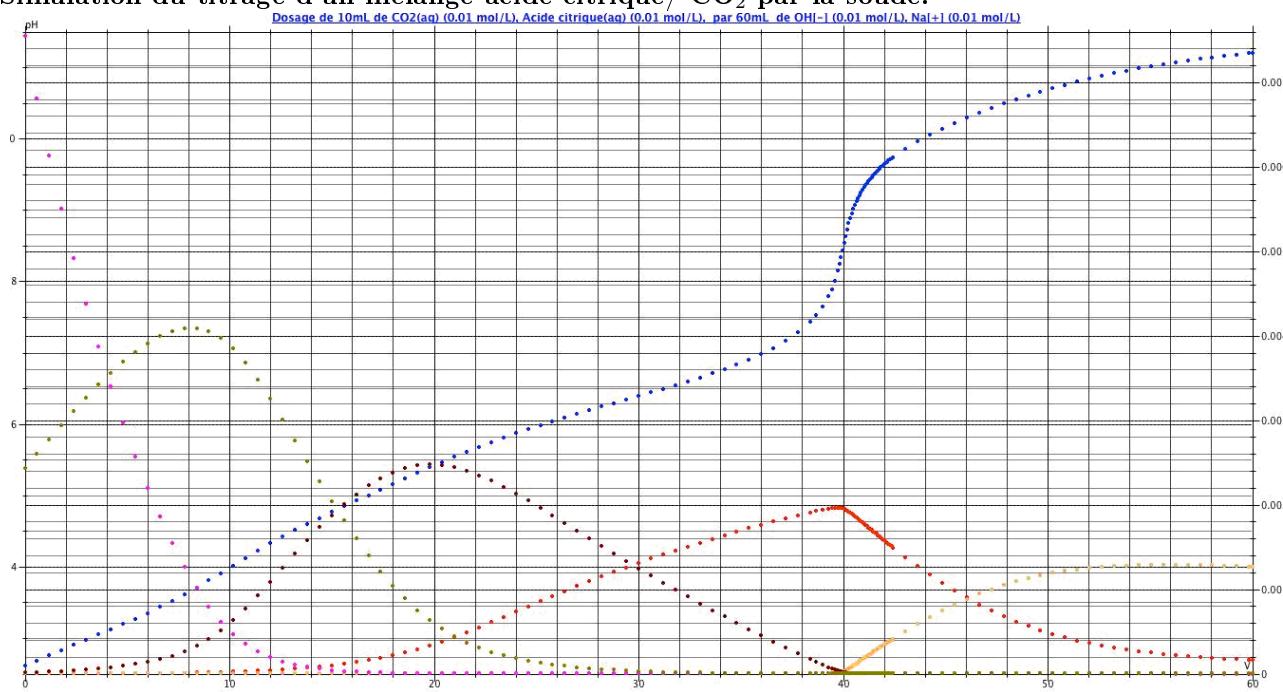
On peut juste remarquer que ceci n'est pas gênant pour l'estimation de la concentration en acide phosphorique, puisque seule la première équivalence peut être prise en compte.

Version 2 : Tout est fait par simulation. Les courbes représentées sont la courbe  $pH = f(V)$  ainsi que les courbes de distribution.

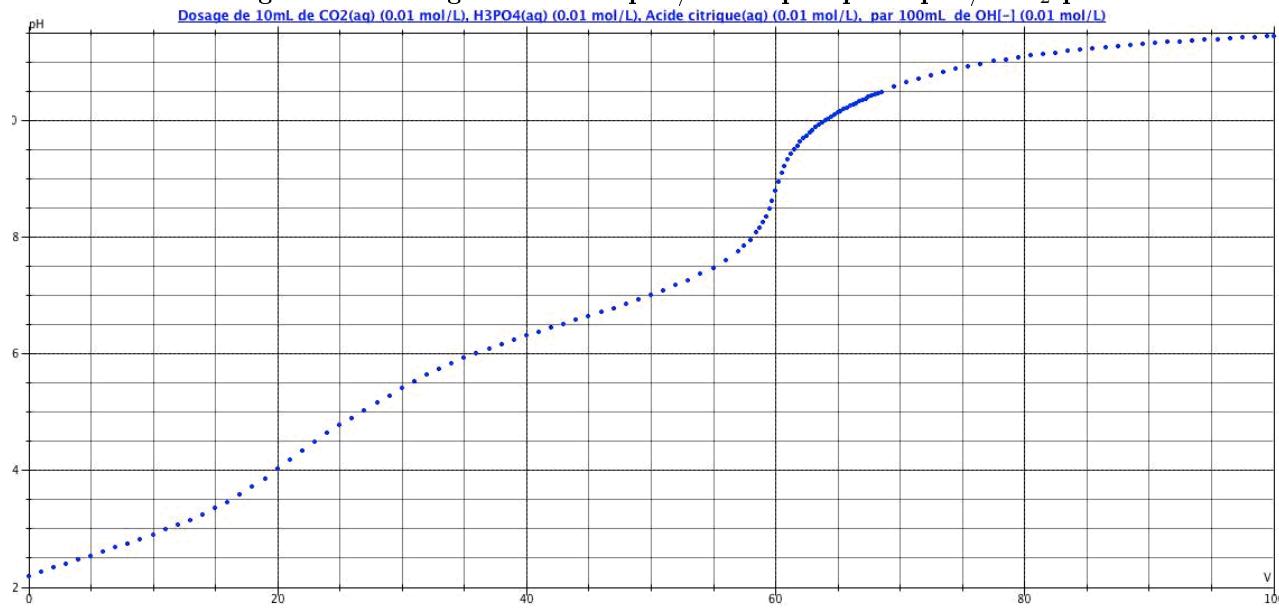
### Simulation du titrage d'un mélange acide phosphorique / CO<sub>2</sub> par la soude.



### Simulation du titrage d'un mélange acide citrique / CO<sub>2</sub> par la soude.



### Simulation du titrage d'un mélange acide citrique / acide phosphorique / CO<sub>2</sub> par la soude.



On se rend compte que :

- on observe deux équivalences dans le premier cas :

Avant la première équivalence : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> est dosé

Entre les deux équivalences : H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> et CO<sub>2</sub> sont dosés.

- on observe une seule équivalence dans le deuxième cas :

AH<sub>3</sub>, AH<sub>2</sub><sup>-</sup>, AH<sup>2-</sup> et CO<sub>2</sub> sont dosés simultanément.

-on observe une seule équivalence dans le troisième cas :

La présence de l'acide citrique déplace la première équivalence en comparaison avec le premier cas. Les acides sont dosés simultanément.

Par comparaison avec la courbe de titrage fournie où l'on repère deux équivalences distinctes, il semblerait que le cola contient de l'acide phosphorique et du CO<sub>2</sub>.

Pour déterminer les concentrations et le nombre de canettes que l'adolescent peut boire, voir paragraphe plus haut.

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

Version 3 :

Teneur en acide phosphorique :  $m = 5,8 \times 10^{-3} \times 98 =$  0,57 g/L : la valeur est en dessous du taux limite, donc la boisson au cola est aux normes.

Toutes versions :

On peut se poser la question de la présence ou non d'autres acides dans la boisson au cola, qui pourraient perturber le titrage (acide benzoïque, ion dihydrogénophosphate par exemple).

**Résolution de problème**  
**L'acidité d'une boisson au cola**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel type de dosage doit être mis en jeu ?</li> <li>– Quelles sont les données utiles ?</li> <li>– Quel est le gaz contenu dans la boisson au cola ?</li> </ul> <p><u>Versions 1 et 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– De quel facteur dépend la solubilité du <math>CO_2</math> dans l'eau ?</li> </ul> <p><u>Versions 1 et 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment lire le volume équivalent sur la courbe fournie ?</li> </ul> <p><u>Version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Repérer que la boisson au cola contient de l'acide phosphorique et du <math>CO_2</math> ou de l'acide citrique et du <math>CO_2</math>.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont les équations des réactions qui ont lieu au cours du dosage ?</li> <li>– Dans quel ordre ont lieu ces réactions ?</li> <li>– Les réactions sont-elles successives ou simultanées ?</li> <li>– Pourquoi n'observe-t-on que deux équivalences ?</li> <li>– Quelle est la masse moyenne d'un(e) adolescent(e) ?</li> </ul> <p><u>Versions 1 et 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est l'équivalence utile pour résoudre le problème ?</li> <li>– Pourquoi et comment éliminer le gaz présent dans le cola ?</li> </ul> <p><u>Version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle(s) simulation(s) dois-je réaliser pour répondre aux questions précédentes ?</li> </ul> <p><u>Version 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel type de dosage dois-je effectuer ?</li> </ul>
Réaliser	<p><u>Version 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Questions pratiques sur la manipulation : <ul style="list-style-type: none"> <li>– quel est le matériel nécessaire ?</li> <li>– quels capteurs et quel appareillage utiliser ?</li> <li>– faut-il resserrer les prises de points ?</li> <li>– comment déterminer le volume de la boisson au cola à doser en fonction de la concentration de la solution titrante dont je dispose ?</li> </ul> </li> </ul> <p><u>Versions 1 et 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment écrire la relation à l'équivalence ?</li> <li>– Comment calculer la quantité de matière d'acide phosphorique dans une canette de cola ?</li> <li>– Comment alors déterminer le nombre de canettes que peut boire un adolescent ?</li> <li>– Quelle équivalence doit-on prendre en compte pour vérifier que le chauffage est efficace ?</li> </ul> <p><u>Version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Tracer la courbe de simulation du titrage d'un mélange acide citrique/<math>CO_2</math> et celle du titrage d'un mélange acide phosphorique/<math>CO_2</math></li> <li>– Identifier l'acide présent dans la boisson</li> <li>– Comment écrire la (ou les) relation(s) à l'équivalence ?</li> <li>– Comment calculer la quantité de matière d'acide phosphorique dans une canette de cola ?</li> <li>– Comment alors déterminer le nombre de canettes que peut boire un(e) adolescent(e) ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel regard critique peut-on poser sur le raisonnement mené ?</li> <li>– Y a-t-il d'autres composants qui pourraient perturber le titrage réalisé ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**L'acidité d'une boisson au cola**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se rendre compte qu'il faut réaliser un titrage pH-métrique.</li> <li>– Extraire le volume équivalent utile, la concentration de soude et le volume de solution de cola.</li> <li>– Extraire les <math>pK_A</math> utiles.</li> </ul> <p><u>Versions initiation et confirmé :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les différentes courbes de distribution</li> </ul> <p><u>Version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se rendre compte que la solubilité diminue avec la température.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lister les réactions support de titrage.</li> <li>– Comprendre que les acidités sont dosées successivement.</li> </ul> <p><u>Version confirmé :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Expliquer pour quoi le chauffage est réalisé.</li> <li>– Justifier l'intérêt du reflux</li> </ul> <p><u>Version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Écrire l'équation bilan de la réaction de titrage du <math>\text{CO}_2</math>.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les relations à l'équivalence sont exprimées</li> <li>– Le calcul est mené à son terme pour connaître la concentration en acide phosphorique de la boisson au cola.</li> <li>– Le résultat est comparé à la valeur légale.</li> </ul> <p><u>Version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– la quantité de <math>\text{CO}_2</math> restant est déterminée.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La deuxième équivalence est exploitée.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# L'autonomie d'une lampe de vélo

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sur la notion de photon – Programme de première année.

Cette petite résolution de problème permet de mettre en œuvre la relation de Planck-Einstein et de manipuler les notions de puissance lumineuse et de flux de photons, tout en les liant à une puissance électrique, une intensité et un débit d'électrons. La version "initiation" se limite au calcul de l'autonomie de la lampe. Dans les versions "confirmé" et "expert", on demande en plus d'évaluer l'ordre de grandeur de la tension d'alimentation.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	2	2	2
niveau "confirmé"	3	3	3	3	2
niveau "expert"	4	4	3	3	2

## Cadre du programme officiel : Première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Introduction au monde quantique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Dualité onde-particule pour la lumière et la matière.</li> <li>– Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.</li> </ul>
<b>Circuits électriques dans l'ARQS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Charge électrique, intensité du courant.</li> <li>– Potentiel, référence de potentiel, tension.</li> <li>– Puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Savoir que la charge électrique est quantifiée.</li> <li>– Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge.</li> <li>– Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur.</li> <li>– Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.</li> </ul>

Lorsqu'aucune donnée ne figure dans l'énoncé, cette résolution de problème illustre bien la multiplicité des méthodes possibles pour répondre à la question posée. Comme illustration, deux approches différentes sont proposées pour déterminer l'autonomie de la lampe, dont une ne fait appel à aucune notion quantique.

**Ouvertures possibles :** Étant donnés les différents calculs que l'on peut mener, le sens dans lesquels on peut les prendre, les données supplémentaires que l'on peut éventuellement apporter, il est possible de décliner cette résolution de problème en de nombreuses versions selon ce que l'on veut calculer (tension d'alimentation nécessaire, rendement de la conversion de puissance, efficacité quantique ... etc ...) A vous de les imaginer...

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'autonomie d'une lampe de vélo**  
Enoncé

### Autonomie d'une lampe de vélo



La lampe de vélo représentée ci-dessus et dont la puissance est d'une dizaine de watts fonctionne avec des DEL (Diodes ElectroLuminescentes). Ce type de dipôle est une source lumineuse fondamentalement quantique. Elle est alimentée par 3 piles rechargeables LR03 de 1,5V. Deux d'entre elles sont représentées sur la photo voisine.

---

#### niveau initiation

Sachant qu'on peut effectivement considérer que chaque électron passant dans la DEL donne naissance à un photon, déterminer l'autonomie de la lampe.

---

#### niveau confirmé

Sachant qu'on peut effectivement considérer que chaque électron passant dans la DEL donne naissance à un photon, déterminer l'autonomie de la lampe et une condition sur la tension nécessaire à son bon fonctionnement.

---

#### niveau expert

Déterminer l'autonomie de la lampe et une condition sur la tension nécessaire à son bon fonctionnement.

Résolution de problème  
**L'autonomie d'une lampe de vélo**  
 Exemple de résolution

**Analyse et modélisation du problème :**

On commence par modéliser le fonctionnement de la lampe sur la figure 3. On y fait également apparaître les grandeurs utiles.

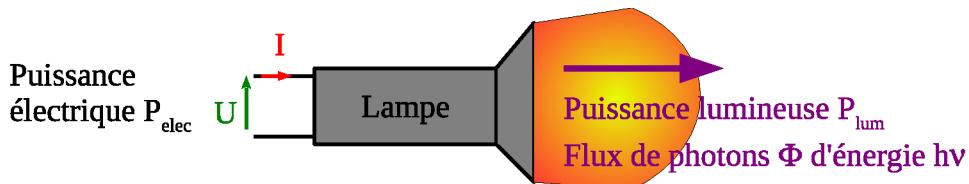


FIGURE 1 – Modélisation de la lampe de vélo. Elle transforme une puissance électrique en puissance lumineuse

**Du point de vue électrique** la lampe de poche peut être considérée comme un dipôle, en régime continu, parcouru par une intensité  $I$  et soumis à une tension  $U$ . En convention récepteur, la puissance reçue par la lampe (DEL) s'écrit :  $P_{elec} = UI$ .

**Du point de vue optique** : la lampe est une source lumineuse de puissance  $P_{lum}$  dans le visible, de longueur d'onde typique  $\lambda = 0,4$  à  $0,7 \mu\text{m}$ . Pour les applications numériques, on prendra une longueur d'onde moyenne de  $600 \text{ nm}$ . C'est donc aussi une source de photons d'énergie individuelle  $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ . On notera  $\Phi$  le flux de photons émis.

**Méthode "électrique" :**

On fait l'hypothèse que la puissance de  $10 \text{ W}$  mentionnée dans l'énoncé est relative à la puissance électrique, soit :  $P_{elec} = 10 \text{ W}$ . Pendant la durée de fonctionnement  $\Delta t$ , l'énergie totale délivrée est de  $E = P_{elec}\Delta t = UI\Delta t$  où  $Q = I\Delta t$  est la charge totale disponible dans les trois piles.

Sur la photographie de droite, on voit clairement que la "charge utile" d'une pile est de  $800 \text{ mA.h}$ . Pour les trois piles de  $1,5 \text{ V}$ , on dispose donc d'une réserve de charges  $Q = 3 \times 800 = 2400 \text{ mA.h} = 8,6 \cdot 10^3 \text{ C}$ .

$$\text{On obtient donc directement } \boxed{\Delta t = \frac{UQ}{P_{elec}}}. \quad \text{A.N. : } \Delta t = \frac{3 \times 1,5 \times 8,6 \cdot 10^3}{10} = 3900 \text{ s.}$$

On obtient une autonomie de l'ordre de 1 heure. C'est certes le bon ordre de grandeur, mais vraisemblablement un peu sous-évalué.

**Remarque :** Sans la photographie de droite, on pourrait aussi raisonner en ordre de grandeur très grossier pour contourner la difficulté. La mole est l'unité macroscopique de quantité de matière par excellence<sup>3</sup>. Considérer brutalement que l'on dispose de  $N = 1 \text{ mole} = 6 \cdot 10^{23}$  électrons n'est donc pas totalement absurde. On aboutit alors à une autonomie de  $\Delta t = \frac{UNe}{P_{elec}}$  où  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  est la charge élémentaire d'un électron<sup>4</sup> et  $N$  le nombre d'Avogadro.

*L'application numérique donne  $\Delta t = \frac{3 \times 1,5 \times 6 \cdot 10^{23} \times 1,6 \cdot 10^{-19}}{10} = 43200 \text{ s}$ , soit 12 heures ! L'ordre de grandeur est ici un peu trop optimiste ...*

Pour conclure, cette approche "rapide" permet d'obtenir le bon ordre de grandeur. Pour affiner le résultat, il faudrait savoir si la puissance indiquée est bien la puissance électrique et si tel n'est pas le cas, connaître le rapport de conversion.

**Méthode "optique" :**

On fait l'hypothèse que la puissance de  $10 \text{ W}$  mentionnée dans l'énoncé est relative à la puissance lumineuse, soit :  $P_{lum} = 10 \text{ W}$ . Si chaque électron passant dans la DEL donne un photon, la durée de fonctionnement de la lampe sera directement liée au nombre d'électrons "disponibles" dans les trois piles. On voit clairement que la "charge utile" d'une pile est de  $800 \text{ mA.h}$ . Pour les trois piles, on dispose donc d'une réserve de charges :

$$Q = 3 \times 800 = 2400 \text{ mA.h} = 8,6 \cdot 10^3 \text{ C.}$$

Le nombre total de photons que la lampe peut émettre est égal au nombre total d'électrons disponibles, soit  $N = N_e = \frac{Q}{e}$ . On obtient numériquement :  $N = 0,5 \cdot 10^{22}$  électrons ou, de façon plus grossière, un peu moins d'un dixième de mole.

3. Par exemple, la masse d'une mole d'un élément chimique s'exprime typiquement en grammes, tout comme la masse d'une pile classique dans laquelle sont stockés les réactifs utilisés pour la réaction d'oxydo-réduction.

4. en valeur absolue bien sûr

**Remarque :** Comme dans la méthode précédente, sans la photographie de droite, on pourrait aussi raisonner en ordre de grandeur très grossier et considérer brutalement que l'on dispose de  $N = 1 \text{ mole} = 6.10^{23}$  électrons.

Le flux de photons peut s'exprimer sous la forme :  $\Phi = \frac{P_{lum}}{h\nu} = \frac{P_{lum}\lambda}{hc}$ . Pendant la durée de fonctionnement  $\Delta t$ , le nombre total de photons émis  $\Phi\Delta t$  est égal au nombre  $N$  d'électrons disponibles, ce qui conduit à écrire :  $N = \Phi\Delta t = \frac{P_{lum}\lambda}{hc}\Delta t$ . On obtient donc une durée d'autonomie de :  $\boxed{\Delta t = \frac{Nhc}{P_{lum}\lambda} = \frac{Q}{e} \frac{hc}{P_{lum}\lambda}}$

Avec les trois piles de 800 mA.h, l'application numérique conduit à  $\Delta t = \frac{(3 \times 0,8 \times 3600)}{1,6.10^{-19}} \times \frac{6,6.10^{-34} \times 3.10^8}{10 \times 0,6.10^{-6}}$

L'autonomie obtenue est ici de  $\Delta t = 1800 \text{ s}$ , soit 30 minutes.

Le résultat est certes un peu décevant même si, en étant optimiste, on peut toujours dire que l'on obtient encore une autonomie de l'ordre de l'heure. On peut malgré tout avoir une certaine satisfaction quand on pense que le cœur de la modélisation, basée sur "un électron = un photon" est sans doute un peu simplifiée.

### Détermination de la tension d'alimentation :

Si deux méthodes existent pour déterminer l'autonomie, faire une hypothèse sur les puissances électriques et lumineuses apporte un lien entre les deux domaines, ce qui fournit une équation (inéquation) supplémentaire. On peut alors calculer une autre grandeur (ou déterminer une condition à laquelle cette grandeur doit obéir). On a choisi ici la tension  $U$  de fonctionnement.

On peut raisonnablement supposer que la puissance électrique est supérieure à la puissance lumineuse obtenue, soit  $P_{elec} > P_{lum}$ . Avec les expressions obtenues de chaque puissance en première partie, il vient  $UI > \Phi h\nu$ . En conservant l'idée fondamentale qu'un électron traversant la DEL donne un photon, le débit d'électrons est donc aussi de  $\Phi$  et  $I = e\Phi$ .

Après simplification par  $\Phi$ , la condition sur les puissances devient  $Ue > h\nu$ , soit  $\boxed{U > \frac{hc}{\lambda e}}$

La valeur numérique de la tension minimale nécessaire est donc de  $U_s = \frac{6,6.10^{-34} \times 3.10^8}{0,6.10^{-6} \times 1,6.10^{-19}}$  pour une longueur d'onde de 600 nm. On obtient alors  $\boxed{U_s = 2 \text{ V}}$ .

On peut difficilement s'empêcher à ce stade de rapprocher cette tension minimale des tensions de seuils des diodes au silicium, dont l'ordre de grandeur de 0,6V n'est pas si éloigné. D'autant qu'en cherchant les caractéristiques réelles des DEL, il se trouve justement que leur tension de seuil est non seulement de l'ordre de 2 V dans le jaune-orangé, mais que la valeur de ce seuil augmente vers le bleu<sup>5</sup>, comme le montre les caractéristiques résumées dans le tableau 2.

Couleur	Domaine spectral (nm)	Tension de seuil (V)
Violet	400-500	2.7- 3.1
Bleu	450-500	2.5 - 2.8
Vert	525-565	2.1 - 2.5
Jaune	585-590	2.1
Orange	600-620	2

TABLE 2 – Tensions de seuil de différentes DEL en fonction de leur domaine spectral (sources : [http://www.led-fr.net/experiences\\_led\\_mesure\\_tension\\_seuil.htm](http://www.led-fr.net/experiences_led_mesure_tension_seuil.htm))

### Pour approfondir :

On peut trouver de la documentation sur le sujet aux adresses suivantes :

- Quelques données concernant les puissances, capacité des batteries et autonomies :

[http://www.les-vieilles-gamelles.fr/eclairage\\_vtt.html](http://www.les-vieilles-gamelles.fr/eclairage_vtt.html)

- Un mot sur la conversion de puissances lumineuses en watt, souvent données en lumens pour les DEL : <http://www.rapidtables.com/calc/light/lumen-to-watt-calculator.htm>

5. On pourrait au passage tester la dépendance en  $1/\lambda$

**Résolution de problème**  
**L'autonomie d'une lampe de vélo**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel(s) domaine(s) de la physique ce problème aborde-t-il ?</li> <li>– Comment la lampe se comporte-t-elle d'un point de vue électrique ?</li> <li>– Quelle(s) grandeur(s) utiliser pour décrire la lumière émise ?</li> <li>– Quelle information quantitative peut-on tirer de la photographie des piles ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment modéliser une lampe de vélo d'un point de vue électrique ?</li> </ul> <p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel lien simple peut-on postuler entre le nombre de photons émis et le nombre d'électrons qui ont traversé la lampe ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel lien existe-t-il entre la puissance et l'énergie ?</li> <li>– Rappeler l'expression de la puissance électrique ?</li> <li>– Quel lien existe-t-il entre la puissance lumineuse et le flux de photons ?</li> <li>– Combien d'électrons une pile peut-elle fournir ?</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle grandeur physique permet-elle de lier l'approche optique et électrique ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'autonomie est-elle conforme à ce que vous attendiez ?</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La tension obtenue est-elle conforme à ce que vous attendiez ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**L'autonomie d'une lampe de vélo**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les grandeurs électriques utiles sont identifiées</li> <li>– Les grandeurs associées à la lumière émises sont identifiées</li> <li>– La présence des domaines électrique, optique et quantique sont identifiés</li> <li>– La capacité de 800 mA.h de la pile représentée en photo a été repérée.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Effectuer un bilan énergétique (optique ou électrique) pour faire apparaître l'autonomie <math>\Delta t</math> de la lampe.  <u>Pour la version expert :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Penser qu'un électron qui passe donne naissance à un photon émis</li> </ul> </li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le lien entre la puissance et l'énergie est correcte.</li> <li>– L'expression de la puissance électrique <math>P = UI</math> est correcte.</li> <li>– L'expression entre puissance lumineuse et flux de photons est correcte.</li> <li>– L'ordre de grandeur du nombre d'électrons disponibles est correct.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Relier la puissance électrique à la puissance lumineuse émise.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comparer l'autonomie obtenue à son expérience personnelle.</li> <li>– Comparer les autonomies obtenues par les deux approches électrique et optique.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La tension obtenue est-elle conforme à ce que vous attendiez ?</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La baignoire

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les bilans de masses en mécanique des fluides - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	1	2	3	1	2

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Bilans macroscopiques  – Bilans de masse.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert et fixe ou sur un système fermé et mobile.</li> <li>– Utiliser un bilan de masse.</li> </ul>
Équations dynamiques locales  – Relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène dans le champ de pesanteur uniforme dans un référentiel galiléen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Justifier et utiliser cette relation.</li> <li>– Interpréter d'éventuels écarts observés en vérifiant les conditions de validité.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

Une fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

La dernière fiche donne un exemple de résolution proposée par un étudiant, ainsi que les indicateurs de réussite validés ou non dans le cadre d'une évaluation par compétences de cette production.

Résolution de problème  
**La baignoire**  
Enoncé

---

**niveau confirmé**

Une baignoire se remplit en 8 min, robinet ouvert et bonde fermée, et se vide en 12 min, robinet fermé et bonde ouverte.



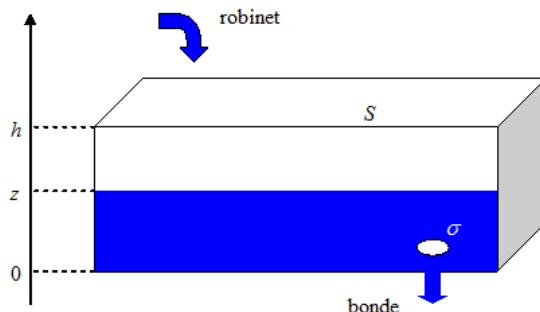
La baignoire déborde-t-elle si on ouvre à la fois le robinet et la bonde ?

## Résolution de problème

# La baignoire

### Exemple de résolution

- Robinet ouvert et bonde fermée, le temps de remplissage est  $T_e = 8$  min, on note le débit massique du robinet  $D_e$ ,
  - Robinet fermé et bonde ouverte, le temps de vidange est  $T_s = 12$  min et on note le débit massique de la bonde  $D_s$ .
- On peut modéliser :
- l'eau par un fluide parfait incompressible de masse volumique  $\mu$ ,
  - la baignoire par un parallélépipède de section  $S$  et de hauteur  $h$ ,
  - la bonde par un trou de section  $\sigma$  au fond de la baignoire.



De plus, on peut considérer que :

- le débit massique du robinet ( $D_e$ ) est une constante,
- le débit massique de la bonde ( $D_s$ ) dépend de la hauteur d'eau  $z(t)$  à l'instant  $t$  : plus  $z$  augmente, plus  $D_s$  est grand.
- La variation de la masse du système ouvert "eau dans la baignoire" est :

$$\frac{dM}{dt} = \mu S \frac{dz}{dt}$$

- d'autre part, un bilan donne immédiatement :

$$\frac{dM}{dt} = +D_e - D_s$$

Robinet ouvert et bonde fermée,

- le bilan donne  $\frac{dM}{dt} = \mu S \frac{dz}{dt} = D_e$
- dont l'intégration donne

$$D_e T_e = \mu S h(1)$$

Robinet fermé et bonde ouverte,

- l'erreur est de considérer le débit comme constant. Considérons une ligne de courant qui part d'un point de la surface d'altitude  $z$ , de pression  $p_{atm}$  (pression atmosphérique) et de vitesse négligeable et ressort par la bonde en un point d'altitude nulle, de pression  $p_{atm}$  et de vitesse  $V_s$ . L'écoulement est quasi-permanent (temps de vidange très long), incompressible car le fluide l'est et parfait car l'eau est peu visqueuse ; on peut donc appliquer le théorème de Bernoulli et affirmer :

$$g.z + \frac{p_{atm}}{\mu} = \frac{p_{atm}}{\mu} + \frac{V_s^2}{2}$$

d'où  $V_s = \sqrt{2gz}$ , formule classique de Torricelli. Le débit volumique sortant par la bonde est alors

$$D_s(z) = \mu \sigma V_s = \mu \sigma \sqrt{2gz}$$

- le bilan donne  $\frac{dM}{dt} = \mu S \frac{dz}{dt} = -D_s$ ,
- qu'on intègre entre  $z(0) = h$  et  $z(T_s) = 0$  :

$$T_s = \frac{S}{\sigma} \sqrt{\frac{2h}{g}} (2)$$

Robinet ouvert et bonde ouverte,

– le bilan de masse ( $M$ ) s'écrit :

$$\frac{dM}{dt} = D_e - D_s$$

– En régime permanent, la variation de la masse du système ouvert est nul :  $\frac{\partial M}{\partial t} = \mu S \frac{dz}{dt} = 0$ . Aussi :

$$D_e = D_s \Leftrightarrow \sigma \sqrt{2 g z_{eq}} = \frac{S h}{T_e} \quad (3)$$

La résolution de (1), (2) et (3) donne

$$\sqrt{\frac{z_{eq}}{h}} = \frac{T_s}{2 T_e}$$

Application numérique :

$$\frac{z_{eq}}{h} = 0,56 < 1$$

Comme  $z_{eq}$  est plus petit que  $h$ , la baignoire ne déborde pas !

Résolution de problème  
**La baignoire**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comment modéliser la géométrie de la baignoire ?</li><li>– Le débit du robinet est-il constant ? Et le débit de la bonde ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comment relier le débit du robinet au temps de remplissage ?</li><li>– Quelle est la vitesse de l'eau dans la bonde ?</li><li>– Comment relier le temps de vidange à la hauteur de la baignoire ?</li><li>– Quelle serait la hauteur de l'eau si celle-ci se stabilisait, bonde et robinet ouverts ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Cette hauteur est-elle plus grande que la hauteur de la baignoire ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**La baignoire**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données du texte (temps de remplissage et temps de vidange) sont relevées et nommées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La géométrie de la baignoire est modélisée.</li> <li>– Le débit entrant dû au robinet est considéré comme constant.</li> <li>– Le débit sortant dû par la bonde est variable et dépend de la hauteur d'eau dans la baignoire.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le débit entrant dû au robinet est exprimé en fonction du temps de remplissage.</li> <li>– La vitesse de vidange par la bonde est exprimée en fonction de la hauteur d'eau dans la baignoire grâce à la formule de Torricelli.</li> <li>– Le débit sortant dû à la bonde est exprimé en fonction du temps de vidange.</li> <li>– La hauteur d'eau à d'équilibre est reliée à l'égalité des débits entrant et sortant.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La hauteur d'eau est comparée à la hauteur de la baignoire, et la réponse à la question est donnée.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Résolution de problème

## La baignoire

### Exemples de résolution évaluée

#### Résolution proposée par un étudiant

On modélise la baignoire par un parallélépipède de section  $S$  et de hauteur  $h$ .

Robinet ouvert et bonde fermée, le temps de remplissage est  $T_e = 8$  min, on note le débit massique du robinet  $D_e$ , le débit massique du robinet est donc

$$D_e = \frac{Sh}{T_e}$$

Robinet fermé et bonde ouverte, le temps de remplissage est  $T_s = 12$  min et on note le débit massique de la bonde  $D_s$  :

$$D_s = \frac{Sh}{T_s}$$

On peut modéliser l'eau par un fluide parfait incompressible de masse volumique  $\mu$ . La variation de la masse du système ouvert "eau dans la baignoire" est :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \mu S \frac{\partial z}{\partial t}$$

Robinet ouvert et bonde ouverte, un bilan donne immédiatement :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = +D_e - D_s$$

Comme  $T_s > T_e$ ,  $D_e - D_s > 0$ , donc  $\frac{\partial M}{\partial t} > 0$ , ainsi  $\frac{\partial z}{\partial t} > 0$  : le niveau de l'eau ne fait que s'élever.  
Donc il y aura un moment où  $z > h$  : la baignoire déborde.

#### Évaluation par compétences de la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les données du texte (temps de remplissage et temps de vidange) sont relevées et nommées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>La géométrie de la baignoire est modélisée.</li> <li>Le débit entrant dû au robinet est considéré comme constant.</li> <li>Le débit sortant dû par la bonde est variable et dépend de la hauteur d'eau dans la baignoire.</li> </ul> <p><i>NB : l'étudiant fait ici une erreur d'analyse.</i></p>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit entrant dû au robinet est exprimé en fonction du temps de remplissage.</li> <li>La vitesse de vidange par la bonde est exprimée en fonction de la hauteur d'eau dans la baignoire grâce à la formule de Torrieilli.</li> </ul> <p><i>NB : l'étudiant ne peut faire cette étape du fait de son erreur d'analyse.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit sortant dû à la bonde est exprimé en fonction du temps de vidange.</li> </ul> <p><i>NB : le résultat est faux mais cohérent avec l'analyse précédente.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La hauteur d'eau à d'équilibre est reliée à l'égalité des débits entrant et sortant.</li> </ul> <p><i>NB : l'étudiant ne trouve pas d'équilibre possible, ce qui cohérent avec l'analyse précédente.</i></p>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>La hauteur d'eau est comparée à la hauteur de la baignoire, et la réponse à la question est donnée.</li> </ul> <p><i>NB : la réponse est fausse mais cohérente avec l'analyse précédente.</i></p>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le bleu de bromothymol

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème expérimentale sur la détermination d'un  $pK_A$  - programme de première année.

Cette résolution de problème est à proposer avant la présentation en cours des indicateurs colorés.

Les trois versions de cette résolution de problème requièrent la conception et la réalisation du protocole.

La **version 1** reste relativement simple car le document présente des courbes d'absorbance qui peuvent donner des pistes vers l'une des voies de résolutions possible. L'appropriation joue donc un rôle majeur. L'élaboration complète du protocole et sa mise en œuvre restent difficiles.

La **version 2** du problème présente les mêmes difficultés pratiques ; le document présente des courbes de distribution, ce qui peut être le point de départ de la réflexion des étudiants.

La **version 3** du problème est encore plus difficile car elle ne présente que la notion d'indicateur coloré, les solutions et le matériel disponibles, ainsi que la problématique. Il y a donc un travail important d'analyse à effectuer.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	3	2	3	2	2
niveau "confirmé"	3	3	3	2	2
niveau "expert"	2	4	3	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Capacités expérimentales : Dosages par titrages	
– Indicateurs colorés de fin de titrage	
Transformations chimiques	
– Équation de réaction ; constante thermodynamique d'équilibre.	– Déterminer une constante d'équilibre.
Réactions acide-base, de complexation, de précipitation	
Réactions acido-basiques – constante d'acidité ; – diagramme de prédominance ;	– Retrouver les valeurs de constantes d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

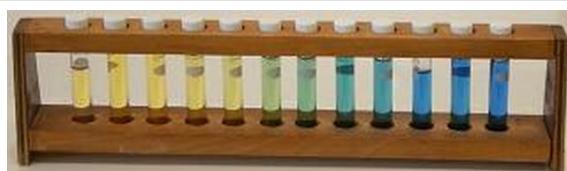
Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le bleu de bromothymol**  
 Enoncé

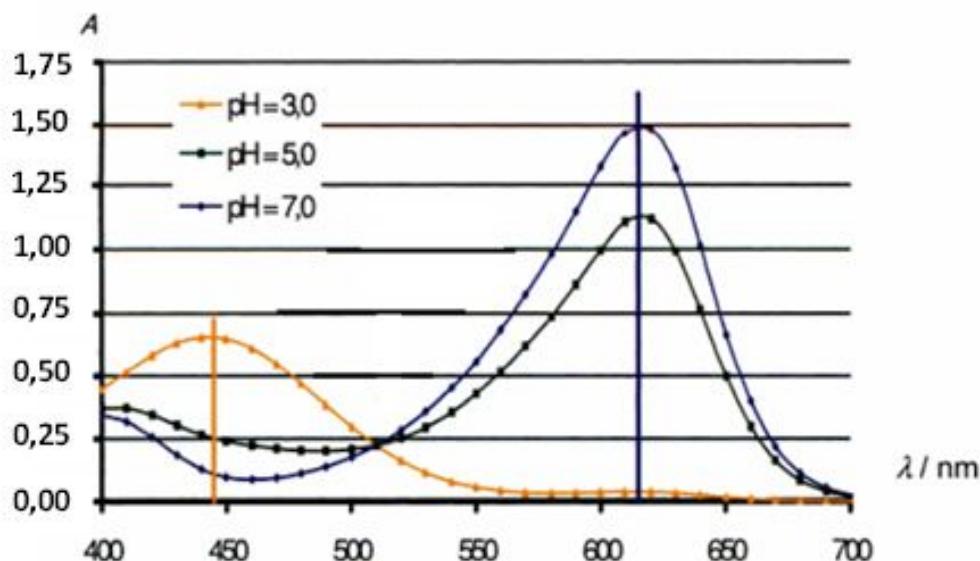
**niveau initiation**



Un indicateur coloré acido-basique est un acide  $HInd$  (ou une base  $Ind^-$ ) faible organique, dont les formes conjuguées sont de couleurs différentes. Ainsi en fonction du  $pH$  la couleur de la solution dépend de la forme prépondérante ou de la superposition des deux couleurs si aucune forme n'est prépondérante ; la propriété qui lie couleur apparente et  $pH$  est appelée halochromisme.

Chaque indicateur est caractérisé par :

- le  $pK_A$  du couple  $HInd/Ind^-$  représentant l'indicateur ;
- les couleurs des formes acide et basique ;
- la zone de virage : zone de  $pH$  où coexistent les formes acide et basique dans des concentrations du même ordre de grandeur, donc présentant une couleur intermédiaire.



**Spectre d'absorption d'un indicateur coloré, le vert de bromocrésol, en milieu tamponné à pH 3,0 – 5,0 – 7,0**

Spectre d'absorption du vert de bromocrésol en milieu tamponné à  $pH$  3,0 ; 5,0 et 7,0.

#### Solutions et matériel à disposition

On dispose des solutions suivantes :

- Solution mère de BBT à  $5 \times 10^{-4}$  mol · L $^{-1}$ ,
- Solution d'acide chlorhydrique à 0,1 mol · L $^{-1}$ ,
- Solution de soude à 0,1 mol · L $^{-1}$ ,
- Solution tampon à  $pH = 6,8$ .

On dispose de la verrerie classique du laboratoire de chimie et des appareils de mesure classiques de chimie générale (pH-mètre, conductimètre, spectrophotomètre UV-visible).

**Étudier expérimentalement l'halochromisme du BBT.  
 Déterminer son  $pK_A$ .**

### niveau confirmé

Les indicateurs colorés de  $pH$  (ou indicateurs acide-base) sont des couples acide/base, notés  $HInd/Ind^-$ , dont les formes acide  $HInd$  et basique  $Ind^-$  diffèrent par leur couleur. Ainsi en fonction du  $pH$  la couleur de la solution dépend de la forme prépondérante ou de la superposition des deux couleurs si aucune forme n'est prépondérante ; la propriété qui lie couleur apparente et  $pH$  est appelée halochromisme.

Chaque indicateur est caractérisé par :

- le  $pK_A$  du couple  $HInd/Ind^-$  ;
- les couleurs des formes acide et basique ;
- la zone de virage : zone de  $pH$  où coexistent les formes acide et basique dans des concentrations du même ordre de grandeur, donc présentant une couleur intermédiaire.

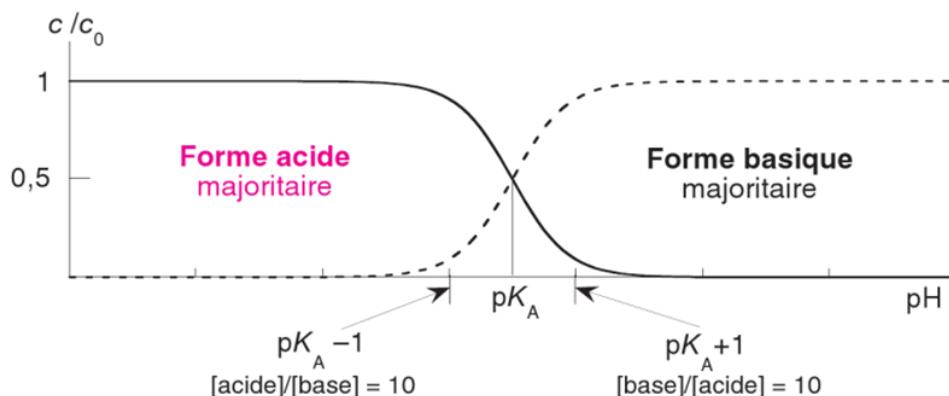


Diagramme de distribution des formes acide et base conjuguées d'un couple monoacide/monobase en fonction du  $pH$ .

#### Solutions et matériel à disposition

On dispose des solutions suivantes :

- Solution mère de BBT à  $5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,
- Solution d'acide chlorhydrique à  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,
- Solution de soude à  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,
- Solution tampon à  $pH = 6,8$ .

On dispose de la verrerie classique du laboratoire de chimie et des appareils de mesure classiques de chimie générale (pH-mètre, conductimètre, spectrophotomètre UV-visible).

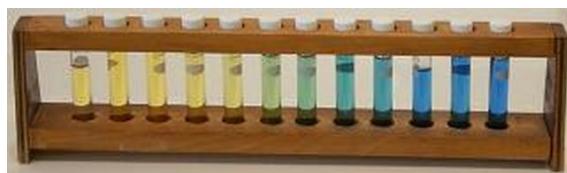
**Étudier expérimentalement l'halochromisme du BBT.**

Déterminer son  $pK_A$ .

---

**niveau expert**

---



Les indicateurs colorés de  $pH$  (ou indicateurs acide-base) sont des couples acide/base, notés  $HInd/Ind^-$ , dont les formes acide  $HInd$  et basique  $Ind^-$  diffèrent par leur couleur. Ainsi en fonction du  $pH$  la couleur de la solution dépend de la forme prépondérante ou de la superposition des deux couleurs si aucune forme n'est prépondérante ; la propriété qui lie couleur apparente et  $pH$  est appelée halochromisme.

Chaque indicateur est caractérisé par :

- le  $pK_A$  du couple  $HInd/Ind^-$  ;
- les couleurs des formes acide et basique ;
- la zone de virage : zone de  $pH$  où coexistent les formes acide et basique dans des concentrations du même ordre de grandeur, donc présentant une couleur intermédiaire.

**Solutions et matériel à disposition**

On dispose des solutions suivantes :

- Solution mère de BBT à  $5 \times 10^{-4}$  mol · L $^{-1}$ ,
- Solution d'acide chlorhydrique à 0,1 mol · L $^{-1}$ ,
- Solution de soude à 0,1 mol · L $^{-1}$ ,
- Solution tampon à  $pH = 6,8$ .

On dispose de la verrerie classique du laboratoire de chimie et des appareils de mesure classiques de chimie générale (pH-mètre, conductimètre, spectrophotomètre UV-visible).

**Étudier expérimentalement l'halochromisme du BBT.**

**Déterminer son  $pK_A$ .**

**Résolution de problème**  
**Le bleu de bromothymol**  
**Exemple de résolution**

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

On étudie une solution d'indicateur coloré  $HInd/Ind^-$  de concentration totale  $C = [HInd] + [Ind^-]$ .

On cherche à déterminer les couleurs possibles de l'indicateur coloré selon le pH et le  $pK_A$ .

La méthode adaptée pour l'étude de l'indicateur coloré est la spectrophotométrie. Pour chaque valeur de longueur d'onde  $\lambda$ , on notera les coefficients d'absorption molaire de  $HInd$  et  $Ind^-$  :  $\epsilon(HInd, \lambda)$  et  $\epsilon(Ind^-, \lambda)$ , respectivement.

Chaque forme présente un maximum d'absorbance à une longueur d'onde donnée. On note  $\lambda_{MAX_{HInd}}$  la longueur d'onde du maximum de la forme acide et  $\lambda_{MAX_{Ind^-}}$  la longueur d'onde du maximum de la forme basique.

Pour la version 1 :

Les courbes du document représentent le spectre d'absorbance de l'indicateur coloré dans le visible pour 3 valeurs bien distinctes de pH. On observe un maximum en milieu acide distinct du maximum en milieu basique → cela correspond aux deux couleurs de l'indicateur coloré.

Pour la version 2 :

Sur les courbes de distribution, on note que  $pH = pK_A$  lorsque les concentrations en forme acide et basique sont égales. Le  $pK_A$  peut alors être déterminé graphiquement.

Analyser	– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites. – Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. – Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. – Établir une stratégie de résolution.
----------	---

Faire des tests rapides en milieux acides et basiques pour observer les différentes couleurs → on observe un virage du bleu au jaune donc 2 maxima dans le visible attendus

Réaliser alors des spectres des solutions acide et basique afin de déterminer :

- les maxima d'absorbance  $\lambda_{MAX_{HInd}} = 430$  nm et  $\lambda_{MAX_{Ind^-}} = 620$  nm.
- la concentration de solution de BBT à utiliser pour obtenir des spectres satisfaisants → dilution entre 1/10 et 1/20

Relations à exploiter :

- Conservation de la matière :  $[HInd] + [Ind^-] = C$ , si le travail est réalisé à concentration constante.
- Relation de Henderson-Hasselbalch :  $pH = pK_A + \log \frac{[Ind^-]}{[HInd]}$ .
- Les courbes de distribution se croisent en  $pH = pK_A$
- Loi de Beer Lambert :  $A = \sum_i \epsilon_i \ell C_i$ ; elle est additive.

La loi de Beer Lambert a une expression simple si

- seule la forme acide ou basique est présente en solution
- on évalue l'absorbance à une longueur d'onde où seule l'une des formes absorbe

Réaliser	– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. – Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.
----------	--

Pour une longueur d'onde et un pH quelconque

$$A(\lambda) = \epsilon(HInd, \lambda) [HInd] \ell + \epsilon(Ind^-, \lambda) [Ind^-] \ell$$

1<sup>ière</sup> méthode :

On travaille à concentration totale  $C$  constante :  $[Ind^-] + [HInd] = C$ .

En se plaçant en milieu suffisamment acide ( $pH = 2$  ou  $3$ ), on peut négliger  $[Ind^-]$  et  $[HInd] = C$   
 $\rightarrow A(\lambda)_A = \epsilon(HInd, \lambda) \ell C$ .

De même, en se plaçant en milieu suffisamment basique ( $pH = 11$  ou  $12$ ) on peut négliger  $[HInd]$  et  $[Ind^-] = C$ .  
 $\rightarrow A(\lambda)_B = \epsilon(Ind^-, \lambda) \ell C$ .

Donc :

$A(\lambda) - A(\lambda)_A = (\epsilon(Ind^-, \lambda) - \epsilon(HInd, \lambda)) \ell [Ind^-]$   
et  $A(\lambda) - A(\lambda)_B = (\epsilon(HInd, \lambda) - \epsilon(Ind^-, \lambda)) \ell [HInd]$

D'où :  $\frac{[Ind^-]}{[HInd]} = \frac{A(\lambda) - A_A(\lambda)}{A_B(\lambda) - A(\lambda)}$

Ainsi,  $pH = pK_A + \log \left( \frac{A(\lambda) - A_A(\lambda)}{A_B(\lambda) - A(\lambda)} \right)$ .

On réalise alors les spectres d'absorbance entre 400nm et 700nm de 3 solutions :

- acide (validée par simple mesure au papier pH et repérage de la coloration acide du BBT)
- basique (validée par simple mesure au papier pH et repérage de la coloration acide du BBT)
- en milieu tamponné de pH = 6,8 connu

La valeur du  $pK_A$  peut être déterminée pour chaque valeur de la longueur d'onde, ce qui permet le calcul d'une valeur moyenne du  $pK_A$  ainsi que d'un écart-type et d'une incertitude élargie.

Exemple de résultat :  $pK_A = 7,13 \pm 0,05$ , pour un intervalle de confiance à 95%.

#### 2<sup>ème</sup> méthode : Tracé des courbes de distribution

On travaille à concentration totale  $C$  constante :  $[Ind^-] + [HInd] = C$ .

Pour tracer les courbes de distribution des formes acide et basique du bleu de bromothymol, il faut disposer de solutions de cet indicateur dans lesquelles les quantités en forme acide,  $HInd$  et en forme basique  $Ind^-$  sont variables (à concentration molaire constante en indicateur).

On prépare une solution mère de concentration connue en BBT, de pH voisin de 3 en volume suffisant pour négliger les dilutions suivantes ; ajouter au goutte à goutte la solution de soude, préalablement diluée (par exemple au 1/2) de manière à faire varier le pH de manière suffisamment progressive, tout en négligeant la dilution.

On choisit  $\lambda = 620$  nm car seule la forme basique absorbe à cette longueur d'onde, tandis qu'à 430 nm, l'absorbance de la forme basique n'est pas négligeable.

Ainsi, quel que soit le pH de la solution :  $A(620) = \epsilon(Ind^-, 620) [Ind^-] \ell$ .

En se plaçant en milieu suffisamment basique, on peut négliger  $[HInd]$  et  $[Ind^-] = C$ , l'absorbance à cette longueur d'onde est alors maximale et :  $A(620)_B = \epsilon(Ind^-, 620) \ell C = A_{MAX}$ .

Ainsi :  $[Ind^-] = C \left( \frac{A(620)}{A_{MAX}} \right)$  et  $\%Ind^- = 100 \left( \frac{A(620)}{A_{MAX}} \right)$ .

Et :  $[HInd] = C \left( 1 - \frac{A(620)}{A_{MAX}} \right)$  et  $\%HInd = 100 \left( 1 - \frac{A(620)}{A_{MAX}} \right)$ .

On mesure aussi pour chaque solution la valeur du pH.

On trace alors les courbes de distribution, dont le point d'intersection permet de déterminer le  $pK_A$  du BBT.

Exemple de résultat :  $pK_A = 6,9$ .

#### 3<sup>ème</sup> méthode : Autre tracé des courbes de distribution

Elle repose sur les mesures d'absorbance à 430 nm et 620 nm pour différentes valeurs de pH ; les mesures aux deux longueurs d'ondes sont utilisées pour déterminer les concentrations en  $HInd$  et  $Ind^-$  ; cette approche est décrite dans le BUP d'octobre 2014, p1265 :

[http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID\\_fiche=21838](http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=21838)

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

#### 1<sup>ère</sup> méthode :

On constate que la solution de BBT en milieu tamponné à pH = 6,8 est de couleur verte, on est donc dans la zone de virage, et cela est cohérent avec la valeur de  $pK_A$  obtenue. Cette approche ne donne cependant pas précisément la zone de virage, qui peut être estimée entre  $(pK_A - 1)$  et  $(pK_A + 1)$ .

#### 2<sup>ème</sup> méthode :

Cette stratégie permet de suivre progressivement l'évolution de la couleur de la solution de BBT lors de l'ajout de soude, et donc de repérer plus précisément la zone de virage ( $6,0 < \text{pH} < 7,6$ ) qui inclut le  $pK_A$ .

**Résolution de problème**  
**Le bleu de bromothymol**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la nature d'un indicateur coloré ?</li> <li>– Que peut-on dire des formes acide et basique de l'indicateur coloré ?</li> <li>– Qu'est-ce que l'halochromisme ?</li> <li>– Par quelle méthode expérimentale peut-on caractériser l'indicateur coloré ?</li> <li>– De quelles solutions dispose-t-on ?</li> <li>– Que permettent les solutions à disposition ?</li> </ul> <p><u>Pour la version 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Que représentent les courbes du document ?</li> <li>– Sur ces courbes, quel est l'intérêt de modifier le <math>pH</math> ?</li> </ul> <p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les courbes de distribution permettent-elles de déterminer le <math>pK_A</math> ?</li> <li>– Comment établir expérimentalement les courbes de distribution ?</li> </ul>
Analyser	<p><u>Pour la version 3 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment utiliser le spectrophotomètre pour caractériser les espèces acide et basique ? Comment exploiter la différence d'allure observée ?</li> <li>– Que modifie-t-on en faisant varier le pH de la solution d'indicateur coloré ? Comment l'exploiter graphiquement ?</li> </ul> <p><u>Pour les trois versions :</u> Deux méthodes sont décrites pour résoudre ce problème.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– De quelles variables dépendant l'absorbance et le coefficient d'extinction molaire ?</li> <li>– Comment identifier rapidement les couleurs de l'indicateur coloré ?</li> <li>– Quels sont les domaines du(des) spectre(s) importants ?</li> <li>– Quelle loi relie l'absorbance d'une solution à sa concentration ?</li> <li>– Comment exploiter l'additivité de cette loi ?</li> <li>– Comment s'assurer d'être dans le domaine de validité de la loi de Beer-Lambert ?</li> <li>– Quelles sont les situations dans lesquelles la loi de Beer-Lambert se simplifie ?</li> </ul> <p><u>Méthode 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle relation relie <math>pH</math> et <math>pK_A</math> ?</li> </ul> <p><u>Méthode 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle représentation graphique permet de déterminer le <math>pK_A</math> d'un couple acido-basique ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la conséquence pour la loi de Beer-Lambert ?</li> <li>– Pourquoi faut-il s'assurer de travailler à concentration totale constante ?</li> </ul> <p><u>Méthode 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Que remarque-on sur le spectre en milieu très acide ? en milieu très basique ?</li> <li>– Quel est l'intérêt de la solution tampon ?</li> <li>– Quelle est l'expression des concentrations <math>[HInd]</math> et <math>[Ind^-]</math> en fonction de l'absorbance ?</li> </ul> <p><u>Méthode 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sur quel facteur doit-on jouer pour faire varier les concentrations en forme acide et basique ?</li> <li>– Comment procéder expérimentalement pour faire varier progressivement le <math>pH</math> ?</li> <li>– Quel est le maximum le plus simple à exploiter ? Pourquoi ?</li> <li>– Comment peut-on alors réécrire la loi de Beer-Lambert ?</li> <li>– Quelle situation expérimentale permet de déterminer simplement le terme « <math>\epsilon(Ind^-, 620)\ell</math> » ?</li> <li>– Quelle est l'expression des concentrations <math>[HInd]</math> et <math>[Ind^-]</math> en fonction de l'absorbance ?</li> </ul>
Valider	<p><u>Méthode 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la couleur du BBT dans la solution tampon ?</li> </ul> <p><u>Méthode 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Au cours de la manipulation, quelle est la zone de virage observée ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Le bleu de bromothymol**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La notion d'halochromisme est comprise</li> <li>– L'indicateur coloré est identifié comme une espèce acido-basique</li> <li>– L'existence de deux formes colorées est identifiée</li> <li>– L'utilisation de la spectrophotométrie est envisagée</li> <li>– La possibilité de faire varier le pH de la solution d'indicateur coloré est envisagée</li> </ul> <p><u>Pour la version 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'influence du pH sur les spectres d'absorbance est observée</li> <li>– La présence, sur les spectres, de deux maxima différents selon le pH est observée</li> </ul> <p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le <math>pK_A</math> est repéré à l'intersection des deux courbes de distribution.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les 2 couleurs du BBT sont identifiées</li> <li>– Les longueurs d'onde correspondant aux maxima sont identifiées</li> <li>– Le domaine de concentration exploitable est estimé</li> <li>– La loi de Beer-Lambert est donnée et son additivité exploitée</li> <li>– Les cas pour lesquels l'expression de la loi de Beer-Lambert est simple sont identifiés</li> </ul>
Réaliser	<p><u>Méthode 1 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'étude est effectuée à concentration totale constante.</li> <li>– Les spectres du BBT en milieu acide, basique, et neutre sont tracés.</li> <li>– Les expressions de l'absorbance en milieu acide, basique et neutre sont données.</li> <li>– La formule de Henderson-Hesselbach en fonction de l'absorbance est obtenue.</li> <li>– La valeur du <math>pK_A</math> est obtenue.</li> <li>– L'incertitude sur le résultat obtenu est évaluée.</li> </ul> <p><u>Méthode 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La nécessité de faire varier progressivement le pH est identifiée.</li> <li>– Le choix de la longueur d'onde d'étude est explicité.</li> <li>– Les expressions des concentrations en forme acide et basique en fonction de l'absorbance sont données.</li> <li>– Les courbes de distribution sont tracées.</li> <li>– La valeur du <math>pK_A</math> est obtenue.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La pertinence de valeur de <math>pK_A</math> obtenue est vérifiée.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La boîte à électrons

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les boîtes quantiques à une dimension - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	3	2	2	2	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approche ondulatoire de la mécanique quantique – Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie. – Énergie de confinement quantique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir les expressions des énergies des états stationnaires.</li> <li>– Faire l'analogie avec la recherche des pulsations propres d'une corde vibrante fixée en ses deux extrémités.</li> <li>– Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.</li> <li>– Associer le confinement d'une particule quantique à une augmentation de l'énergie cinétique.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**La boîte à électrons**  
 Enoncé

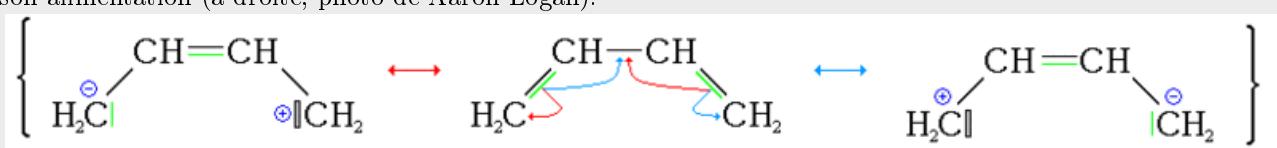
## La délocalisation des électrons par conjugaison

D'après les extraits de divers articles Wikipédia  
*Carotène, butadiène, mésométrie*

**L'alternance liaison simple - doublet liant dans une molécule est une "boîte à électron" à une dimension**

En chimie, la conjugaison désigne une délocalisation d'électrons dans les molécules, que l'on représente par une combinaison virtuelle de structures aux électrons localisés appelées mésomères, lorsqu'on a par exemple une alternance liaison simple - liaison double - liaison simple, comme dans un diène conjugué.

Le diène conjugué le plus simple est le buta-1,3-diène (en dessous : ses formules mésomères), un hydrocarbure de formule  $C_4H_6$  gazeux incolore et inflammable. C'est un important réactif qui est utilisé dans la synthèse de nombreux polymères. La molécule de  $\beta$ -carotène  $C_{40}H_{56}$  possède onze doubles liaisons conjuguées. Elle peut absorber une lumière bleu-indigo et donne sa couleur orange à la carotte. La coloration des plumes du flamant rose est due à l'accumulation de carotène contenu dans son alimentation (à droite, photo de Aaron Logan).



### niveau confirmé

Évaluer l'ordre de grandeur de la longueur d'onde d'absorption du buta-1,3-diène dans le proche ultra-violet.

# Résolution de problème

## La boîte à électrons

### Exemple de résolution

Le buta-1,3-diène présente une alternance liaison double - liaison simple - liaison double, avec des électrons  $\pi$  délocalisables au niveau des deux doubles liaisons.

On peut modéliser cet espace à une dimension comme un puits quantique rectangulaire de longueur  $L$  de profondeur infinie.

Il s'agit de calculer l'énergie  $E_c$  des électrons pour avoir un ordre de grandeur de l'énergie  $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  des photons.

#### Première méthode :

La relation d'Heisenberg  $\Delta k_x \Delta x \approx 2\pi$  donne, puisque  $p = \hbar k$  et  $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\Delta p_x \Delta x \approx h \Rightarrow 2mE L^2 \approx h^2$$

donc

$$\frac{hc}{\lambda} \approx \frac{h^2}{2mL^2} \Rightarrow \lambda \approx \frac{2mcL^2}{h}$$

AN (en prenant 3 fois la distance entre deux atomes :  $L \approx 3 \times 10^{-10}$  m) :

$$\lambda \approx \frac{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8 \times (3 \times 10^{-10})^2}{6,62 \times 10^{-34}} \approx 0,1 \text{ } \mu\text{m}$$

$\lambda$  est bien dans l'ultra violet proche ( $< 400$  nm).

#### Deuxième méthode :

La fonction d'onde est une superposition d'OPPM :

$$\tilde{\psi}(x, t) = \tilde{\psi}_0 e^{-i(\omega t \pm k x)}$$

on peut aussi la réécrire sous forme de sinus ou cosinus :

$$\tilde{\psi}(x, t) = \tilde{\psi}_0 \sin(kx + \varphi) e^{-i\omega t}$$

avec les conditions aux limites  $\tilde{\psi}(x = 0, t) = \tilde{\psi}(x = \ell, t) = 0$ . On peut par exemple choisir  $\varphi = 0$ . D'autre part  $k\ell = n\pi$  avec  $n$  un entier.

Cela revient à

$$\frac{2\pi}{\lambda} \ell = n\pi \Rightarrow \ell = n \frac{\lambda}{2}$$

avec  $n$  un entier. Il y a en effet des nœuds à la fonction d'onde en  $x = 0$  et  $x = \ell$ , comme pour la corde de Melde.

En réinjectant dans l'équation de Schrödinger, on trouve

$$k^2 = \frac{2m\omega}{\hbar} = \frac{2mE}{\hbar^2} = \left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2 \Rightarrow E = E_n = \frac{1}{2m} \left(\frac{n\pi\hbar}{\ell}\right)^2$$

On peut par exemple prendre la transition entre les deux premiers niveaux  $n = 1 \rightarrow n = 2$ , soit

$$\frac{hc}{\lambda} \approx (E_2 - E_1) = \frac{3}{2m} \left(\frac{\pi\hbar}{\ell}\right)^2 \Rightarrow \lambda \approx \frac{4}{3} \frac{2mc\ell^2}{h} = \frac{4}{3} \frac{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8 \times (3 \times 10^{-10})^2}{6,62 \times 10^{-34}} \approx 0,1 \text{ } \mu\text{m}$$

$\lambda$  est bien dans l'ultra violet proche ( $< 400$  nm).

#### Troisième méthode :

On calcule les énergies des niveaux, comme dans la seconde méthode :

$$E = E_n = \frac{1}{2m} \left(\frac{n\pi\hbar}{\ell}\right)^2$$

On compte les électrons  $\pi$  délocalisés : il y a deux doublet donc 4 électrons. Puis on remplit les niveaux, deux électrons pouvant coexister sur le même niveau (2 projections de spin). Aussi, les niveaux 1 et 2 sont occupés.

Il s'agit donc de la transition entre les niveaux  $n = 2$  et  $n = 3$ , soit

$$\frac{hc}{\lambda} \approx (E_3 - E_2) = \frac{3^2 - 2^2}{2m} \left(\frac{\pi\hbar}{\ell}\right)^2 \Rightarrow \lambda \approx \frac{4}{5} \frac{2mc\ell^2}{h} = \frac{4}{5} \frac{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8 \times (3 \times 10^{-10})^2}{6,62 \times 10^{-34}} \approx 0,1 \text{ } \mu\text{m}$$

$\lambda$  est bien dans l'ultra violet proche ( $< 400$  nm).

NB : en réalité  $\lambda = 217$  nm.

Résolution de problème  
**La boîte à électrons**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est la relation entre l'énergie d'un photon et la longueur d'onde de l'onde qui lui est associée ?</li><li>– Estimer la taille <math>\ell</math> de l'espace à une dimension dans lequel les électrons délocalisés peuvent se déplacer.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Estimer l'énergie des électrons dans un puits quantique rectangulaire de profondeur infini de longueur <math>\ell</math>.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Dans quel domaine de longueur d'onde se trouve l'ultra-violet proche ?</li></ul>

Résolution de problème  
**La boîte à électrons**  
Exemples d'indicateurs de réussite

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données du texte sont relevées et nommées.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'espace à une dimension dans lequel les électrons délocalisés peuvent se déplacer est assimilé à un puits quantique rectangulaire de profondeur infini.</li><li>– La longueur de cet espace est estimée.</li><li>– La relation entre l'énergie d'un photon et la longueur d'onde de l'onde qui lui est associée est rappelée.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Une expression de l'énergie des électrons dans un puits quantique rectangulaire de profondeur infini est donnée d'une façon ou d'une autre.</li><li>– La valeur de la longueur d'onde est déduite.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La valeur de la longueur d'onde est comparée à celles du domaine de l'ultra violet proche.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# La carboxylase

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur la stéréochimie - programme de première année.

Dans la version "expert", cette résolution de problème illustre la porosité entre résolution de problème et approche documentaire, car elle inclut un nombre important de documents, et nécessite une importante mise en relation entre eux.

La version "initiation" présente quelques difficultés pour les étudiants, surtout concernant l'appropriation et l'analyse des documents :

- compréhension des expériences décrites
- analyse des structures spatiales de l'acide glutamique et de ses dérivés

La version "expert" du problème présente les mêmes difficultés pour les étudiants mais le sujet est rendu plus difficile par rapport à la version "initiation" car la stéréochimie de l'acide glutamique est introduite via son appartenance à la série L en nomenclature de Fischer ; l'étudiant est donc amené à exploiter cette représentation à l'aide des indications fournies, ce qui nécessite une bonne compréhension du document, une remobilisation des connaissances préalables en nomenclature des molécules organiques, et une bonne maîtrise de la représentation de Cram qu'il faut être capable de modifier. La question sur la caractérisation de la réaction de carboxylation est par ailleurs plus ouverte.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	1	2	1	2
niveau "expert"	4	2	3	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Description des molécules organiques <ul style="list-style-type: none"> <li>- Représentations topologique, de Cram, de Newmann, perspective.</li> <li>- Descripteurs stéréochimiques R, S, Z, E.</li> <li>- Stéréoisomérie de configuration : énantiométrie, diastéréoisométrie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Représenter une molécule à partir de son nom, fourni en nomenclature systématique, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques, en utilisant un type de représentation donné.</li> <li>- Attribuer les descripteurs stéréochimiques aux centres stéréogènes.</li> </ul>

A noter qu'en filière BCPST, les documents 3 et 4 de la version "expert" ne sont pas nécessaires, la représentation de Fischer étant au programme.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

# Résolution de problème

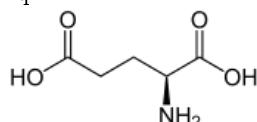
## La carboxylase

### Enoncé

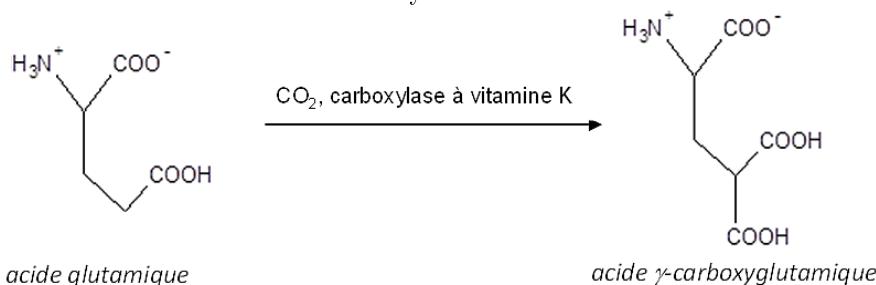
#### niveau initiation

##### Document 1 : L'acide glutamique

Une des étapes importantes de la cascade réactionnelle conduisant à la coagulation sanguine est la carboxylation d'un résidu glutamique d'une protéine nommée préprothrombine, par une carboxylase à vitamine K. L'étude des caractéristiques de cette carboxylation est nécessaire pour la compréhension des processus de coagulation. Cette compréhension permet éventuellement ensuite de mettre au point des anti-coagulants anti-vitamine K. L'acide glutamique est l'acide  $\alpha$ -aminé naturel de chaîne latérale  $-\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$ , contenu dans la préprothrombine. Sous forme solide, l'acide glutamique a la forme suivante :

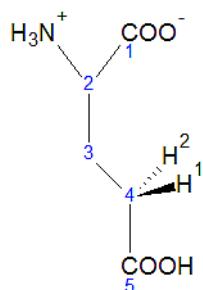


En solution, la molécule est sous la forme doublement ionisée (« zwitterion »). En présence de la carboxylase à vitamine K, le zwitterion subit la réaction de carboxylation suivante :



##### Document 2 : Étude stéréochimique expérimentale de la carboxylation

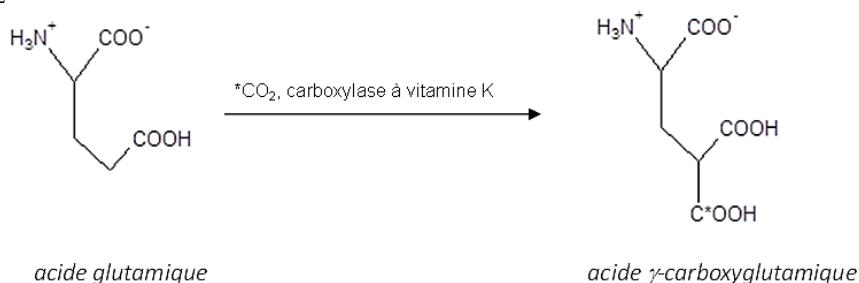
Première étude :



En remplaçant  $\text{H}^1$  ou  $\text{H}^2$  par un atome de fluor non réactif vis-à-vis de la carboxylation, on s'aperçoit que seul le dérivé fluoré de configuration (2S, 4R) pourra subir ultérieurement la carboxylation.

Seconde étude :

On réalise la carboxylation de l'acide glutamique avec du dioxyde de carbone marqué au carbone 13, repéré par un astérisque  $^{*}\text{CO}_2$ .



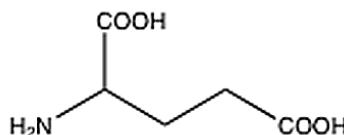
On obtient alors le stéréoisomère (2S,4S).

**Expliciter la stéréochimie de la réaction de carboxylation, en précisant quel est l'hydrogène arraché lors de la réaction, et comment a lieu l'attaque du dioxyde de carbone.**

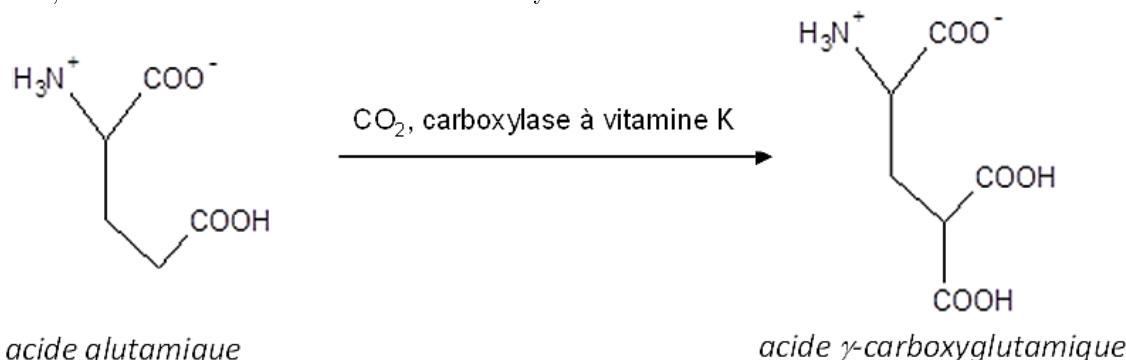
---

**niveau expert**
**Document 1 : L'acide glutamique**

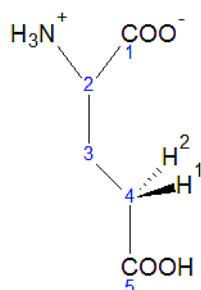
Une des étapes importantes de la cascade réactionnelle conduisant à la coagulation sanguine est la carboxylation d'un résidu glutamique d'une protéine nommée préprothrombine, par une carboxylase à vitamine K. L'étude des caractéristiques de cette carboxylation est nécessaire pour la compréhension des processus de coagulation. Cette compréhension permet éventuellement ensuite de mettre au point des anti-coagulants anti-vitamine K. L'acide glutamique est l'acide  $\alpha$ -aminé naturel de chaîne latérale  $-\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$ , appartenant à la série L, contenu dans la préprothrombine. Sous forme solide, la fonction acide carboxylique de l'acide glutamique est protonée et la fonction amine est déprotonnée, la molécule a donc la forme ci-dessous :



En solution, la molécule est sous la forme doublement ionisée (« zwitterion »). En présence de la carboxylase à vitamine K, le zwitterion subit la réaction de carboxylation suivante :

**Document 2 : Étude stéréochimique expérimentale de la carboxylation**

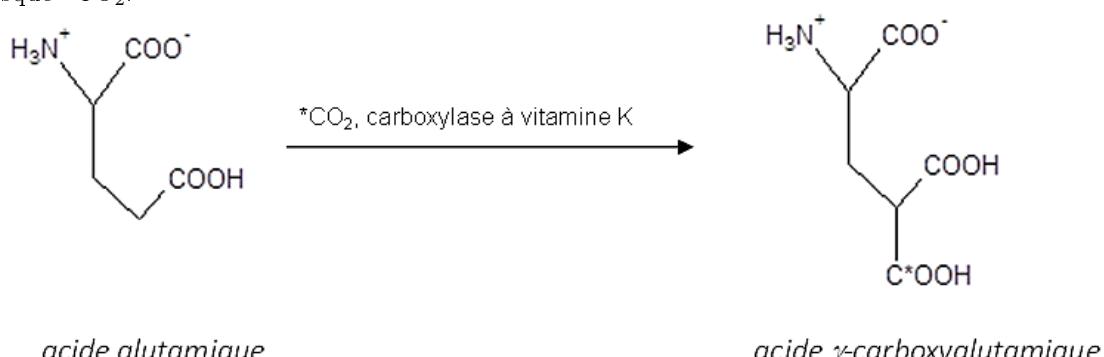
Première étude :



En remplaçant  $\text{H}^1$  ou  $\text{H}^2$  par un atome de fluor non réactif vis-à-vis de la carboxylation, on s'aperçoit que seul le dérivé fluoré de configuration (2S, 4R) pourra subir ultérieurement la carboxylation.

Seconde étude :

On réalise la carboxylation de l'acide glutamique avec du dioxyde de carbone marqué au carbone 13, repéré par un astérisque  $^{*}\text{CO}_2$ .



On obtient alors le stéréoisomère (2S,4S).

**Document 3 : Représentation en projection de Fischer**

La projection de Fischer constitue un mode standardisé de représentation plane des atomes ou groupes d'atomes liés à un carbone tétraédrique. Elle est surtout utilisée pour représenter les sucres (oses) et les acides aminés.

Représentation de Cram	Orientation avant projection	Projection de Fischer
alanine : 		

On procède comme suit :

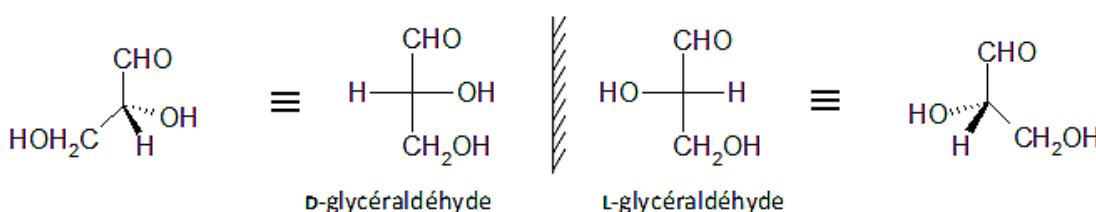
- le carbone tétraédrique est placé dans le plan de projection (plan de la feuille).
- la chaîne carbonée la plus longue est alors préalablement positionnée verticalement, en arrière du plan de projection. L'atome de carbone placé en haut de la chaîne verticale est celui engagé dans la fonction carbonée dont l'état d'oxydation est le plus élevé. Si les atomes de carbone aux deux extrémités de la chaîne sont identiques, celui qui porte l'indice de position 1 dans la nomenclature officielle est placé en haut.
- les autres substituants du carbone tétraédrique, horizontaux, sont alors en avant du plan de projection.

La projection de la molécule ainsi orientée dans le plan de la feuille constitue la représentation en projection de Fischer. Les traits verticaux représentent les liaisons situées en arrière du plan de projection ; ceux horizontaux les liaisons situées en avant de ce plan.

D'après *Chimie disséquée pour les bios*, ed. Bréal

**Document 4 : Nomenclature D/L de Fischer**

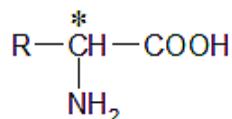
Ce système, développé par Fischer bien avant que la configuration absolue des molécules n'ait été établie, fut initialement défini à partir de la projection des énantiomères du plus simple des oses chiraux : le 2,3-dihydroxypropanal (glycéraldéhyde HOCH<sub>2</sub>-CHOH-CHO).



Par convention, Fischer a choisi d'appeler D-glyceraldéhyde l'énantiomère dont le groupe hydroxyle -OH est à droite de la chaîne carbonée dans la projection de Fischer et L-glyceraldéhyde celui dont le groupe -OH est à gauche de la chaîne carbonée.

Par analogie au glycéraldéhyde, Fischer a divisé la famille des oses en deux séries : la série D et la série L. L'appartenance à l'une ou l'autre des séries est définie par la position du groupe hydroxyle porté par le premier atome de carbone asymétrique en partant du bas de la projection de Fischer.

La nomenclature D et L est également utilisée pour les acides aminés de formule générale :



C'est alors la position du groupe amino qui détermine la série : si le NH<sub>2</sub> est à droite de la chaîne carbonée dans la projection de Fischer, il s'agit d'un acide aminé de la série D ; s'il se trouve à gauche, il appartient à la série L.

**Déterminer le descripteur stéréochimique de l'acide glutamique et expliciter la stéréochimie de la réaction de carboxylation.**

**Résolution de problème**  
**La carboxylase**  
**Exemple de résolution**

<b>S'approprier le problème.</b>	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
----------------------------------	--

- En solution, l'acide glutamique est sous forme zwitterionique.
- La réaction de carboxylation a lieu schématiquement en deux étapes : élimination d'un H et fixation de COOH ; les deux expériences décrites permettent d'étudier ces deux étapes.
- Seul le dérivé fluoré de configuration absolue (2S, 4R) peut subir la réaction de carboxylation.
- La carboxylation réalisée avec du CO<sub>2</sub> marqué au carbone 13 conduit uniquement au stéréoisomère (2S, 4S).

Version initiation :

- L'acide glutamique possède un carbone asymétrique, sa structure spatiale est donnée.

Version expert :

- L'acide glutamique possède un carbone asymétrique mais sa structure spatiale n'est pas précisée dans le document 1.
- D'après le document 1, l'acide glutamique appartient à la série L.
- D'après le document 4, en représentation de Fischer, un acide aminé de la série L a son groupe amino -NH<sub>2</sub> à gauche de la représentation.
- Le document 3 explique comment effectuer la représentation de Fischer → nécessité de numérotter la molécule dans la nomenclature officielle pour établir la représentation.

<b>Analyser</b>	– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites. – Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. – Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. – Établir une stratégie de résolution.
-----------------	---

Version initiation :

- L'acide glutamique est de configuration absolue 2S.

Version expert :

- En nomenclature officielle, l'acide glutamique est l'acide 2-aminopentanedioïque. La fonction acide carboxylique est la fonction la plus oxydée → à exploiter pour la représentation de Fischer, qui permet de trouver l'arrangement spatial des atomes autour du carbone 2, et donc d'obtenir sa configuration absolue.

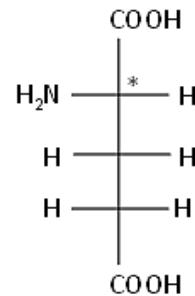
Versions initiation et expert :

- Les hydrogènes H<sub>1</sub> ou H<sub>2</sub> du carbone 4 peuvent *a priori* être arrachés. Le fluor permet de créer un second centre asymétrique sur le carbone 4 et de rendre l'un des sites non réactif. Une seule configuration est réactive, ce qui indique que seul un des deux H peut être arraché.
- Le \*CO<sub>2</sub> peut *a priori* attaquer le carbone 4 du même côté que le H arraché ou en anti.
- L'utilisation de CO<sub>2</sub> marqué permet de créer un centre asymétrique. Un unique stéréoisomère est obtenu lors de la carboxylation par le CO<sub>2</sub> marqué, donc l'attaque est stéréosélective.

<b>Réaliser</b>	– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. – Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.
-----------------	--

Version expert :

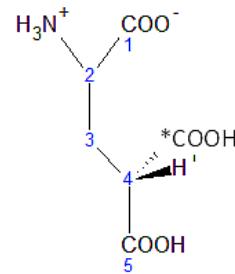
- La représentation de Fischer de l'acide glutamique est :



- L'exploitation du document 3 permet de repasser en représentation de Cram (ou directement à l'aide de la représentation de Fischer), on en déduit que l'acide glutamique est de configuration absolue 2S.

Versions initiation et expert :

- Dans le dérivé fluoré réactif de configuration (2S, 4R), l'hydrogène réactif est placé vers l'arrière, comme l'hydrogène H2 dans le dérivé non fluoré. Seul H2 est donc arraché.
- D'après les règles CIP, dans le cas d'isotopes, l'atome de plus grande masse est prioritaire. D'où la structure du stéréoisomère :



- Ainsi, le groupement \*COOH prend la place du H2 arraché

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

Version expert :

- La configuration 2S de l'acide glutamique obtenue est cohérente avec les résultats du document 2, car la stéréochimie de ce carbone n'est pas modifiée lors de ces études, et celles-ci indiquent des molécules de stéréochimie 2S.

**Résolution de problème**  
**La carboxylase**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'acide glutamique présente-t-il des sources de stéréochimie ?</li> <li>– Quelles sont, schématiquement, les étapes de la réaction de carboxylation ?</li> <li>– La réaction peut-elle être envisagée quelle que soit la stéréochimie du réactif fluoré ?</li> <li>– Le groupement <math>\text{*COOH}</math> se fixe-t-il de manière aléatoire sur la carbone 4 ?</li> </ul> <p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment obtenir la stéréochimie du carbone asymétrique de l'acide glutamique ?</li> <li>– A quelle série appartient l'acide glutamique ? Comment exploiter cette information en représentation de Fischer ?</li> <li>– Comment établir la représentation de Fischer de l'acide glutamique ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel est le rôle du fluor substitué à un hydrogène ?</li> <li>– Pourquoi utiliser du <math>\text{CO}_2</math> marqué ?</li> <li>– Pourquoi n'y a-t-il qu'une seule configuration réactive du dérivé fluoré ?</li> <li>– Comment peut-on qualifier la réaction de carboxylation par le <math>\text{*CO}_2</math> ?</li> </ul> <p><u>Pour la version initiation :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la configuration absolue du carbone asymétrique de l'acide glutamique ?</li> </ul> <p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment se nomme l'acide glutamique en nomenclature officielle ?</li> </ul>
Réaliser	<p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la représentation de Fischer de l'acide glutamique ?</li> <li>– Quelle est la configuration absolue du carbone asymétrique de l'acide glutamique ?</li> </ul> <p><u>Pour les versions initiation et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel hydrogène de l'acide glutamique peut être arraché ?</li> <li>– Le <math>\text{*CO}_2</math> se fixe-t-il du même côté du H arraché ou du côté opposé ?</li> </ul>
Valider	<p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment vérifier que la stéréochimie déterminée pour l'acide glutamique est exacte ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**La carboxylase**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La forme zwitterionique en solution est comprise</li> <li>– Le carbone asymétrique de l'acide glutamique est repéré</li> <li>– Les deux étapes de la réaction de carboxylation sont identifiées</li> <li>– Les stéréochimies réactives pour chacune des étapes sont identifiées</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La stéréochimie du carbone asymétrique de l'acide glutamique ne peut pas être déterminée à l'aide du document 1</li> <li>– L'acide glutamique appartient à la série L</li> <li>– En série L, le groupement amino est placé à gauche en représentation de Fischer</li> <li>– La représentation de Fischer va permettre de déterminer la configuration absolue du carbone asymétrique de l'acide glutamique</li> </ul>
Analyser	<p><u>Pour la version initiation :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'acide glutamique est de configuration absolue 2S</li> </ul> <p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'acide glutamique est l'acide-2-aminopentanedioïque</li> </ul> <p><u>Pour les versions initiation et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Seul l'un des H peut être arraché</li> <li>– La fixation du *COOH est stéréosélective</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dans la 1ère étape : seul H2 peut être arraché</li> <li>– Dans la 2ème étape : le *COOH prend la place du H2 arraché</li> </ul>
Valider	<p><u>Pour la version expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La stéréochimie établie pour l'acide glutamique est validée à l'aide du document 2.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La coquille d'œuf

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les déplacements d'équilibres acido-basiques - programme de première et seconde année.

La **version 1** est relativement simple; elle présente quelques difficultés pour les étudiants car elle nécessite la mobilisation de notions de première et seconde année : réactions acido-basique et déplacements d'équilibres chimiques.

La **version 2** du problème présente quelques difficultés supplémentaires pour les étudiants car l'énoncé est plus ouvert et requiert une analyse plus poussée.

L'étude de la situation proposée ne permet pas d'obtenir un résultat quantitatif.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	2	2	2	2
niveau "confirmé"	1	3	3	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Réactions acido-basiques  – constante d'acidité ; – diagramme de prédominance ; – exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature - faible ou forte - des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, de la soude, la potasse	– Identifier la nature des réactions en solutions aqueuses.

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Application du deuxième principe  Optimisation d'un procédé chimique : – par modification de la valeur de $K^\circ$ ; – par modification de la valeur du quotient réactionnel.	Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une ou plusieurs réactions chimiques. Identifier les paramètres d'influence et déterminer leur sens d'évolution pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**La coquille d'œuf**  
Enoncé



Poulette

---

**niveau initiation**

Les poules sont incapables de transpirer, donc lorsqu'il fait chaud, elles halètent.  
Expliquer pourquoi, par forte chaleur, les œufs pondus présentent une coquille fragile, qui souvent se fêle.  
La coquille de l'œuf est constituée à plus de 90% de carbonate de calcium.

---

**niveau confirmé**

Les poules sont incapables de transpirer, donc lorsqu'il fait chaud, elles halètent.  
Pourquoi conseille-t-on de faire boire de l'eau gazeuse aux poules lorsqu'il fait chaud ?  
La coquille de l'œuf est constituée à plus de 90% de carbonate de calcium.

**Résolution de problème**  
**La coquille d'œuf**  
**Exemple de résolution**

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

On s'intéresse à la fragilité de la coquille lorsqu'il faut chaud, sachant que dans ces conditions les poules halètent, donc leur rythme respiratoire s'accélère.

La coquille d'œuf est formée de carbonate de calcium  $CaCO_3$ .

Version 2 :

L'eau gazeuse contient un élément présent dans la coquille d'œuf, ce qui permet de renforcer les coquilles.

Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
----------	---

Version 2 :

L'eau gazeuse contient une quantité importante d'ions hydrogénocarbonates  $HCO_3^-$ .

Pour les deux versions :

On s'intéresse aux ions carbonates qui constituent la coquille.

Les ions carbonates sont une base faible → étude des équilibres acido-basiques mise en jeu.

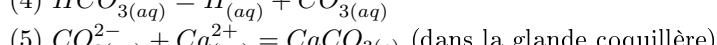
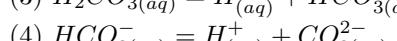
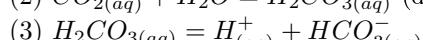
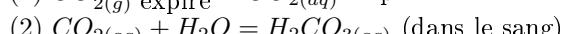
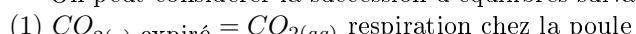
Lorsqu'elle expire, la poule rejette du dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone est soluble dans l'eau; dans le corps, le  $CO_2$  passe en solution dans le sang.

On ne considérera ici que les variations d'espèces carbonatées liées à la respiration de la poule, mis à part l'apport par l'eau gazeuse.

Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
----------	--

On peut considérer la succession d'équilibres suivants :



Lorsque la poule halète, le volume de  $CO_2$  expiré augmente. Ainsi, l'équilibre (1) est déplacé vers la gauche.

D'après la loi de modération de Le Chatelier, ce déplacement entraîne le déplacement des équilibres ultérieurs en sens indirect afin de reproduire du  $CO_{2(aq)}$ .

Ainsi, l'équilibre (5) est déplacé en sens indirect, les coquilles d'œufs sont appauvries en  $CaCO_3$ , elles sont donc plus fragiles.

Version 2 :

Dans l'eau gazeuse se trouvent des ions hydrogénocarbonates  $HCO_3^-$  qui passent dans les liquides corporels et rejoignent la glande coquillière, ce qui permet de compenser le déplacement d'équilibre et permet la formation du carbonate de calcium.

Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
---------	--

Le résultat est en accord avec les observations données.

Seule une partie des carbonates formés est utilisée pour la formation des coquilles, les carbonates jouant d'autres

rôles dans l'organisme. On a donc considéré que la fraction de dioxyde de carbone conduisant à la formation de la coquille n'est pas modifiée lors du halètement.

**Résolution de problème**  
**La coquille d'œuf**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quel comportement adopte la poule lorsqu'il fait chaud ?</li><li>– Quelle est la constitution de la coquille ?</li></ul> <p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Quel est le rôle possible de l'eau gazeuse ?</li></ul>
Analyser	<p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est l'espèce chimique intéressante ici dans l'eau gazeuse ?</li></ul> <p><u>Pour les deux versions :</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle espèce chimique constituant la coquille subit une modification à cause du halètement ?</li><li>– Lors du halètement, quelle espèce est majoritairement expirée ?</li><li>– Quelle propriété possèdent les ions carbonates ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quels équilibres chimiques mènent à la formation du carbonate de calcium ?</li><li>– Comment sont perturbés ces équilibres lors du halètement ?</li></ul> <p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Quel est l'intérêt de l'eau gazeuse ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le résultat obtenu est-il en accord avec les observations données ?</li><li>– Quelles hypothèses peuvent être remises en cause ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**La coquille d'œuf**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La modification du rythme respiratoire lors des fortes chaleurs est notée.  <u>Pour la version 1 :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'importance du carbonate de calcium est identifiée.</li> </ul> </li> <li> <u>Pour la version 2 :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le lien entre eau gazeuse et « défaut » dans la coquille d'œuf est établi.</li> </ul> </li> </ul>
Analyser	<p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La présence d'une quantité importante d'hydrogénocarbonate dans l'eau gazeuse est repérée.</li> </ul> <p><u>Pour les deux versions :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le rôle des carbonates dans l'étude est identifié.</li> <li>– Le rôle du dioxyde de carbone expiré est identifié.</li> <li>– La solubilité du dioxyde de carbone est connue.</li> <li>– Les propriétés acido-basiques des carbonates sont connues.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'équilibre de passage du dioxyde de carbone en solution est écrit.</li> <li>– Les équilibres acido-basiques à partir de <math>H_2CO_3</math> sont donnés.</li> <li>– L'équilibre de formation de <math>CaCO_3</math> est donné.</li> <li>– Les déplacements d'équilibres sont exploités.</li> <li>– La loi de modération est exploitée.</li> </ul> <p><u>Pour la version 2 :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le rôle des hydrogénocarbonates est convenablement expliqué.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le résultat est en accord avec les observations données.</li> <li>– Les hypothèses sont discutées.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La carburation des aciers

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème de type documentaire sur la diffusion des particules - programme de seconde année. On remarquera la porosité d'une telle résolution de problème avec l'approche documentaire.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	2	1	2

## Cadre du programme officiel : Programme de seconde année de la filière PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Diffusion de particules – Équation de diffusion en l'absence de sources internes.	– Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**La carburation des aciers**  
 Enoncé

## La carburation de l'acier

D'après ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2011 - PARTIE D  
*Disponible sur le site «scei-concours»*

### Faire diffuser du carbone pour durcir l'acier.

Les procédés de traitements thermochimiques de surface par réaction hétérogène gaz-solide consistent à exposer, à une température inférieure à la température de fusion de l'acier que constitue la pièce métallique à un environnement gazeux contenant l'espèce chimique à introduire. Ce traitement, largement usité en milieu industriel, est un processus lent et thermiquement activé qui permet d'introduire un élément en surface d'une pièce métallique comme les aciers sans passer par la phase liquide; opération qui serait très couteuse compte tenu des températures de fusion élevées des aciers. Il permet d'améliorer notamment les propriétés mécaniques des pièces mais nécessite des temps de traitement relativement longs qu'il convient d'optimiser.

À titre d'exemple, si l'on souhaite connaître le temps de traitement nécessaire à une diffusion du carbone dans l'austénite à 900°C d'un acier initialement à un pourcentage massique en carbone 0,5% de telle façon que ce pourcentage atteigne après traitement 1% en masse de carbone à 1mm de la surface, un temps de diffusion d'environ 74 heures est nécessaire! Cet exemple montre que les conditions de diffusion en phase solide conduisent à des temps de traitement très longs, difficilement compatibles avec la production industrielle.

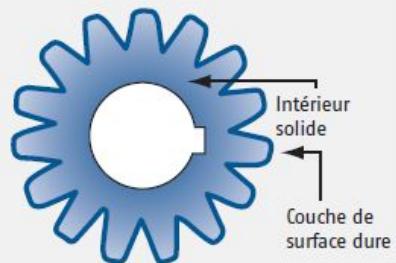
Ces durées peuvent être cependant considérablement réduites si l'on augmente la température de traitement. Ainsi si on élève de 50°C la température de traitement par rapport au calcul précédent, le temps de diffusion se réduit à 14 heures. En effet, le coefficient de diffusion dépend exponentiellement de la température  $T$  selon une loi de type Arrhénius :

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

avec  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $D_0$  le facteur pré-exponentiel qui correspond au coefficient de diffusion pour une température infinie et  $Q$  l'énergie d'activation. Dans le cas de la diffusion du carbone dans l'austénite,  $D_0 = 1,5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $Q = 313 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

#### Caractéristiques

- Meilleure résistance à l'usure
- Dureté de surface supérieure
- Solidité élevée
- Meilleure résistance à la cassure/aux fentes
- Meilleure résistance à l'épuisement
- Possibilité de cémentation partielle



#### niveau initiation

Si la durée de traitement est d'environ 74 heures à 900°C, calculer l'élévation de température nécessaire pour faire tomber la durée du traitement à 14 heures, et la comparer à celle donnée par le texte.

Résolution de problème  
**La carburation des aciers**  
 Exemple de résolution

---

On convertit  $D_0$  en unités SI :  $D_0 = 1,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

L'équation de diffusion fait apparaître un temps caractéristique  $\tau$  pour un système de taille caractéristique  $L$  tels que  $\frac{1}{\tau} \sim \frac{D}{L^2}$  soit  $\tau \sim \frac{L^2}{D}$ . Le rapport des temps de diffusion à  $T_0 = 900^\circ\text{C}$  et  $T_0 + \Delta T$  vaut :

$$\frac{\tau(T_0)}{\tau(T_0 + \Delta T)} = \frac{D(T_0 + \Delta T)}{D(T_0)} = \frac{74}{14} = 5,3$$

Or le rapport des deux coefficients donne :  $\frac{D(T_0 + \Delta T)}{D(T_0)} = \exp\left(\frac{Q}{R} \frac{\Delta T}{T_0(T_0 + \Delta T)}\right) \approx \exp\left(\frac{Q}{R} \frac{\Delta T}{T_0^2}\right)$  si  $T_0 \gg \Delta T$ , comme le laisse entendre le texte. Il s'agit donc de résoudre  $\frac{Q}{R} \frac{\Delta T}{T_0^2} = \ln 5,3 \Leftrightarrow$

$$\Delta T = \ln 5,3 \frac{RT_0^2}{Q} = \ln 5,3 \frac{8,314 \times (273 + 900)^2}{113 \times 10^3} = 61 \text{ K}$$

(soit  $61^\circ\text{C}$ , au lieu de  $50^\circ\text{C}$ , ce qui reste proche).

Résolution de problème  
**La carburation des aciers**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Extraire les données utiles du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Rappeler l'équation de diffusion des particules.</li><li>– Relier grâce à l'équation de diffusion un temps caractéristique <math>\tau</math> et la taille caractéristique <math>L</math>.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Exprimer le rapport des temps de diffusion à <math>T_0 = 900^\circ C</math> et <math>T_0 + \Delta T</math>.</li><li>– Exprimer le rapport des coefficients de diffusion à <math>T_0 = 900^\circ C</math> et <math>T_0 + \Delta T</math>.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comparer l'élévation de température trouvée à celle donnée par le texte.</li></ul>

Résolution de problème  
**La carburation des aciers**  
Exemples d'indicateurs de réussite

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le coefficient <math>D_0</math> est extrait du document et converti dans les unités du système international.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Un temps caractéristique <math>\tau</math> et une taille caractéristique <math>L</math> sont reliés grâce à l'équation de diffusion.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le rapport des coefficients de diffusion à <math>T_0 = 900^\circ C</math> et <math>T_0 + \Delta T</math> est exprimé.</li><li>– Le calcul est mené à son terme pour connaître <math>\Delta T</math>.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– <math>\Delta T</math> est comparé à celui du texte.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Le chauffe-plat

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur une réaction d'oxydo-réduction - programme de seconde année. La version "initiation" présente quelques difficultés pour les étudiants car elle mobilise les connaissances de différents domaines ; une donnée est manquante, et les étudiants doivent identifier le gaz dégagé par la réaction. La version "confirmé" du problème présente les mêmes difficultés pour les étudiants mais le sujet est rendu plus difficile par rapport à la version 1 car les grandeurs thermodynamiques utiles doivent être extraites de tables, et il y a plus d'informations manquantes.

La version "expert" du problème est rendue encore plus difficile par une étude plus détaillée de la composition exacte de l'élément chauffant, qui fait appel à des notions sur la cinétique des réactions d'oxydo-réduction.

Ce questionnement complémentaire relève plus de la culture chimique de l'étudiant que du raisonnement.

Remarque : le travail peut éventuellement être complété par une étude sur le transfert thermique de l'eau au plat, visant par exemple à déterminer la température du plat ainsi réchauffé.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	2	2	2	2
niveau "confirmé"	3	3	2	2	2
niveau "expert"	4	3	4	2	2

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Transformations physico-chimiques	
Application du premier principe <ul style="list-style-type: none"> <li>– État standard.</li> <li>– Enthalpie standard de réaction.</li> <li>– Loi de Hess.</li> <li>– Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément.</li> <li>– Enthalpie standard de dissociation de liaison.</li> <li>– Effets thermiques en réacteur monobare : <ul style="list-style-type: none"> <li>– transfert thermique causé par la transformation chimique en réacteur isobare isotherme (relation <math>\Delta H = Q_p = \xi \Delta_r H^\circ</math>) ;</li> <li>– variation de température en réacteur adiabatique monobare.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déterminer une enthalpie standard de réaction à température ambiante.</li> <li>– Déterminer une enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess.</li> <li>– Prévoir le sens du transfert thermique entre un système en transformation chimique et le milieu extérieur à partir de données thermodynamiques.</li> <li>– Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique supposée isobare et réalisée dans un réacteur adiabatique.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Application du deuxième principe</li> <li>– Identités thermodynamiques ; potentiel chimique.</li> <li>– Enthalpie libre.</li> <li>– L'équilibre physico-chimique.</li> <li>– Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van't Hoff.</li> <li>– Relation entre l'affinité chimique, <math>K^\circ</math> et <math>Q_r</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déterminer une variation d'enthalpie libre, d'enthalpie et d'entropie entre deux états du système chimique.</li> <li>– Déterminer une grandeur standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess.</li> <li>– Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.</li> </ul>
Cinétique des réactions d'oxydoréduction	
Courbes courant-potentiel sur une électrode : <ul style="list-style-type: none"> <li>– systèmes rapides et systèmes lents,</li> <li>– surtension,</li> <li>– nature de l'électrode,</li> <li>– courant limite de diffusion,</li> <li>– vagues successives,</li> <li>– domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.</li> <li>– Reconnaître le caractère lent ou rapide d'un système à partir de courbes courant potentiel.</li> <li>– Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion.</li> </ul>

**Déroulement de l'activité :**

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

# Résolution de problème

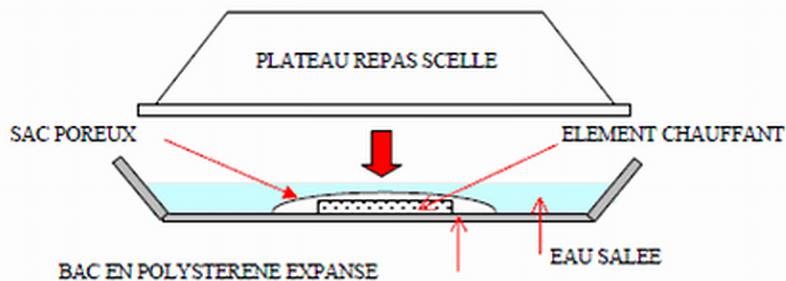
## Le chauffe-plat

### Enoncé

#### niveau initiation

##### Document 1 : Principe du chauffe-plat

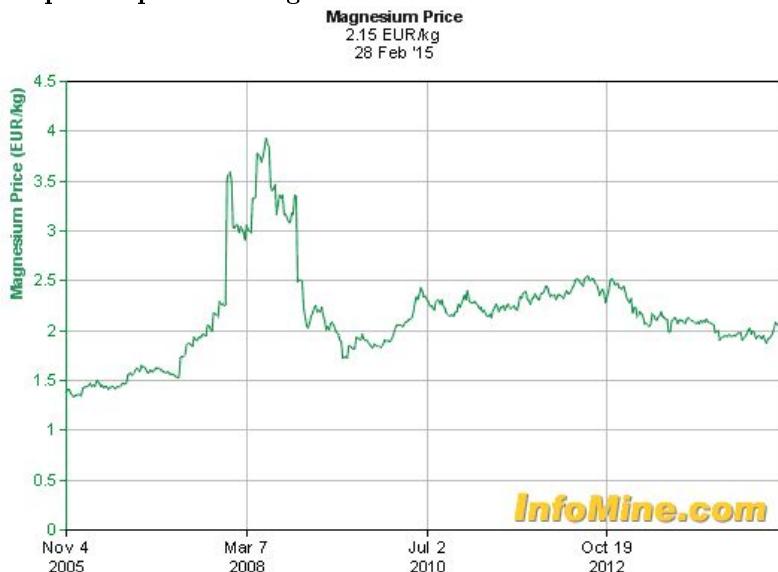
Un chauffe-plat de camping breveté aux USA en 1981 fonctionne de la façon suivante : l'élément chauffant est constitué par une fine grenaille de magnésium dispersée parmi des billes de polyéthylène haute densité; le tout est placé dans un sachet poreux fixé au fond d'un bac sur lequel vient s'adapter le plateau repas à chauffer. La mise en marche s'opère par addition de 400 mL d'eau (salée) dans le bac. L'eau est alors portée à 80°C et on réchauffe ainsi, à la façon d'un bain-marie, un plateau-repas en moins de 15 minutes.



##### Document 2 : Transformation intervenant lors du réchauffage d'un plat

L'ajout d'eau salée au solide contenu dans le sac poreux se traduit par une forte effervescence s'accompagnant rapidement d'un échauffement notable. On peut vérifier que les bulles de gaz qui se dégagent sont inflammables. Quand l'opération est terminée, on constate que la grenaille métallique a disparu et qu'elle fait place à une bouillie blanche (hydroxyde de magnésium) dispersée sur les billes de polyéthylène.

##### Document 3 : Historique du prix du magnésium



Données

- Enthalpies standard de formation à 298 K :

espèce	$Mg(OH)_2(s)$	$H_2O(\ell)$
$\Delta_f H^\circ / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	-924	-286

- Potentiels standard  $E^\circ$  :

couple	$Mg^{2+}/Mg(s)$	$H^+/H_2(g)$
$E^\circ / \text{V}$	-2,4	0,0

- Capacité thermique molaire standard à pression constante :  $C_{pm}^\circ = 75,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  pour l'eau liquide.
- Produit de solubilité de l'hydroxyde de magnésium :  $K_s(Mg(OH)_2) = 10^{-19}$ .

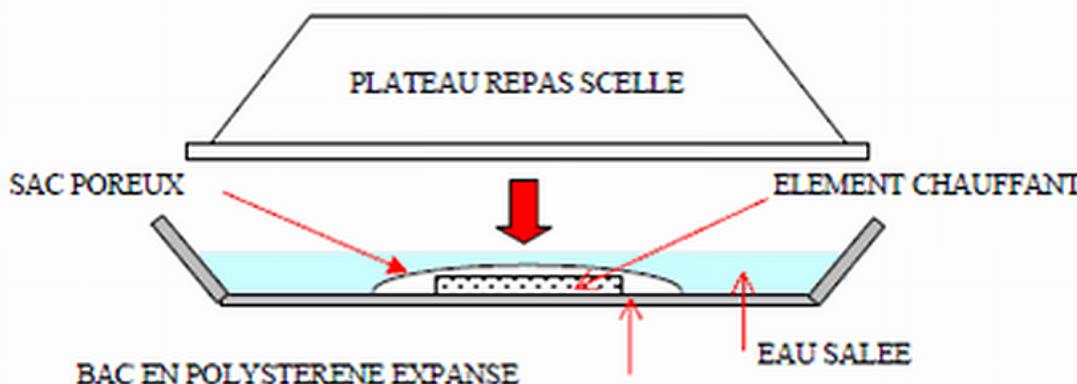
#### Question :

Quel est le coût de revient en magnésium pour l'industriel par dispositif fabriqué ?

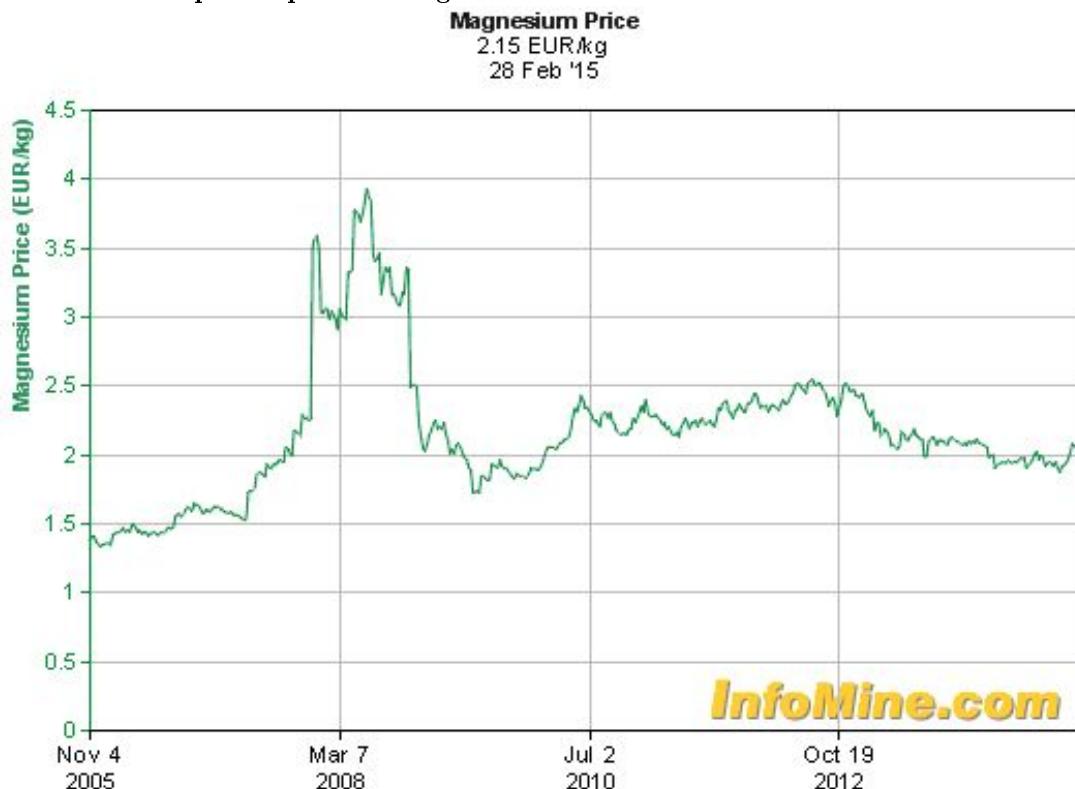
### niveau confirmé

**Document 1 : Principe du chauffe-plat**

Un chauffe-plat de camping breveté aux USA en 1981 fonctionne de la façon suivante : l'élément chauffant est constitué par une fine grenaille de magnésium dispersée parmi des billes de polyéthylène haute densité ; le tout est placé dans un sachet poreux fixé au fond d'un bac sur lequel vient s'adapter le plateau repas à chauffer. La mise en marche s'opère par addition de 400 mL d'eau (salée) dans le bac. L'eau est alors portée à 80°C et on réchauffe ainsi, à la façon d'un bain-marie, un plateau-repas en moins de 15 minutes.


**Document 2 : Transformation intervenant lors du réchauffage d'un plat**

L'ajout d'eau salée au solide contenu dans le sac poreux se traduit par une forte effervescence s'accompagnant rapidement d'un échauffement notable. On peut vérifier que les bulles de gaz qui se dégagent sont inflammables. Quand l'opération est terminée, on constate que la grenaille métallique a disparu et qu'elle fait place à une bouillie blanche (hydroxyde de magnésium) dispersée sur les billes de polyéthylène.

**Document 3 : Historique du prix du magnésium**


Données

- Potentiels standard  $E^\circ$  :

couple	$Mg^{2+}/Mg(s)$	$H^+/H_2(g)$
$E^\circ / V$	-2,4	0,0

- Produit de solubilité de l'hydroxyde de magnésium :  $K_s(Mg(OH)_2) = 10^{-19}$ .

- Grandeurs thermodynamiques :

Formule	État	$\Delta_f H^0$	$\Delta_f G^0$	$S^0$	$C_p^0$	$\Delta_{fus} H^0$	$\Delta_{vap} H^0$
		kJ.mol <sup>-1</sup>		J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>		kJ.mol <sup>-1</sup>	
<b>Hydrogène</b>							
H	g*	218,0	- 203,3	114,7	20,8		
<sup>2</sup> H(D)	g	221,7	- 206,5	123,2	20,8		
H <sup>+</sup>	g	1 536,2	1 532	109	20,8		
	aq*	0	0	0	0		
H <sup>-</sup>	g	139,7					
H <sub>2</sub>	g*	0	0	130,7	28,8	0,12	0,898
<sup>2</sup> H <sub>2</sub> (D <sub>2</sub> )	g	0	0	144,9	28,8	0,2	
HO	g	39,0	34,2	183,7	29,9		
HO <sup>-</sup>	g	-140,9					
	aq*	-230	-157,3	-10,8	-148,5		
H <sub>2</sub> O	liq*	-285,8	-237,1		75,3	6,01	40,65
	g*	-241,8	-228,6	188,8	33,6		43,98 à 25°C
<sup>2</sup> H <sub>2</sub> O(D <sub>2</sub> O)	liq	-294,6	-243,5	75,9	84,3	6,3	
	g	-249,2	-234,6	198,2	34,3		
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	liq	-187,8	-120,4	109,6	89,1	12,5	51,6 à 25°C
	g	-136,3	-105,6	232,7	43,1		
	aq	-191,2	-134,1	143,9			
Formule	État	$\Delta_f H^0$	$\Delta_f G^0$	$S^0$	$C_p^0$	$\Delta_{fus} H^0$	$\Delta_{vap} H^0$
		kJ.mol <sup>-1</sup>		J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>		kJ.mol <sup>-1</sup>	
<b>Magnésium</b>							
Mg	c*	0	0	32,7	24,9	8,48	131,8
	g*	147,1	112,5	148,6	20,8		
Mg <sup>2+</sup>	g	2 348,5					
	aq*	-466,9	-454,8	-138,1			
MgBr <sub>2</sub>	c	-524,3	-503,8	117,2		39,3	
MgBr <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-2 410	-2 056	397,5			
MgCO <sub>3</sub>	c	-1095,8	-1012,1	65,7	75,5		
MgCl <sub>2</sub>	c	-641,3	-591,8	89,6	71,4	43,1	136,8
MgCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	c	-966,6	-861,8	137,2	115,3		
MgCl <sub>2</sub> , 2H <sub>2</sub> O	c	-1 279,7	-1 118	179,9	159,2		
MgCl <sub>2</sub> , 4H <sub>2</sub> O	c	-1 899	-1 623,5	264	241,4		
MgCl <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-2 499	-2 115	366,1	315,1	34,3	
Mg(OH)Cl	c	-799,6	-731,8	83,7			
Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	c	-568,9					
Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-2 445,5	-1 863,1	520,9			
MgCrO <sub>4</sub>	c	-1 343,5					
MgF <sub>2</sub>	c*	-1 124,2	-1 071,1	57,2	61,6	58,7	272
MgH <sub>2</sub>	c	-75,3	-36	31,1	35,4		
MgI <sub>2</sub>	c	-364,0	-358,2	129,7		29	
Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	c	-460,7					
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	c	-790,7	-589,5	164,0	141,9		
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-2 613,3	-2 080,7	451,9		41	
MgO	c*	-601,6	-569,3	27,0	37,2	78	
Mg(OH) <sub>2</sub>	c	-924,5	-833,6	63,2	77		
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	c	-3 780,7	-3 538,8	189,2	213,5	46	
Mg(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-3 681,9					
MgS	c	-346,0	-341,8	50,3	45,6		
MgSO <sub>4</sub>	c	-1 284,9	-1 170,6	91,6	96,5	14,6	
MgSO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O	c	-1 602,1	-1 428,8	126,4			
MgSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	c	-1 908,7					
MgSO <sub>4</sub> , 4H <sub>2</sub> O	c	-2 496,6					
MgSO <sub>4</sub> , 6H <sub>2</sub> O	c	-3 086,9	-2 632,2	348,2	348,1		
MgSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	c	-3 388,7	-2 871,8	372,4	-		
MgSiO <sub>3</sub>	c	-1 549,0	-1 462,1	67,7	81,4		
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	c	-2 174	-2 055,1	95,1	118,5	71,0	

Extrait de l'Usuel de chimie générale et minérale, M. Bernard et F. Busnot, éd. Dunod

**Question :**

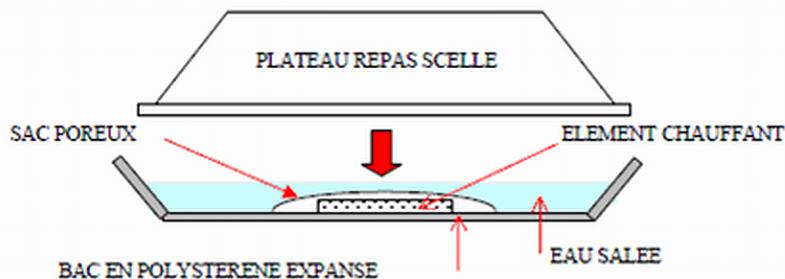
Quel est le coût de revient en magnésium pour l'industriel par dispositif fabriqué ?

---

### niveau expert

**Document 1 : Principe du chauffe-plat**

Un chauffe-plat de camping breveté aux USA en 1981 fonctionne de la façon suivante : l'élément chauffant est constitué par une fine grenaille de magnésium (incorporant 5% de fer) dispersée parmi des billes de polyéthylène haute densité ; le tout est placé dans un sachet poreux fixé au fond d'un bac sur lequel vient s'adapter le plateau repas à chauffer. La mise en marche s'opère par addition de 400 mL d'eau (salée) dans le bac. L'eau est alors portée à 80°C et on réchauffe ainsi, à la façon d'un bain-marie, un plateau-repas en moins de 15 minutes.

**Document 2 : Transformation intervenant lors du réchauffage d'un plat**

L'ajout d'eau salée au solide contenu dans le sac poreux se traduit par une forte effervescence s'accompagnant rapidement d'un échauffement notable. On peut vérifier que les bulles de gaz qui se dégagent sont inflammables. Quand l'opération est terminée, on constate que la grenaille métallique a disparu et qu'elle fait place à une bouillie blanche (hydroxyde de magnésium) dispersée sur les billes de polyéthylène.

**Document 3 : Quelques observations complémentaires**

- 1/ A température ambiante, le magnésium est sans action sur l'eau distillée et désaérée.
- 2/ L'attaque du magnésium par l'eau devient possible en présence de chlorure de sodium. On observe ainsi des chlorohydroxydes complexes se former à la surface d'une lame de magnésium trempée dans une solution de chlorure de sodium, par réaction d'échange d'anions chlorure/hydroxyde.
- 3/ Si on place une lame de magnésium fraîchement découpée dans une solution neutre de chlorure de sodium, on constate la formation de fines bulles gazeuses à sa surface, mais à une vitesse beaucoup trop lente pour que le système constitue une bonne source de chaleur. De plus, les bulles gazeuses restent « accrochées » à la surface, ce qui entrave la poursuite de la réaction. En revanche, si on met en contact la lame de magnésium avec une lame de fer, on observe un dégagement gazeux intense au niveau de la lame de fer et la réaction se poursuit jusqu'à disparition complète du magnésium.

**Document 4 : Historique du prix du magnésium**

*Se reporter aux tables de grandeurs thermodynamiques si des données non indiquées sont nécessaires.*

**Questions :**

Quel est le coût de revient en magnésium pour l'industriel par dispositif fabriqué ?

Expliquer pourquoi l'eau utilisée dans le dispositif chauffant est salée et pourquoi la grenaille de magnésium contient du fer.

# Résolution de problème

## Le chauffe-plat

### Exemple de résolution

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

- Pour réchauffer le plat, il faut utiliser  $V = 400$  mL d'eau.
- La température finale de l'eau est  $\theta_f = 80^\circ C$ .
- L'eau ainsi portée à  $80^\circ C$  va ensuite permettre de réchauffer le plat, à la manière d'un bain-marie.
- Le magnésium disparaît lorsque l'on réchauffe le plat, c'est donc l'un des réactifs mis en jeu, et la réaction semble totale.
- La réaction produit un gaz inflammable et de l'hydroxyde de magnésium.
- On dispose de l'évolution du prix du magnésium au cours des dix dernières années.

Pour les versions confirmé et expert :

- Dans les tables thermodynamiques, seules les données liées à  $H_2O$  et  $Mg(OH)_2$  sont utiles.

Pour la version expert :

- L'élément chauffant est constitué de magnésium et de 5% de fer. L'eau ajoutée est salée.

Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
----------	---

- Le gaz inflammable est du dihydrogène.
- L'hydroxyde de sodium provient de l'oxydation du magnésium.
- L'eau et le magnésium subissent des réactions redox :
 
$$H_2O + e^- = \frac{1}{2}H_{2(g)} + HO^-$$
 et  $Mg_{(s)} + 2HO^- = Mg(OH)_{2(s)} + 2e^-$ .
- Pour vérifier si la réaction est totale, on exploite :  $\Delta_r G^\circ = -n F E^\circ$  et  $\Delta_r G^\circ = -RT \ln(K^\circ)$ .
- Pour la réaction d'équation chimique :  $0 = \sum_i \nu_i A_i$ , on a  $\Delta_r H^\circ(T) = \sum_i \nu_i \Delta_f H_T^\circ(A_i)$ .
- Le premier principe donne  $\Delta H = m_{eau} C_p^\circ \Delta T$ .
- On estime la température initiale de l'eau égale à la température ambiante :  $\theta_i = 20^\circ C$ .
- Le produit ionique de l'eau est :  $K_e = 10^{-14}$ .

Pour la version initiation :

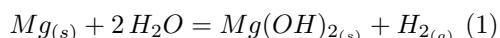
- L'enthalpie standard de formation d'un corps pur simple dans un état correspondant à l'état standard de référence d'un élément est nulle.

Pour la version expert :

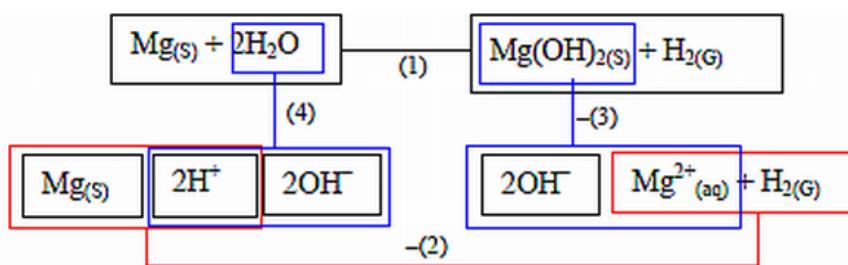
- Le chlorure de sodium et le fer jouent un rôle dans le bon fonctionnement du dispositif : la formation de  $Mg(OH)_2$  empêche le déroulement de la réaction ; l'utilisation de chlorure de sodium permet à la réaction d'avoir lieu mais elle est très lente ; on y remédie par ajout de fer.

Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
----------	--

- L'équation globale de la réaction mise en jeu est donc :



- L'énoncé ne donne pas les potentiels standard de ces couples ; on doit donc faire appel à un cycle d'enthalpie libre pour vérifier que la réaction est totale :



$$\text{On a alors : } \Delta_r G_1^\circ = \Delta_r G_4^\circ - \Delta_r G_2^\circ - \Delta_r G_3^\circ = -RT \ln(K_1^\circ)$$

Avec :

- $\Delta_r G_4^\circ = -RT \ln(K_e^2)$
- $\Delta_r G_2^\circ = -2F(E^\circ(Mg^{2+}/Mg) - E^\circ(H^+/H_2)) = -2F(E_1^\circ - E_2^\circ)$
- $\Delta_r G_3^\circ = -RT \ln(K_s)$

Ainsi :

$$K_1^\circ = \frac{K_e^2}{K_s} \exp\left(\frac{-2F(E_1^\circ - E_2^\circ)}{RT}\right)$$

AN :  $K_1^\circ = 3,2 \times 10^{62} \rightarrow$  réaction totale.

Rq : On peut aussi combiner les constantes d'équilibres thermodynamiques pour obtenir  $K_1^\circ$ . Pour la réaction (1) :

$$\begin{aligned} \Delta_r H_1^\circ &= \Delta_f H^\circ(H_{2(g)}) + \Delta_f H^\circ(Mg(OH)_{2(s)}) - \Delta_f H^\circ(Mg) - 2 \cdot \Delta_f H^\circ(H_{2O(l)}) \\ &= \Delta_f H^\circ(Mg(OH)_{2(s)}) - 2 \cdot \Delta_f H^\circ(H_{2O(l)}) \end{aligned}$$

AN :  $\Delta_r H_1^\circ = -352 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

- Hypothèses :

- le système est adiabatique
- la quantité d'eau qui a réagi avec le magnésium est négligée
- les capacités thermiques du magnésium et des billes de polymères sont négligeables par rapport à celle de l'eau.

La capacité thermique des aliments du plat n'est quant à elle pas négligeable (capacité thermique proche de celle de l'eau) ; l'échauffement de l'eau est supposé rapide, et on décompose la transformation en deux étapes : échauffement de l'eau jusqu'à  $80^\circ C$  grâce à l'énergie libérée par la réaction chimique puis transfert thermique de l'eau vers le plat. On ne s'intéresse ici qu'à la première étape. Alors :

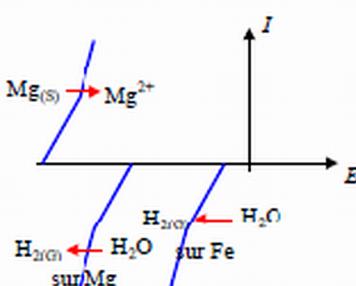
$$\frac{(m_{Mg})}{(M_{Mg})} \Delta_r H_1^\circ = \frac{(m_{H_2O})}{(M_{H_2O})} C_p^\circ (\theta_f - \theta_i)$$

AN :  $m_{Mg} \approx 7 \text{ g}$ . L'eau ainsi portée à  $80^\circ C$  va ensuite permettre d'élever la température du plat à la température souhaitée.

A l'aide du document présentant l'évolution du prix du magnésium, on obtient que le prix actuel du magnésium est de  $2,15 \text{ €/kg}$ , ce qui amène le prix de revient en magnésium par dispositif à environ  $0,015 \text{ €}$ . Le coût du magnésium est donc très mineur dans le coût du produit commercialisé.

Pour la version expert :

- La couche d'hydroxyde de magnésium crée une couche protectrice à la surface du magnésium qui empêche la poursuite de la réaction par l'eau ; c'est le phénomène de passivation. En présence de chlorure de sodium, on observe des chlorohydroxydes complexes au lieu de l'hydroxyde de magnésium insoluble, donc le phénomène de passivation ne se produit pas.
- Les différences de dégagement gazeux traduisent des différences de vitesse de réaction ; cela peut s'expliquer par une surtension plus faible du dihydrogène sur le fer que sur le magnésium. L'intensité de corrosion est donc plus élevée en présence de fer.



<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li><li>- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li></ul>
----------------	---

- L'ordre de grandeur obtenu pour la masse de magnésium semble pertinent.
- L'hypothèse adiabatique peut être satisfaisante si le produit est bien emballé durant la phase de chauffage. La capacité thermique du magnésium et sa masse sont nettement inférieures à celles de l'eau.
- On peut effectivement négliger la quantité d'eau qui a réagi avec le magnésium (moins de 10 g sur les 400 g introduits).
- Le transfert thermique de l'eau vers les aliments du plat lors de l'échauffement de l'eau a été négligé, il faudrait valider que la montée en température de l'eau est effectivement rapide.
- On peut estimer la quantité de magnésium nécessaire de l'ordre de la dizaine de grammes.

**Résolution de problème**  
**Le chauffe-plat**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle quantité d'eau est ajoutée ?</li> <li>– Quels sont les réactifs mis en jeu ?</li> <li>– Quels sont les produits de la réaction ?</li> <li>– Comment le plat est-il réchauffé ?</li> <li>– Comment obtenir le prix du magnésium ?</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont les grandeurs thermodynamiques utiles ?</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont les espèces importantes pour le bon déroulement de la réaction ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Estimer la température initiale de l'eau.</li> <li>– Quel type de réaction subit le magnésium ?</li> <li>– Quelles demi-équations redox traduisent les phénomènes décrits ?</li> <li>– Comment relier <math>E^\circ</math> à la constante d'équilibre d'une réaction ?</li> <li>– Comment évaluer une enthalpie standard de réaction à l'aide des données fournies ?</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Que se passe-t-il si on utilise de l'eau pure désaérée pour réchauffer le plat ?</li> <li>– L'utilisation d'eau salée est-elle suffisante ?</li> <li>– Comment rendre le chauffage efficace ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la réaction correspondant à la transformation réalisée dans l'élément chauffant ?</li> <li>– Cette réaction est-elle totale ?</li> <li>– Comment évaluer la constante d'équilibre thermodynamique d'une réaction redox ?</li> <li>– Comment combine-t-on les enthalpies libres dans un cycle thermodynamique ?</li> <li>– Quelle relation relie enthalpie libre et constante d'équilibre thermodynamique ?</li> <li>– Comment évaluer l'énergie libérée par la réaction chimique ?</li> <li>– Comment relier l'énergie libérée par la réaction chimique à l'élévation de température de l'eau ?</li> <li>– Quelles hypothèses doit-on poser pour résoudre le problème ?</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel phénomène empêche la réaction du magnésium avec de l'eau pure désaérée ?</li> <li>– Quel est le rôle du chlorure de sodium ?</li> <li>– Comment expliquer les différences observées entre le comportement du magnésium seul et du magnésium en présence de fer ?</li> <li>– Comment les courbes intensité-potentiel peuvent-elles aider à comprendre les différences observées entre le comportement du magnésium seul et du magnésium en présence de fer ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La valeur obtenue semble-t-elle pertinente ?</li> <li>– Quel regard critique peut-on poser sur le raisonnement mené ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Le chauffe-plat**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le volume d'eau utile est identifié</li> <li>– Le magnésium et l'eau sont identifiés comme réactifs</li> <li>– L'hydroxyde de magnésium et un gaz inflammable sont identifiés comme produits</li> <li>– La température finale de l'eau <math>\theta_f</math> est repérée</li> <li>– Le principe de fonctionnement du chauffe-plat est compris</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données utiles des tables sont identifiées</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le magnésium avec 5% de fer et l'eau salée sont aussi identifiés comme réactifs</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le gaz inflammable est du dihydrogène</li> <li>– Les demi équations redox sont écrites</li> <li>– Les relations de thermodynamiques utiles sont identifiées</li> <li>– <math>\theta_i</math> est estimé</li> <li>– <math>K_e</math> est posé</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les rôles clefs de <math>NaCl</math> et <math>Fe</math> présentés dans le document 3 sont compris.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'équation globale de la réaction est établie</li> <li>– La constante d'équilibre thermodynamique est calculée</li> <li>– L'enthalpie standard de réaction est calculée</li> <li>– Les hypothèses du raisonnement sont posées</li> <li>– Le premier principe est convenablement écrit</li> <li>– La masse de magnésium est déterminée</li> <li>– Le coût de revient par dispositif est évalué.</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le phénomène de passivation est identifié</li> <li>– Le rôle du chlorure de sodium est compris</li> <li>– La différence de surtension sur le fer et sur le magnésium est proposée</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La pertinence de la masse de magnésium obtenue est vérifiée</li> <li>– Les hypothèses de travail sont discutées</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le coup-franc

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur la chute libre - programme de première année .

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	2	2	1	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Loi de la quantité de mouvement – Forces. – Principe des actions réciproques.  – Loi de la quantité de mouvement dans un référentiel galiléen.  – Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	– Établir un bilan des forces sur un système, ou plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur une figure.  – Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre d'inertie d'un système fermé.  – Mettre en équation le mouvement sans frottement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

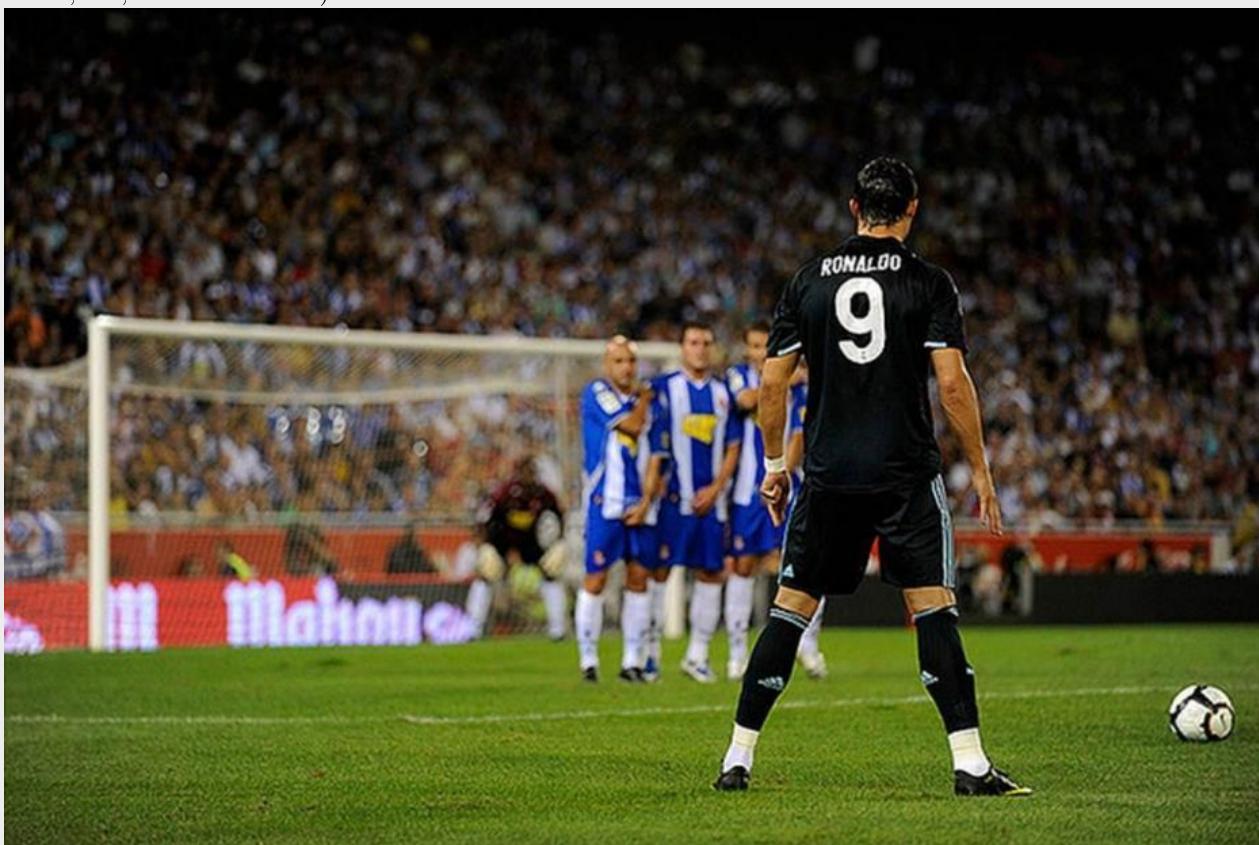
La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le coup-franc**  
Enoncé

## Le tir de Ronaldo

### Une trajectoire parfaite

Le 8 décembre 2009 Cristiano Ronaldo marque un coup franc de 33 m face à Marseille. Le ballon passe au-dessus du mur (situé à 9,15 m du tireur) pour aller se retrouver dans la lucarne (sous la barre transversale du but, à 2,44 m de hauteur).



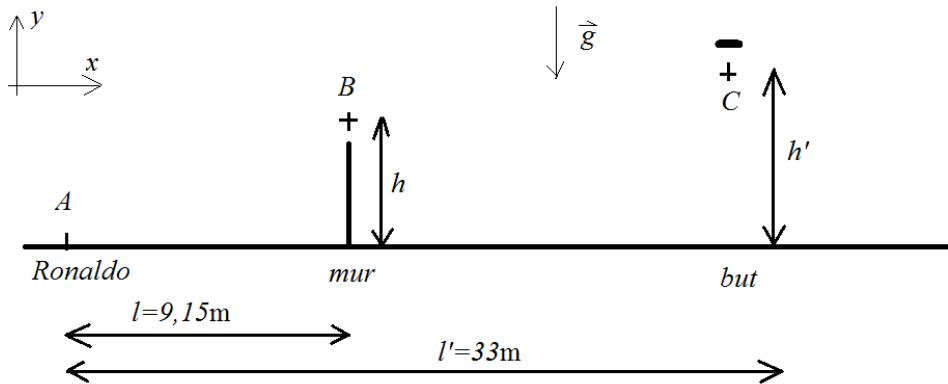
### niveau confirmé

Évaluer la vitesse du ballon lors du tir de Ronaldo.

# Résolution de problème

## Le coup-franc

### Exemple de résolution



La trajectoire du ballon, assimilé à un point matériel (les effets d'effets de rotation de la balle sont donc négligés), est une parabole dans le champ de pesanteur, dans la mesure où on néglige les frottements.

Il existe une infinité de paraboles qui passent par les points  $A$  et  $C$ . Pour que la vitesse soit la plus faible possible, il faut considérer la parabole qui passe par les points  $A$ ,  $B$  et  $C$ .

On peut évaluer  $h \approx h' \approx 2$  m.

L'intégration du principe fondamental de la dynamique pour le ballon en chute libre dans le référentiel terrestre galiléen donne :

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = -g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x} = v_{x_0} \\ \dot{y} = -gt + v_{y_0} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = v_{x_0}t + x_A \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y_0}t + y_A \end{cases}$$

soit

$$y - y_A = -\frac{1}{2}g \left( \frac{x - x_A}{v_{x_0}} \right)^2 + v_{y_0} \left( \frac{x - x_A}{v_{x_0}} \right)$$

qui donne pour le passage par  $B$  et  $C$  :

$$\begin{cases} h = -\frac{1}{2}g \left( \frac{l}{v_{x_0}} \right)^2 + v_{y_0} \left( \frac{l}{v_{x_0}} \right) \\ h' = -\frac{1}{2}g \left( \frac{l'}{v_{x_0}} \right)^2 + v_{y_0} \left( \frac{l'}{v_{x_0}} \right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} hv_{x_0}^2 = -\frac{gl^2}{2} + v_{y_0}v_{x_0}l \\ h'v_{x_0}^2 = -\frac{gl'^2}{2} + v_{y_0}v_{x_0}l' \end{cases}$$

Ce système donne :

$$\begin{cases} v_{x_0}^2 = \frac{g(-l^2l'+l'^2l)}{2(hl'-hl)} \\ v_{y_0} = \frac{h}{l}v_{x_0} + \frac{gl}{2v_{x_0}} \end{cases}$$

Application numérique :

$$\begin{cases} v_{x_0} = \sqrt{\frac{10 \times (-9,15^2 \times 33 + 33^2 \times 9,15)}{2 \times (2 \times 33 - 2 \times 9,15)}} = 27,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_{y_0} = \frac{2}{9,15} \times 27,5 + \frac{10 \times 9,15}{2 \times 27,5} = 7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

soit

$$v = \sqrt{v_{x_0}^2 + v_{y_0}^2} \approx v_{x_0} = 28,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cela fait  $v \approx 100$  km/h (ce qui est rapide mais ne semble pas impossible à un sportif de haut niveau).

Résolution de problème  
**Le coup-franc**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li><li>– Faire un schéma.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est la trajectoire d'un point matériel en chute libre ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Déterminer les équations horaires du mouvement.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est l'ordre de grandeur de la vitesse d'une balle de tennis ? Peut-on la comparer à celle d'une balle de football.</li></ul>

**Résolution de problème**  
**Le coup-franc**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données utiles du texte sont relevées et nommées.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les frottements sont négligés.</li><li>– La balle est assimilée à un point matériel.</li><li>– Les points par lesquels la trajectoire du ballon doit passer sont déterminés.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'équation du mouvement est déterminée.</li><li>– La vitesse initiale est déduite.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La pertinence du résultat trouvé est vérifiée.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Une distillation industrielle

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les diagrammes binaires - programme de seconde année.

La version proposée présente quelques difficultés pour les étudiants car elle requiert l'exploitation conjointe de deux diagrammes binaires ; l'étudiant doit faire appel à des tables pour identifier les espèces dans les diagrammes, et les données sont incomplètes. Il doit savoir exploiter un diagramme avec azéotrope, dans le cadre d'une application industrielle. Cette résolution de problème permet à l'étudiant d'analyser les différentes colonnes à disposition et de progresser dans sa stratégie de résolution grâce à une démarche de type essai-erreur, afin ensuite d'élaborer le raisonnement final linéaire attendu.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	3	3	2	2	2

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Changements d'état isobares de mélanges binaires</b>  Diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur : – avec miscibilité totale à l'état liquide – avec miscibilité nulle à l'état liquide – avec miscibilité partielle à l'état liquide.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mettre en œuvre une distillation fractionnée à la pression atmosphérique et une hydrodistillation ou une distillation hétéroazéotropique</li> <li>– Exploiter les diagrammes isobares d'équilibre entre deux phases pour, à composition en fraction molaire ou massique donnée : <ul style="list-style-type: none"> <li>• tracer l'allure de la courbe d'analyse thermique en indiquant le nombre de degrés de liberté du système sur chaque partie de la courbe;</li> <li>• déterminer les températures de début et de fin de changement d'état ;</li> <li>• donner la composition des phases en présence à une température T fixée ainsi que les quantités de matière ou les masses dans chaque phase.</li> </ul> </li> <li>– Interpréter une distillation simple, une distillation fractionnée, une distillation hétéroazéotropique à l'aide des diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

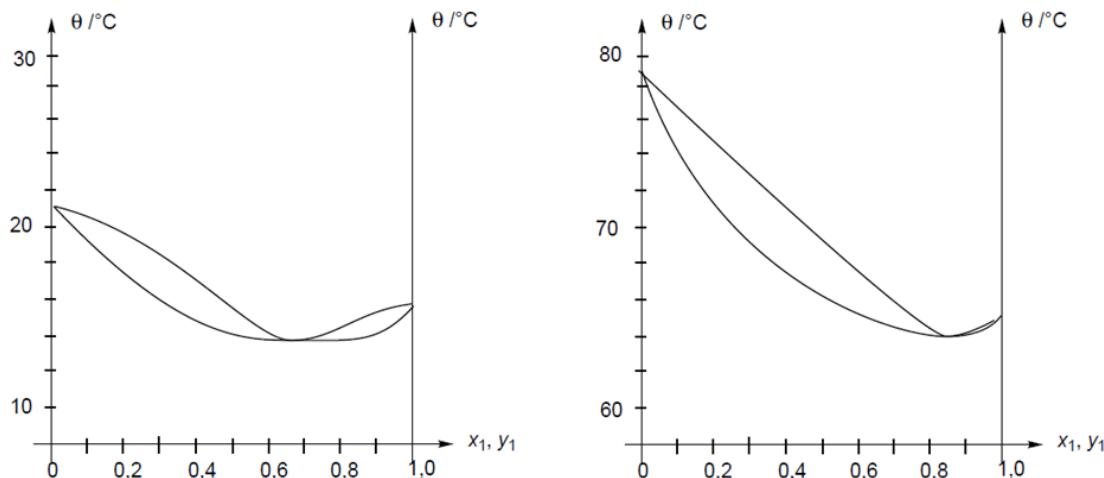
La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Une distillation industrielle**  
 Enoncé

---

**niveau initiation**

Un industriel dispose d'un mélange équimolaire liquide de méthanol et de butanone. Il souhaite récupérer le méthanol et la butanone purs à partir de ce mélange, et dispose dans ce but de colonnes à plateaux qu'il peut alimenter sous les pressions de 1 bar ou 0,1 bar, et des diagrammes binaires liquide/vapeur du mélange des deux espèces pour ces deux valeurs de pression :



**Proposer un dispositif industriel permettant d'atteindre cet objectif avec un minimum de colonnes.**

L'étudiant pourra se référer à toute documentation qui lui semblera nécessaire.

Résolution de problème  
**Une distillation industrielle**  
 Exemple de résolution

<b>S'approprier le problème.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> </ul>
----------------------------------	--

On dispose des deux diagrammes binaires liquide/vapeur du mélange méthanol/butanone sous deux pressions différentes : 1 bar et 0,1 bar. Les deux diagrammes présentent un azéotrope, pour une fraction molaire différente en composé 1.

Le mélange méthanol / butanone est équimolaire.

Il faut déterminer quelle est l'espèce 1 sur les diagrammes, et identifier le diagramme correspondant à

- $p = 1 \text{ bar}$
- et à  $p = 0,1 \text{ bar}$ .

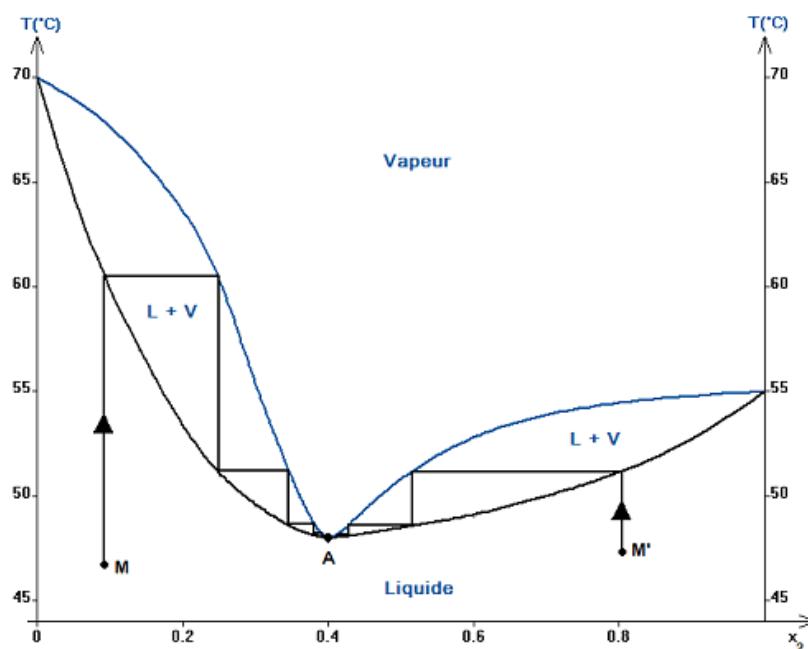
<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
-----------------	---

Au départ, les deux espèces sont liquides ; comme le mélange est équimolaire :  $x_1^\ell = 0,50$ .

La température d'ébullition diminue avec la pression ; ainsi, d'après les températures d'ébullition des diagrammes, on peut identifier les diagrammes : le diagramme de droite correspond à une pression de 1 bar et celui de gauche à une pression de 0,1 bar.

Pour identifier les espèces 1 et 2, il faut chercher les températures d'ébullition dans les tables → Le méthanol étant plus volatil que la butanone, on en déduit que le composé 1 est le méthanol.

L'exploitation d'un diagramme binaire avec azéotrope correspondant à un minimum de température donne :



Le mélange présentant un azéotrope, les deux espèces ne peuvent pas être séparées à l'aide d'une unique colonne (distillation fractionnée unique) → il faut utiliser au moins deux colonnes.

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

Hypothèse : le pouvoir séparateur des colonnes est supposé maximal.

Analyse détaillée des colonnes :

En alimentant la colonne par le mélange à purifier sous  $p = 0,1$  bar, on obtient un résidu constitué de butanone pure et un distillat correspondant au mélange azéotrope ( $x_1 \approx 0,65$ ). Si on utilise le distillat pour alimenter la colonne sous  $p = 1$  bar, on obtient à nouveau un résidu de distillation constitué de butanone pure ; le distillat correspond alors au nouveau mélange azéotrope ( $x_1 \approx 0,85$ ).

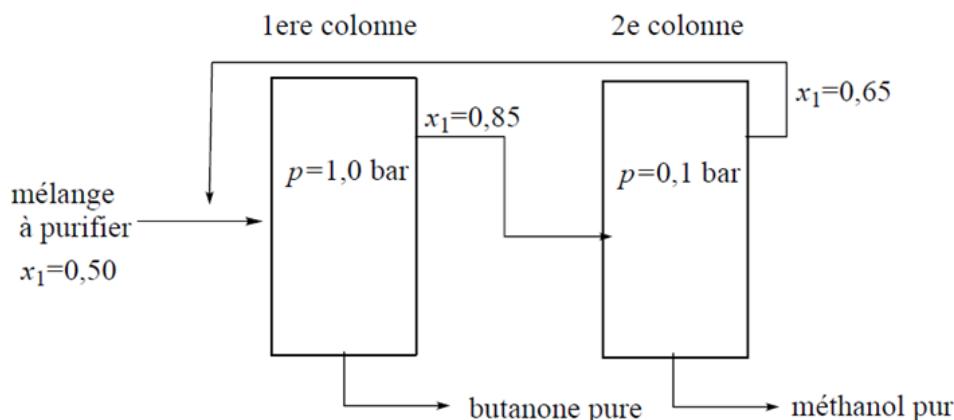
On comprend ainsi que pour obtenir le méthanol pur, il est nécessaire d'alimenter la colonne avec un mélange dont le titre est supérieur à celui du mélange azéotropique.

Pour obtenir les deux composés purs, il faut donc passer de part et d'autre de l'azéotrope. Les composés purs seront obtenus dans les résidus.

On obtient alors progressivement le raisonnement final linéaire suivant :

La première colonne est alimentée par le mélange à purifier sous  $p = 1$  bar ; le résidu de distillation est alors constitué de butanone pure. Le distillat issu de cette première colonne correspond au mélange azéotrope du premier diagramme binaire ( $x_1 \approx 0,85$ ).

Ce distillat alimente ensuite la deuxième colonne sous  $p = 0,1$  bar ; le résidu de distillation est constitué de méthanol pur. Le distillat issu de la deuxième colonne, de titre  $x_1 \approx 0,65$  est renvoyé à l'entrée de l'ensemble du dispositif.



La composition du système à l'entrée de la première colonne ne correspond alors plus à un titre  $x_1 = 0,50$ , mais à une valeur comprise entre 0,50 et 0,65, qui dépend du débit des colonnes et du débit à l'entrée. Dans cet intervalle, le mélange reste de toute façon à gauche de l'azéotrope du diagramme binaire à la pression  $p = 1$  bar, donc le raisonnement ultérieur n'est pas modifié.

**Valider**

- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).
- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue

Le résultat obtenu semble pertinent. La séparation peut être réalisée à condition que le nombre de plateaux réel des colonnes utilisées soit suffisant.

Seule l'utilisation des colonnes dans cet ordre permet de passer des deux côtés de l'azéotrope et donc d'obtenir les deux composés purs avec seulement deux colonnes.

**Résolution de problème**  
**Une distillation industrielle**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Que représentent les deux diagrammes ?</li> <li>– Quel est le mélange étudié ?</li> <li>– Quelle est la composition du mélange ?</li> <li>– Quelles sont les informations utiles manquantes ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la fraction molaire en méthanol ?</li> <li>– Comment identifier quel est le diagramme binaire sous <math>p = 1</math> bar ? sous <math>p = 0,1</math> bar ?</li> <li>– Comment varie la température d'ébullition d'un corps pur avec la pression ?</li> <li>– Comment identifier les espèces 1 et 2 ?</li> <li>– Comment se déplace-t-on sur un diagramme binaire lors d'une distillation ?</li> <li>– Qu'obtient-on à la sortie de la colonne si le mélange de départ a un titre inférieur à celui de l'azéotrope ? si le mélange de départ a un titre supérieur à celui de l'azéotrope ?</li> <li>– Peut-on obtenir les deux espèces pures avec une seule colonne ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Peut-on obtenir une espèce pure dans le distillat ?</li> <li>– Comment obtenir la butanone pure ?</li> <li>– Comment doit-être situé le mélange initial par rapport à l'azéotrope pour obtenir la butanone pure ?</li> <li>– Que fait l'industriel du distillat issu de la deuxième colonne ?</li> <li>– Le raisonnement reste-t-il valable pour une exploitation industrielle ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Peut-on exploiter différemment les deux colonnes proposées ?</li> <li>– A quelle condition la séparation totale est-elle possible ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Une distillation industrielle**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les azéotropes sont repérés.</li> <li>– La composition du mélange est notée.</li> <li>– Les diagrammes sont identifiés.</li> <li>– Les espèces 1 et 2 sont identifiées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le tracé de la distillation fractionnée (plateaux théoriques) dans le diagramme binaire est maîtrisé.</li> <li>– La nécessité de coupler deux colonnes est identifiée.</li> <li>– Le titre en méthanol est déterminé.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La nécessité que le mélange soit alternativement d'un côté puis de l'autre de l'azéotrope est perçue.</li> <li>– La stratégie de récupération de la butanone dans le résidu de distillation de la première colonne est mise en œuvre.</li> <li>– L'exploitation du distillat dans une deuxième colonne est envisagée.</li> <li>– La stratégie de récupération du méthanol dans le résidu de distillation de la deuxième colonne est mise en œuvre.</li> <li>– Le recyclage du distillat de la deuxième colonne est envisagé.</li> <li>– La faisabilité du système est considérée.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La stratégie est validée.</li> <li>– Le nombre de plateaux réel de la colonne est considéré.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# L'échographie

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur la réflexion/transmission d'une onde acoustique à une interface - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	2	3	3	1	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Interfaces entre deux milieux  – Réflexion, transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des vitesses, des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Expliciter des conditions aux limites à une interface.</li> <li>– Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion.</li> <li>– Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'échographie**  
 Enoncé

## Le gel échographique

D'après  
*«science-for-everyone.over-blog.com»*

### **Une couche de gel pour éviter la réflexion due à l'air.**

L'échographie utilise les ultrasons. Ce sont des ondes acoustiques hautes fréquences qui sont inaudibles par l'homme (les ultrasons ont une fréquence de 20 kHz à 1 GHz).

Une partie des ondes sonores (et donc les ultrasons) rebondissent lorsque l'impédance acoustique change, c'est-à-dire aux interfaces entre les différents milieux. C'est pour cette raison que sous l'eau, on entend très peu ce qui se passe à la surface car une grande partie des ondes sonores se réfléchissent sur l'eau et très peu sont transmises sous l'eau car les impédances de l'eau et de l'air sont très différentes.

	masse volumique (kg · m <sup>-3</sup> )	Vitesse du son (m · s <sup>-1</sup> )	Impédance acoustique (Pa · s · m <sup>-1</sup> )
air	1,204	343	418
eau	1000	1480	$1,48 \times 10^6$

Le principe de l'échographie revient à balayer à l'aide d'ultrasons une zone à étudier (par exemple l'utérus d'une future maman) et de mesurer et d'analyser les ondes ayant été réfléchies sur les différentes interfaces (l'écho des ultrasons) de manière à reconstituer une image des différents milieux traversés.

On applique un gel échographique sur la zone à analyser. Ce gel possède une impédance acoustique proche de celle de la peau. L'échographe manipule la sonde de manière à ce qu'il n'y ait pas d'air entre la peau et la sonde recouverte de gel car l'air ayant une impédance très faible fausserait les mesures. C'est également pour cette raison que l'échographie ne peut pas être utilisée comme méthode d'imagerie médicale pour les poumons ou la trachée qui contiennent de l'air.



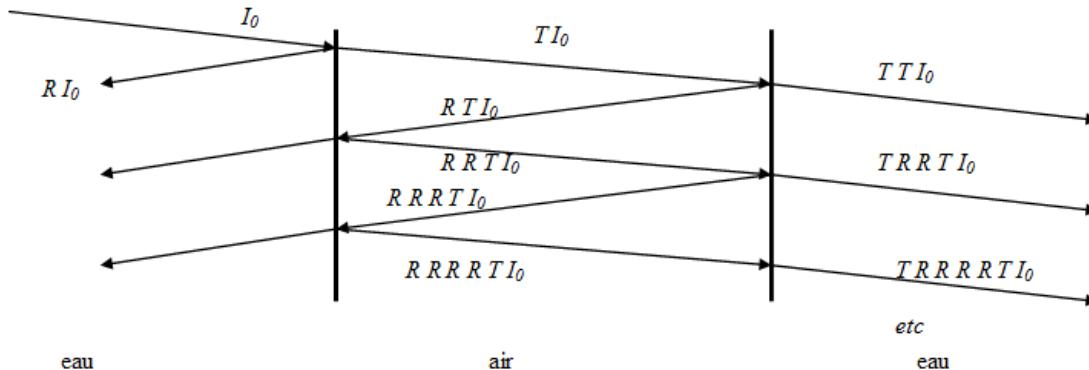
### **niveau confirmé**

En évaluant le rapport de deux intensités sonores arrivant sur le corps (en présence et en l'absence d'air sur le trajet de l'onde), illustrer quantitativement les précautions prises par l'échographe.

# Résolution de problème L'échographie

## Exemple de résolution

On peut modéliser le corps comme de l'eau.  
Les différentes ondes qui sont en jeu dans le problème sont schématisées ci-dessous :



- Il s'agit de calculer le coefficient de transmission  $T$  en énergie d'une onde acoustique à l'interface eau-air.
- Il faut ensuite sommer les énergies de toutes les ondes arrivant sur le corps, si on suppose l'incohérence de celles-ci (pas d'interférence).

$$p = Z_c \cdot v_z \quad \text{pour une onde plane se propageant vers les } z \text{ croissants}$$

et

$$p = -Z_c \cdot v_z \quad \text{pour une onde plane se propageant vers les } z \text{ décroissants}$$

La pression est bien entendu continue, comme on peut s'en assurer en imaginant la présence d'un piston de masse nulle entre les deux gaz. Et le débit volumique est continu aussi. Donc, à l'interface  $z = 0$  de section  $S$ ,

$$P(z = 0^-, t) = P(z = 0^+, t) \quad \forall t$$

et

$$S \cdot v_z(z = 0^-, t) = S \cdot v_z(z = 0^+, t) \quad \forall t$$

Donc les coefficients de réflexion en pression  $r_p$  et en vitesse  $r_v$  vérifient :

$$r_p = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = -r_v$$

On en déduit que le coefficient de réflexion en énergie est

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

et donc que le coefficient de transmission en énergie est

$$T = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = 1,12 \times 10^{-3}$$

L'intensité qui passe avec l'air est égale à la somme des intensités  $I_n$  de chaque onde transmise

$$I_a = I_1 + I_2 + \dots = \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n$$

où le premier terme de la série est :  $I_1 = TT I_0 = T^2 I_s$  et la relation de récurrence est :

$$I_n = I_{n-1} R R = I_1 \cdot (R^2)^n = I_1 R^{2n}$$

Le calcul de cette série géométrique donne :

$$I_a = T^2 I_s \sum_{n=1}^{n=\infty} R^{2n} = \frac{T^2 I_s}{1 - R^2}$$

Après calcul, on trouve :

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{T^2}{1 - (1 - T)^2}$$

Application numérique :

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(1,12 \times 10^{-3})^2}{1 - (1 - 1,12 \times 10^{-3})^2} = 5,60 \times 10^{-4}$$

NB : si l'on "oublie" de sommer toutes les intensités, on trouve simplement :

$$\frac{I_a}{I_s} = T^2$$

Application numérique :

$$\frac{I_a}{I_s} = (1,12 \times 10^{-3})^2 = 1,3 \times 10^{-6}$$

qui aboutit à la même conclusion.

$\frac{I_a}{I_s} \ll 1$ . Cela justifie la nécessité du gel échographique pour éviter la présence d'air sur le trajet.

**Résolution de problème**  
**L'échographie**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li><li>– Modéliser les différentes interfaces traversées par l'onde acoustique.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comment relier l'intensité de l'onde transmise à l'intensité de l'onde incidente ?</li><li>– Quelles sont les ondes qui arrivent sur le corps ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Calculer le coefficient de transmission énergétique à une interface (<math>T</math>). En déduire le coefficient de réflexion en énergie (<math>R</math>).</li><li>– Écrire l'intensité de l'onde arrivant sur le corps grâce à une série géométrique. En déduire le rapport demandé (<math>\frac{I_a}{I_s}</math>).</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comparer <math>\frac{I_a}{I_s}</math> à 1.</li></ul>

**Résolution de problème**  
**L'échographie**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données utiles du texte sont relevées et nommées.</li> <li>– Le problème est modélisé par deux interfaces air - eau.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'effet du passage des interfaces est formalisé pour les énergies des différentes ondes en jeu.</li> <li>– L'énergie de l'onde arrivant sur le corps est comprise comme une somme de toutes les énergies de toutes les ondes arrivant sur le corps.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le coefficient de transmission énergétique à une interface air -eau (<math>T</math>) est évalué correctement. Le coefficient de réflexion en énergie (<math>R</math>) en est déduit.</li> <li>– L'intensité de l'onde arrivant sur le corps est calculée grâce à la série géométrique <math>I_a = \frac{T^2 I_s}{1-R^2}</math>. Le rapport demandé (<math>\frac{I_a}{I_s}</math>) est déduit.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le fait que <math>\frac{I_a}{I_s} \ll 1</math> est justifié par la nécessité du gel échographique pour éviter la présence d'air sur le trajet.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Enlever une nappe ... sans les assiettes

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sur les lois de Coulomb pour le frottement de glissement – Programme de première année.

Le niveau "initiation" est une première approche du phénomène, partielle et légèrement guidée. Elle demande surtout de bien choisir les sous systèmes mécaniques et de bien appliquer les lois de Coulomb pour obtenir la limite de glissement/non glissement. Le niveau "confirmé" reprend le niveau "initiation" sans être guidé. Le niveau "expert" laisse libre cours à différentes approches plus ou moins poussées, dont la première est l'approche partielle des niveaux "initiation" et "confirmé". D'ailleurs, même dans une formulation de type "initiation" ou "confirmé", rien n'empêche un élève s'étant bien approprié la situation de pousser plus loin son analyse vers le niveau "expert".

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	3	3	2	4
niveau "confirmé"	3	3	3	2	4
niveau "expert"	4	4	4	3	4

## Cadre du programme officiel : Première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Loi de la quantité de mouvement</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Forces. Principe des actions réciproques.</li> <li>– Loi de la quantité de mouvement dans un référentiel galiléen.</li> <li>– Lois de Coulomb du frottement de glissement dans le seul cas d'un solide en translation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir un bilan des forces sur un système, ou plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur une figure.</li> <li>– Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre d'inertie d'un système fermé.</li> <li>– Exploiter les lois de Coulomb fournies dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage.</li> <li>– Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Enlever une nappe ... sans les assiettes**  
Enoncé

On connaît tous l'expérience impressionnante consistant à retirer une nappe d'une table sans faire tomber la vaisselle posée de dessus. De façon plus modeste, on peut songer à enlever une serviette sans faire tomber l'assiette posée dessus (à gauche) ou encore une feuille de papier sans faire tomber le téléphone portable de la figure de droite.



---

**niveau initiation**

Si on tire "suffisamment doucement" sur la feuille de papier, le téléphone portable restera solidaire de la feuille et sera entraîné par lui. Quelle force minimale faut-il exercer sur la feuille pour que le téléphone glisse par rapport à la feuille ?

---

**niveau confirmé**

Quelle force minimale faut-il exercer sur la feuille de papier pour que le téléphone portable glisse sur cette dernière ?

---

**niveau expert**

Quelle force exercer sur la feuille de papier pour la retirer sans faire tomber le téléphone du bureau ?

**Remarque :** Comme contextualisation, on peut aussi simplement faire l'expérience de la feuille et du téléphone portable devant les étudiants et demander ensuite la condition nécessaire à la réussite de l'expérience

Résolution de problème  
**Enlever une nappe ... sans les assiettes**  
 Exemple de résolution

On travaille dans le référentiel  $\mathcal{R}$  lié à la table (terrestre), supposé galiléen.

On commence par schématiser la situation sur la figure 2. On appelle  $O$ , origine de l'axe horizontal des  $x$ , la position initiale du centre d'inertie du téléphone portable. Les distances caractéristiques  $R$ ,  $r$  et  $D$  sont représentées sur la vue de dessus de la figure 2(b).

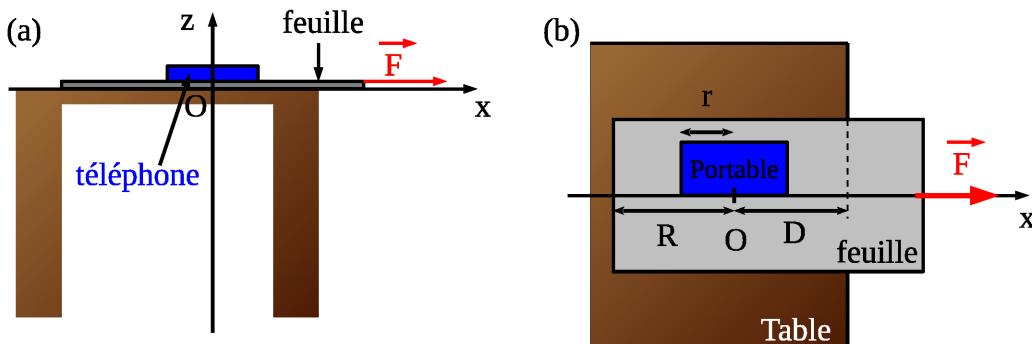


FIGURE 2 – (a) Vue de côté de la situation – (b) Vue de dessus. Pour ne pas alourdir la figure, les autres forces n'ont pas été représentées.

**Grandeurs utiles :** On appelle  $m$  la masse de la feuille,  $M$  celle du téléphone et  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$  l'accélération de la pesanteur. On note  $\vec{F} = F\vec{u}_x$  ( $F > 0$ ) la force exercée par l'opérateur sur la feuille. On suppose que cette force est nulle pour  $t < 0$  puis constante (réponse à un échelon). On notera  $\mu$  le coefficient de frottement du téléphone sur la feuille de papier. On négligera la différence entre coefficient statique et dynamique.

Concernant les valeurs numériques, on prend  $m = 5 \text{ g}$  : pour ne pas dépasser la limite d'affranchissement d'une lettre de 20 g de la poste, il ne faut pas dépasser 4 feuilles A4.<sup>6</sup>. Pour le téléphone, on peut prendre  $M = 100 \text{ g}$ .<sup>7</sup>

Enfin, on peut considérer que  $\mu$  est compris entre 0,2 et 0,4. Pour obtenir cet ordre de grandeur, on peut poser son téléphone sur un papier, posé lui-même sur un cahier rigide horizontal. On incline l'ensemble d'un angle  $\alpha$ . Si le téléphone glisse pour un angle  $\alpha_c$ , on a  $\mu = \tan \alpha_c$ .<sup>8</sup> Expérimentalement, on obtient des angles  $\alpha_c$  entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$ , soit  $0,18 < \alpha_c < 0,36$ .

On considérera un mouvement à un seul degré de liberté le long de l'axe ( $Ox$ ) confondu avec la droite d'action de la force  $\vec{F}$ , comme le montre la figure 3(b).<sup>9</sup>

Dans la suite, il est impossible de séparer les compétences d'analyse et de réalisation : elles sont hautement imbriquées.

On effectue ensuite un bilan des forces sur les sous-systèmes {téléphone} et {feuille} :

**Bilan des forces sur le téléphone :** son poids :  $\vec{P} = -Mg\vec{u}_z$ ; la réaction de la feuille sur le téléphone, composée de sa composante normale et tangentielle :  $\vec{R} = N\vec{u}_z + T\vec{u}_x$ . Tant que le téléphone ne décolle pas, on a  $N > 0$  ... remarque assez triviale ici... Par contre, à ce stade, il faut noter que  $T$  est *algébrique* et *indéterminée* a priori.

**Bilan des forces sur la feuille :** son poids :  $\vec{P} = -mg\vec{u}_z$ ; la réaction du téléphone sur la feuille, composée de sa composante normale et tangentielle :  $\vec{R} = -N\vec{u}_z - T\vec{u}_x$  (on a utilisé le principe des actions réciproques au passage); Force de l'opérateur :  $\vec{F} = F\vec{u}_x$ ; ne pas oublier bien sûr la réaction de la table : on considère qu'il n'y a pas de frottement de glissement, soit  $\vec{R}_t = N_t\vec{u}_z$ .<sup>10</sup>

On applique ensuite le théorème de la quantité de mouvement (ou du mouvement du centre d'inertie) respectivement au téléphone et à la feuille de papier. En projection sur les axes ( $Ox$ ) et ( $Oz$ ), on obtient

6. Avec la généralisation des email, il n'est pas sûr que cette référence soit encore d'actualité.

7. Là, par contre, chaque étudiant connaît sans doute la masse de son portable à  $\pm 1 \text{ g}$ !

8. Cette expérience est un exercice classique sur le frottement de glissement

9. On n'étudiera pas ici les éventuelles rotations des solides dans le plan horizontal : c'est un tout autre problème.

10. Supposer qu'il n'y a pas de frottement est fortement discutable, surtout qu'on verra en fin de résolution que le frottement téléphone/table est fondamental pour la réussite de l'expérience. Toutefois, leur prise en compte ne change pas radicalement la méthode de résolution et ne fait "qu'alourdir" inutilement les expressions de la première phase.

respectivement :

$$\begin{cases} M\ddot{x}_t = T \\ 0 = N - Mg \end{cases} \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \end{array}$$

$$\begin{cases} mx_f = F - T \\ 0 = N_t - N - mg \end{cases} \quad \begin{array}{l} (3) \\ (4) \end{array}$$

La relation (2) conduit  $N = mg$  : la réaction de la composante normale de l'action de la feuille sur le téléphone compense le poids du téléphone.

La relation (4), en utilisant (2), conduit à  $N_t = (M+m)g$ . Intuitivement, la composante normale de l'action de la table compense le poids de l'ensemble {téléphone, feuille}

### Condition de glissement du téléphone sur la feuille :

Dans un premier temps, il faut nécessairement que le téléphone glisse sur la feuille, sinon, ce dernier est entraîné et on court à la catastrophe. Cette condition préliminaire correspond à la question posée au niveau "initiation" et "confirmé".

*Hypothèse* : A partir de  $t = 0$ , on suppose qu'il n'y a pas glissement du téléphone sur la feuille. On a donc à tout instant  $x_t(t) = x_f(t) = x(t)$ , tant que  $|T| < \mu N$ .

En sommant (1) et (3) pour éliminer  $T$ , on obtient  $(M+m)\ddot{x} = F$ . On reconnaît au passage la composante selon  $\vec{u}_x$  du théorème du mouvement du centre d'inertie pour le système {téléphone, feuille}. Avec (1), on obtient l'expression :  $T = \frac{M}{M+m}F > 0$

La condition de non glissement (CNG) s'écrit donc :  $\frac{M}{M+m}F < \mu Mg$ .

Pour que le téléphone glisse sur la feuille, il faut  $F > \mu(M+m)g$  (CG).

Avec les valeurs numériques choisies, on a une force minimale comprise entre 0,2 N et 0,4 N selon la valeur de  $\mu$ , soit une force de l'ordre de grandeur du poids de l'ensemble {téléphone, feuille}, pondéré du coefficient  $\mu$ . Si cette condition est facilement remplie pour le téléphone sur la feuille, elle devient plus délicate dans le cas de nombreux couverts et assiettes sur une nappe...

### Condition sur le retrait de la feuille :

Même si le téléphone glisse sur la feuille, il va se déplacer vraisemblablement, comme la feuille, dans le sens de  $\vec{F}$ . Il faut donc aussi que le contact feuille/téléphone cesse avant que le téléphone n'atteigne le bord de la table.

*Hypothèse* : A partir de  $t = 0$ , on suppose qu'il y a glissement du téléphone sur la feuille. On a donc  $|T| = \mu N = \mu Mg$  à tout instant. On fait en outre l'hypothèse raisonnable que  $0 < \dot{x}_t < \dot{x}_f$ , c'est-à-dire que la vitesse du téléphone par rapport à la feuille est selon  $-\vec{u}_x$ , ce qui conduit à écrire  $T = \mu Mg > 0$ . Ces hypothèses seront valables tant que  $\dot{x}_t - \dot{x}_f < 0$ .

En reprenant (1) et (3) avec ces hypothèses de glissement, on obtient :

$$\begin{cases} \ddot{x}_t = \mu g \\ \ddot{x}_f = \frac{F - \mu Mg}{m} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_t = \mu gt \\ \dot{x}_f = \frac{F - \mu Mg}{m}t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_t(t) = \frac{1}{2}\mu gt^2 \\ x_f(t) = \frac{F - \mu Mg}{2m}t^2 \end{cases}$$

Si la condition de glissement sur  $F$  est vérifiée, l'hypothèse sur le sens du glissement est toujours vérifiée puisque  $\dot{x}_t - \dot{x}_f = \frac{\mu(m+M)g - F}{m}t < 0$ .

On introduit la différence  $\delta(t) = x_f(t) - x_t(t) = \frac{1}{2m}[F - \mu(M+m)g]t^2$ . On retrouve évidemment encore que  $\delta(t) > 0$  tant que la relation (CG) est vérifiée.

La feuille sera retirée de sous le téléphone à partir de l'instant  $t_0$  où  $\delta(t_0) = R + r$ . On obtient alors  $t_0 = \sqrt{\frac{2m(R+r)}{F - \mu(M+m)g}}$ .

Pendant cette phase d'entraînement, il ne faut pas que le centre d'inertie du téléphone quitte la table. Il faut donc que  $x_t(t_0) < D$  soit  $\frac{1}{2}\mu g t_0^2 < D$ . En utilisant l'expression de  $t_0$  trouvée précédemment, on obtient que la

force  $F$  doit être telle que :  $F > \frac{\mu mg(R+r) + \mu(M+m)gD}{D}$

Pour simplifier cette expression littérale sans changer radicalement la généralité du problème, on peut étudier le cas où  $D = R$ , ce qui conduit à :  $F > \mu mg \left(1 + \frac{r}{R}\right) + \mu(M+m)g = \mu \left[M + m \left(2 + \frac{r}{R}\right)\right]g$ .

Même si l'expression de cette force limite est plus complexe que celle obtenue par la relation (CG) de l'approche préliminaire, il n'y a en pratique que peu de changement car  $m \ll M$ , ce qui atténue considérablement

l'effet du terme correctif  $\left(2 + \frac{r}{R}\right)$ . Pour les valeurs numériques, avec  $\mu = 0,2$ , on prend  $R = D = 20$  cm et  $r = 5$  cm, ce qui conduit à une force limite de  $F_{lim} = 0,225$  N, au lieu des 0.21 N de la condition (CG).

#### Condition sur l'arrêt du téléphone avant le bord de la table :

Même si la feuille a été retirée de sous le téléphone avant qu'il n'atteigne le bord de la table, ce dernier aura une vitesse  $x_t(t_0) = \mu g \sqrt{\frac{2m(R+r)}{F-\mu(M+m)g}}$  non nulle à l'abscisse  $x_t(t_0) = \frac{\mu mg(R+r)}{F-\mu(M+m)g}$ . S'il n'y a pas de frottement de la table sur le téléphone, ce dernier va atteindre le bord de la table à vitesse constante. Il faut donc prendre en compte le coefficient de frottement table/téléphone, noté  $\mu_0$ .

Après un nouveau bilan des forces sur le téléphone, la méthode la plus efficace consiste à utiliser le théorème de l'énergie cinétique. Avant que le téléphone n'atteigne le bord de la table, il faut que le travail résistant de la force de frottement sur la distance  $R - x_t(t_0)$  dissipe l'énergie cinétique  $\frac{1}{2}Mx_t^2(t_0)$  acquise par le téléphone dans le référentiel lié à la table, soit :  $\frac{1}{2}Mx_t^2(t_0) < \mu_0 Mg[R - x_t(t_0)]$ . Quelques lignes de calculs conduisent à une nouvelle expression de la valeur minimale de la force à appliquer :

$$F > \mu g \left[ M + m \left( \frac{1 + \mu_0 + \mu}{\mu_0} + \frac{1 + \mu}{\mu_0} \frac{r}{R} \right) \right]$$

On retrouve logiquement que pour un  $\mu_0$  très faible, il faut une force très grande pour éviter de faire chuter le téléphone. Numériquement, en prenant  $\mu_0 = \mu = 0,2$ , on obtient une force  $F_{lim} = 0,285$  N, du même ordre de grandeur que les conditions précédentes.

*Remarque : Sinon, on peut aussi utiliser le théorème du mouvement du centre d'inertie qui conduit à  $\ddot{x}_t = -\mu_0 g$  tant que  $\dot{x}_t(t) > 0$ . Reste à intégrer et à vérifier que la vitesse s'annule avant que le téléphone n'atteigne le bord de la table.*

On constate clairement qu'il faut avoir un coefficient de frottement  $\mu$  le plus faible possible pour ne nécessiter qu'une faible force  $F$ . Ceci dit, dans le cas où il n'y a qu'une assiette, la force à exercer est de toute façon très raisonnable. Au passage, dans le cas asymptotique  $\mu = 0$ , on retrouve évidemment qu'il y a toujours glissement entre le téléphone et la feuille et qu'une force  $F$  minime suffit à réaliser l'expérience. D'ailleurs, la résolution conduirait à  $x_t(t) = 0$  : le téléphone ne bouge pas !

Par contre, une fois la feuille retirée de sous le téléphone, il faut ralentir efficacement la vitesse acquise par le téléphone dans  $\mathcal{R}$ . Il faut donc des frottements "importants" entre le téléphone et la table. Sans ces derniers, même avec une vitesse  $x_t(t_0)$  minime, le téléphone glisserait inévitablement jusqu'au bord de la table...

#### Pour aller plus loin :

On peut encore affiner la modélisation en considérant que la force exercée sur la feuille n'est pas un échelon mais augmente linéairement. Un exemple d'une telle étude peut être trouvée au début du sujet de Physique II des Mines MP 2001.<sup>11</sup>

Enfin, une étude poussée de ce genre d'expériences a été présentée dans l'émission "*On n'est pas des cobayes*" sur FRANCE 5 le 11/05/2012.

11. C'est d'ailleurs ce sujet qui a inspiré cette résolution de problème

**Résolution de problème**  
**Enlever une nappe ... sans les assiettes**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel(s) système(s) mécanique(s) peut-on définir ?</li> <li>– Faire un schéma du téléphone et de la feuille et faire un bilan des forces sur chaque sous-système.</li> </ul> <p><u>Pour les versions "confirmé" et "expert"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel type d'interaction mécanique existe-t-il entre la feuille et le téléphone ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Peux-t-on s'aider du principe des actions réciproques ? A quel endroit ?</li> </ul> <p><u>Pour la version "expert"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont la(les) condition(s) nécessaire(s) successive(s) pour que le téléphone ne tombe pas de la table ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Appliquer la loi de la quantité de mouvement pour chaque sous-système</li> <li>– A quelle condition n'y a-t-il pas glissement du téléphone sur la feuille ?</li> </ul> <p><u>Pour la version "expert"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– S'il y a glissement du téléphone par rapport à la feuille au départ, le glissement subsiste-t-il ultérieurement ?</li> <li>– Où le téléphone se situe-t-il lorsque la feuille a été retirée de sous le téléphone ?</li> <li>– Que fait le téléphone une fois la feuille retirée ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Commenter l'expression de la composante normale de l'action de la table sur la feuille.</li> <li>– Comment obtenir expérimentalement (sur sa table) un ordre de grandeur du coefficient de frottement d'un téléphone portable par rapport à une feuille de papier ?</li> <li>– Pour faciliter l'expérience, comment choisir la valeur du coefficient de frottement du téléphone sur la feuille ?</li> </ul> <p><u>Pour la version "expert"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pour faciliter l'expérience, comment choisir la valeur du coefficient de frottement du téléphone sur la table ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Enlever une nappe ... sans les assiettes**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le rôle fondamental des frottements de glissement a été remarqué.</li> <li>– Le dispositif est correctement schématisé.</li> <li>– Les grandeurs caractéristiques sont introduites (coefficient de frottement, masses ...). Pour la version "expert" : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les différents scénarios conduisant à la chute du téléphone sont décrits.</li> <li>– Les distances caractéristiques sont introduites.</li> </ul> </li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'utilité du principe des actions réciproques a été remarquée.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Un bilan des forces est correctement réalisé pour chaque sous-système</li> <li>– Le principe des actions réciproques est correctement appliqué</li> <li>– L'hypothèse de non glissement est correctement appliquée Pour les versions confirmé et expert : <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'hypothèse du glissement est vérifiée</li> <li>– La condition de la position finale du téléphone par rapport à la table est bien utilisée.</li> </ul> </li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'expression de la composante normale de l'action de la table sur la feuille est commentée.</li> <li>– L'ordre de grandeur du(des) coefficient(s) de frottement est correct ou tout au moins commenté.</li> <li>– L'effet de la valeur du coefficient de frottement du téléphone sur la feuille est commenté. Pour la version "expert" : <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'effet de la valeur du coefficient de frottement du téléphone sur la table est commenté.</li> </ul> </li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# L'étiquette d'un engrais

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème expérimentale sur les titrages - programme de première année.

Cette résolution de problème propose de vérifier les données de l'étiquette d'un engrais commercial en réalisant un (ou des) titrage(s). La difficulté pour les élèves est dans l'analyse du problème : identifier les types de titrages possibles et les solutions titrantes qu'il est possible d'utiliser.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	1	4	3	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Réactions d'oxydoréduction – Aspect thermodynamique. – Dismutation et médiamutation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction.</li> <li>– Pratiquer une démarche expérimentale mettant en jeu des réactions d'oxydo-réduction.</li> </ul>
Réactions de dissolution ou de précipitation – constante de l'équation de dissolution, produit de solubilité $K_s$ ; – solubilité et condition de précipitation ;  Dosages par titrage – Titrages directs, indirects. – Équivalence. – Titrages simples, successifs, simultanés. – Méthodes expérimentales de suivi d'un titrage : pH-métrie, conductimétrie, potentiométrie à intensité nulle, indicateurs colorés de fin de titrage. – Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier et exploiter la réaction support du titrage (recenser les espèces présentes dans le milieu au cours du titrage, repérer l'équivalence, justifier qualitativement l'allure de la courbe ou le changement de couleur observé).</li> <li>– Proposer ou justifier le protocole d'un titrage à l'aide de données fournies ou à rechercher.</li> <li>– Mettre en œuvre un protocole expérimental correspondant à un titrage direct ou indirect.</li> <li>– Exploiter une courbe de titrage pour déterminer le titre en espèce dosée.</li> <li>– Exploiter une courbe de titrage pour déterminer une valeur expérimentale d'une constante thermodynamique d'équilibre.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'étiquette d'un engrais**  
Enoncé

**niveau confirmé**

**Problématique :**

Photo d'une bouteille d'engrais :



L'étiquette de la solution commerciale d'engrais indique « 82 g/L de  $\text{SO}_3$  et 60 g/L de Fe ».

Proposer un protocole expérimental permettant de vérifier les données de l'étiquette.

L'étudiant pourra se référer à toute table qui lui semble nécessaire. On dispose :

- de la verrerie usuelle du laboratoire de chimie,
- des appareils de mesure classiques de chimie générale :

- pH-mètre,
- conductimètre,
- spectrophotomètre UV-visible.

- des solutions aqueuses couramment utilisées au laboratoire de chimie :

- Acide chlorhydrique
- Chlorure d'ammonium
- Chlorure de baryum
- Dichromate de potassium
- Hydroxyde de sodium
- Indicateurs colorés : bleu de bromothymol, hélianthine, phénolphthaleïne
- Nitrate d'argent
- Permanganate de potassium
- Peroxyde d'hydrogène
- Sulfate de cérium
- Thiocyanate de potassium
- Thiosulfate de sodium

**Résolution de problème**  
**L'étiquette d'un engrais**  
**Exemple de résolution**

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

- La concentration massique de deux espèces est donnée.
- Une liste de matériel et de solution est donnée ; on dispose d'un ensemble de solutions présentant des propriétés acido-basiques, oxydo-réductrices, indicateurs colorés, ...

Analyser	– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites. – Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. – Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. – Établir une stratégie de résolution.
----------	---

- $SO_3$  conduit à  $SO_4^{2-}$  en solution aqueuse selon :  $SO_3 + 3H_2O = SO_4^{2-} + 2H_3O^+$ . La notation « Fe » sur l'étiquette signifie  $Fe^{2+}$ . Ceci est confirmé par la photo de la bouteille où il est indiqué « sulfate de fer revitalisant ».
- Si nécessaire, l'étudiant peut effectuer des tests en tube à essai afin de contrôler que la notation "Fe" fait bien référence aux ions fer II (obtention d'un précipité vert de  $Fe(OH)_2$  par ajout d'ions  $HO^-$ ).
- Il n'est pas nécessaire de doser chacun des ions puisqu'on doit avoir, par électroneutralité,  
 $[Fe^{2+}]_{\text{étiquette}} = [SO_4^{2-}]_{\text{étiquette}}$
- Si nécessaire l'étudiant peut alors effectuer quelques test en tube à essai afin de déterminer le réactif à utiliser pour le dosage des ions  $Fe^{2+}$  ou  $SO_4^{2-}$ .

On peut trouver dans les tables :

- Potentiels redox standard :

Couple	$Fe^{3+}/Fe^{2+}$	Fe(III)/Fe(II) en milieu sulfurique	$Ce^{4+}/Ce^{3+}$
Teinte	rouille / vert pâle	rouille / vert pâle	orangé / incolore
$E^\circ(V)$	0,77	0,68	1,72

- Produit de solubilité :  $K_s(BaSO_4) = 1,0 \times 10^{-10}$ .

- Conductivités molaires limites des ions à 25°C :

Ion	$Cl^-$	$Ba^{2+}$	$SO_4^{2-}$
$\lambda^\circ(S \cdot cm^2 \cdot mol^{-1})$	76	127	160

- Les ions ferreux peuvent être dosés par titrage redox suivi par potentiométrie ou par colorimétrie. Quant aux ions sulfate, un titrage par précipitation peut être envisagé, suivi par exemple par conductimétrie.

Méthode 1 : On réalise un titrage redox des ions ferreux. Des tests rapides en tube à essai peuvent être réalisés par l'étudiant afin de choisir un oxydant efficace. On pourra utiliser par exemple les ions  $Ce^{4+}$ .

Équation de la réaction support de titrage :  $Fe_{(aq)}^{2+} + Ce_{(aq)}^{4+} = Fe_{(aq)}^{3+} + Ce_{(aq)}^{3+}$ .

Calcul de la constante d'équilibre :  $K^\circ = e^{\frac{1,72 - 0,77}{0,06}} = 10^{15,8}$ .

Le suivi sera un suivi potentiométrique.

Pour trouver les volumes et les dilutions adéquats, il faut faire un calcul rapide à partir des données fournies sur l'étiquette.

Il est noté 60 g/L de fer donc  $[Fe^{2+}]_{\text{étiquette}} = \frac{60}{55,8} = 1,07 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ . En diluant 10 fois la solution commerciale, on aurait  $[Fe^{2+}] = 0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$  environ.

Si nous disposons d'une solution de cérium (IV) à  $C = 2,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot L^{-1}$  par exemple, avec une prise d'essai de 20 mL, cela ferait  $V_{eq}$  environ de 10 mL, c'est correct.

Méthode 2 : On dose les ions sulfate, par exemple par les ions  $Ba^{2+}$ . D'autres dosages peuvent être mis en jeu, celui-ci est un exemple.

Équation de la réaction support de titrage :  $Ba^{2+}_{(aq)} + SO_4^{2-}_{(aq)} = BaSO_4 \text{ (s)}$ .

Constante d'équilibre :  $K^\circ = 1,0 \times 10^{10}$ .

Le suivi sera un suivi conductimétrique

En utilisant également les données de l'étiquette, et en faisant un calcul rapide, on trouve qu'on peut utiliser une solution de chlorure de baryum à  $C = 2,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pour doser la solution d'engrais préalablement diluée au 10<sup>ème</sup>. Le volume de la prise d'essai sera de 20,0 mL.

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

Protocole expérimental, matériel et solutions nécessaires :

- burette graduée
- agitateur magnétique
- bêcher contenant la solution d'engrais
- pipette pour prélever la solution d'engrais
- fiole jaugée pour effectuer la dilution
- potentiomètre + ECS + électrode de platine pour méthode 1.
- conductimètre + cellule conductimétrique pour méthode 2.
- solution aqueuse de chlorure de baryum à  $C = 2,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pour méthode 2.
- solution aqueuse de sulfate de cérium à  $C = 2,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pour méthode 1.

#### Méthode 1 :

A l'équivalence :  $n_0(Fe^{2+}) = n_{eq}(Ce^{4+})$  soit  $C V_{eq} = C_{Fe^{2+}} V_0$  avec  $V_{eq} = 11,4 \text{ mL}$ .

L'équivalence est repérée par le saut de potentiel.

Dans la solution dosée d'engrais, la concentration molaire en ions fer(II) est donc :  $C_{Fe^{2+}} = \frac{2,0 \times 10^{-1} \times 11,4}{20} = 0,14 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Dans la solution initiale d'engrais :  $C = 10 C_{Fe^{2+}} = 10 \times \frac{2,0 \times 10^{-1} \times 11,4}{20} = [1,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}]$ .

#### Méthode 2 :

Le titrage est effectué en prélevant 20,0 mL de la solution d'engrais diluée 10 fois. On rajoute ensuite environ 90 mL d'eau distillée pour obtenir des droites lorsque l'on mesure la conductivité en fonction du volume de solution titrante versée.

On constate que dès les premières gouttes de titrant versées, la solution se trouble et un précipité blanc apparaît. Cet aspect trouble et blanchâtre perdure tout le long du dosage : la solution est constamment saturée. C'est un précipité de  $BaSO_4$ .

A l'équivalence :  $n(Ba^{2+})_{eq} = n_0(SO_4^{2-})$  soit  $C' V_{eq} = C_{SO_4^{2-}} V_0$  avec  $V_{eq} = 11,4 \text{ mL}$ .

L'équivalence est repérée par une rupture de pente.

Dans la solution initiale d'engrais, la concentration molaire en ions sulfate est donc :

$C = 10 C_{SO_4^{2-}} = 10 \times \frac{2,0 \times 11,4}{20} = [1,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}]$ .

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

#### Méthode 1 :

Comparaison avec l'étiquette : il est noté 60 g/L de fer

$[Fe^{2+}]_{étiquette} = \frac{60}{55,8} = 1,07 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Écart relatif :  $\frac{1,14 - 1,07}{1,07} = 6,5\%$ .

#### Méthode 2 :

Comparaison avec l'étiquette : il est noté 82 g/L de  $SO_3$ .

On sait que  $SO_3$  conduit à  $SO_4^{2-}$  en solution aqueuse selon :  $SO_3 + 3 H_2O = SO_4^{2-} + 2 H_3O^+$ .

La concentration molaire de  $\text{SO}_3^{2-}$  est donc la même que celle de  $\text{SO}_4^{2-}$  et est donc égale à :

$$[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{étiquette}} = \frac{82}{M(\text{SO}_3)} = 1,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Écart relatif :  $\frac{1,14 - 1,02}{1,02} = 11,8\%$ . On peut se demander, le pourcentage d'erreur n'étant pas le même, s'il y a d'autres sources d'ions sulfate dans l'engrais.

Pour réduire l'intervalle entre les pourcentages d'écart, il serait judicieux de réaliser plusieurs titrages.

Un calcul d'incertitude pourrait être envisagé pour voir où se situe l'intervalle de valeurs possibles par rapport à la valeur indiquée.

Pour la méthode 2, il est possible d'envisager une erreur systématique liée à la présence d'autres sulfates.

Quant à la méthode 1, le fer, l'écart relatif est aussi élevé. Il est également possible que d'autres réducteurs soient présents dans l'antimousse, ce que peut laisser penser la valeur plus élevée obtenue pour la concentration en élément Fer.

Résolution de problème  
**L'étiquette d'un engrais**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel(s) type(s) de dosage(s) doit(vent) être mis en jeu ?</li> <li>– Quelles sont les données utiles ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Que signifient sur l'étiquette les notations « <math>Fe</math> » et « <math>SO_3</math> » ?</li> <li>– Est-il nécessaire de doser les ions <math>Fe^{2+}</math> ET les ions <math>SO_4^{2-}</math> pour répondre à la problématique ?</li> <li>– Par quelle(s) méthode(s) expérimentale(s) peut-on réaliser ces titrages ?</li> <li>– Comment trouver un réactif exploitable pour le dosage ?</li> <li>– Il y a deux méthodes pour résoudre ce problème : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont les équations des réactions qui ont lieu au cours du (ou des) titrage(s) ?</li> <li>– Quelles solutions titrantes peuvent être utilisées ?</li> <li>– Quels sont les volumes de prise d'essai à envisager et les concentrations des solutions titrantes à utiliser ?</li> </ul> </li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Questions pratiques sur la manipulation : <ul style="list-style-type: none"> <li>– quel est le matériel nécessaire ?</li> <li>– quels capteurs et quel appareillage utiliser ?</li> <li>– faut-il resserrer les prises de points ?</li> </ul> </li> <li>– Comment écrire la relation à l'équivalence ?</li> <li>– Comment calculer les concentrations en ions ferreux et /ou en ions sulfate dans l'engrais ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel regard critique peut-on poser sur le raisonnement mené ?</li> <li>– Si un seul des deux ions a été dosé, comment valider le résultat ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**L'étiquette d'un engrais**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les concentrations données par l'étiquette.</li> <li>– Comprendre que l'on peut doser l'un OU l'autre des ions.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se rendre compte que l'on peut réaliser un titrage rédox pour les ions ferreux ou par précipitation pour les ions sulfate.</li> <li>– Chercher les données utiles dans les tables</li> <li>– Lister les réactions support de titrage.</li> <li>– Analyser les solutions titrantes à utiliser, leur concentration, ainsi que les dilutions préalables nécessaires (ou non) de la solution d'engrais.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mettre en œuvre le protocole expérimental.</li> <li>– Les relations à l'équivalence sont exprimées</li> <li>– Le calcul est mené à son terme pour connaître la concentration en ions ferreux (méthode 1) ou en ions sulfate (méthode 2).</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'écart relatif par rapport aux données de l'étiquette est exprimé.</li> <li>– Si un seul des deux ions a été dosé, l'autre peut l'être aussi afin de vérifier la cohérence des résultats.</li> <li>– Des hypothèses sont proposées pour justifier les écarts relatifs.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La fusée à eau

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les systèmes ouverts et les bilans - programme de seconde année. Dans la version "confirmé", de nombreuses données sont inutiles et rendent l'appropriation assez difficile. Dans la version "expert", au contraire, de nombreuses données sont manquantes et rendent l'appropriation plus difficile encore (il faut en particulier estimer les valeurs numériques des dimensions de la fusée) mais aussi l'analyse plus compliquée (le mot "tuyère" est absent du document, qui oriente la résolution).

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	2	3	2	1	2
niveau "expert"	4	4	2	1	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dynamique dans un référentiel non galiléen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déterminer la force d'inertie d'entraînement.</li> <li>– Appliquer la loi de la quantité de mouvement, la loi du moment cinétique et la loi de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.</li> </ul>
Actions de contact dans un fluide en mouvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utiliser la relation <math>\vec{dF} = -p \vec{dS}</math>.</li> </ul>
Bilans macroscopiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert et fixe ou sur un système fermé et mobile.</li> <li>– Utiliser un bilan de masse.</li> </ul>
– Bilans de quantité de mouvement ou d'énergie cinétique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel à une entrée et une sortie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Associer un système fermé à un système ouvert pour faire un bilan.</li> <li>– Utiliser la loi de la quantité de mouvement et la loi de l'énergie cinétique pour exploiter un bilan.</li> <li>– Exploiter la nullité (admise) de la puissance des forces intérieures dans un écoulement parfait et incompressible.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**La fusée à eau**  
Enoncé

niveau confirmé

## Les fusées à eau

Extraits de l'article du Bulletin de l'Union des Physiciens n°732 vol. 85 mars 1991 pp. 512-532  
«*La fusée à eau*» par J.P. SOULARD

### Une fusée qui se propulse... à l'eau

Réaliser une fusée de stabilité convenable tout au long de son vol peut se faire simplement. Deux bouteilles en plastique pour boisson gazeuse (genre Pepsi, Coca...) de 1,5 L, ou même 2 L, constituent le matériau de base à se procurer. L'une des deux est découpée pour fournir l'ogive et la jupe sur laquelle seront fixés trois ou quatre ailerons pour former la queue.

Au terme d'un éventuel compte à rebours (ça fait plus sérieux!) la libération du cran d'arrêt entraîne la décompression du bouchon et la pression à l'intérieur acquise par gonflage fait le reste : dégagement de la tuyère par la force pressante, éjection brutale de l'eau et mouvement de la fusée par réaction.

*Caractéristiques approximatives de la fusée :*

- *masse à vide avec ogive et queue* 100 g ;
- *diamètre du corps* : 8,5 cm ;
- *diamètre de la tuyère* : 2 cm ;
- *volume total du réservoir* : 1,5 L ;
- *hauteur* : 40 cm ;
- *pression supportable* : jusqu'à 40 bar.

On y met 0,5 L d'eau et on porte la pression de l'air intérieur à 6 bars.



Vérifier quantitativement que les conditions sont réunies pour que la fusée décolle.

---

**niveau expert**

---

## Les fusées à eau

Extraits de l'article du Bulletin de l'Union des Physiciens n°732 vol. 85 mars 1991 pp. 512-532  
«*La fusée à eau*» par J.P. SOULARD

### Une fusée qui se propulse... à l'eau

Réaliser une fusée de stabilité convenable tout au long de son vol peut se faire simplement. Deux bouteilles en plastique pour boisson gazeuse (genre Pepsi, Coca...) constituent le matériau de base à se procurer. L'une des deux est découpée pour fournir l'ogive et la jupe sur laquelle seront fixés trois ou quatre ailerons pour former la queue.

Au terme d'un éventuel compte à rebours (ça fait plus sérieux!) la libération du cran d'arrêt entraîne la décompression du bouchon et la pression à l'intérieur acquise par gonflage fait le reste : dégagement de la tuyère par la force pressante, éjection brutale de l'eau et mouvement de la fusée par réaction.

On porte la pression de l'air intérieur à 6 bars.



Vérifier quantitativement que les conditions sont réunies pour que la fusée décolle.

# Résolution de problème

## La fusée à eau

### Exemple de résolution

On choisit comme système ouvert le récipient. Pour qu'il soit fixe, on se place donc dans un référentiel (celui de la fusée) qui n'est pas galiléen mais en mouvement rectiligne accéléré, d'accélération par rapport au sol (galiléen) :  $\vec{\Gamma} = \Gamma \vec{u}_z$  (où  $\vec{u}_z$  est vers le haut).

Le volume d'eau est noté  $V$ ,  $\mu = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  est la masse volumique de l'eau,  $S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}$  est la section intérieure où  $d_i = 8,5 \text{ cm}$  est le diamètre du corps, tandis que la section extérieure est  $S_e = \frac{\pi d_e^2}{4}$  où  $d_e = 2 \text{ cm}$  est le diamètre de la tuyère.

Le débit massique est  $D_m = \iint_S \mu \cdot \vec{v} \cdot d^2 \vec{S}$  d'où  $D_m = \mu v_e S_e = \mu v_i S_i$  (1) avec les vitesses de l'eau à l'éjection ( $v_e$ ) et intérieure ( $v_i \ll v_e$  car  $S_i \gg S_e$ ).

Le système fermé (indicé  $f$ ) qui coïncide à l'instant  $t$  avec le système ouvert (indicé  $o$ ) a comme quantité de mouvement :

$$\vec{P}_f(t) = \vec{P}_o(t)$$

A un instant ultérieur, la quantité de mouvement du système fermé est devenue :

$$\vec{P}_f(t+dt) = \vec{P}_o(t+dt) + \delta m_s \vec{v}_s$$

On trouve donc :

$$\frac{D\vec{P}_f}{Dt} = \frac{d\vec{P}_o}{dt} + \frac{\delta m_s \vec{v}_s}{dt}$$

Or

- pour le système ouvert, le liquide est au repos dans le référentiel (si on considère l'écoulement comme quasi stationnaire), donc  $\frac{d\vec{P}_o}{dt} = \vec{0}$ ;
- $\frac{\delta m_s}{dt} \vec{v}_s = -D_m v_e \vec{u}_z$ , où  $D_m$  est le débit massique et  $v_e$  la norme de la vitesse d'éjection de l'eau dans le référentiel de la bouteille ;
- $\frac{D\vec{P}_f}{Dt} = \Sigma \vec{F}_{ext} = -\mu V g \vec{u}_z - \mu V \Gamma \vec{u}_z + P_e S_e \vec{u}_z - P_i S_i \vec{u}_z$ .

Soit, suivant  $\vec{u}_z$  :

$$\mu V \Gamma = -\mu V g + P_e S_e - P_i S_i + D_m v_e$$

La force de poussée est donc  $\vec{F} = D_m v_e \vec{u}_z$  (2) donc  $\vec{F} = \mu S_e v_e^2 \vec{u}_z$ . Reste à déterminer  $v_e$ .

Un bilan d'énergie cinétique donne :

$$\frac{DE_c}{Dt} = \frac{dE_c}{dt} + \frac{\delta m_s v_s^2}{dt}$$

car il n'y a pas de masse entrante. Or

- pour le système ouvert, le liquide est au repos dans le référentiel, donc  $\frac{dE_c}{dt} = 0$ ;
- $\frac{\delta m_s v_s^2}{dt} = D_m \frac{v_e^2}{2}$  ;
- $\frac{D\vec{P}_f}{Dt} = \Sigma P u_{ext} + \Sigma P u_{int}$  avec  $\Sigma P u_{int} = 0$  si on admet que l'écoulement est parfait et incompressible.

Aussi,  $D_m \frac{v_e^2}{2} = \Sigma P u_{ext} = P_i S_i v_i - P_e S_e v_e$ . Le débit donne :  $D_m \frac{v_e^2}{2} = \Sigma P u_{ext} = (P_i - P_e) \frac{D_m}{\mu}$  soit  $v_e^2 = \frac{2(P_i - P_e)}{\mu}$

(3) qu'on aurait pu trouver avec la relation de Bernoulli.

Ainsi, en combinant (1), (2) et (3), on trouve :

$$\vec{F} = \mu S_e v_e^2 \vec{u}_z = 2 S_e (P_i - P_e) \vec{u}_z$$

soit  $F = 2 \frac{\pi d_e^2}{4} (P_i - P_e) = \frac{\pi \times 0,02^2 \times 6 \times 10^5}{2} = 3,8 \times 10^2 \text{ N}$  qui est bien supérieure au poids de la bouteille :

$m g \approx 1 \times 10 = 10 \text{ N}$ . Ainsi, la fusée décolle.

NB : le fait que les travaux du poids et de la force d'inertie d'entraînement sont négligeables devant le travail des forces de pression peut constituer une validation des hypothèses au niveau expert.

**Résolution de problème**  
**La fusée à eau**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li><li>– Estimer le poids de la fusée. Pour la version "expert" :<ul style="list-style-type: none"><li>– Estimer les dimensions de la fusée (hauteur, diamètres caractéristiques, volume...).</li></ul></li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Définir un système ouvert adapté à l'étude.</li><li>– Dans quel référentiel se placer de sorte que le système ouvert soit fixe ? Ce référentiel est-il galiléen ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– En faisant coïncider un système fermé avec le système ouvert, faire un bilan de quantité de mouvement entre deux instants très proches.</li><li>– De même, faire un bilan d'énergie cinétique en prenant bien en compte le travail des forces de pression.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comment peut se réécrire le bilan de quantité de mouvement dans le référentiel terrestre ? Qu'appelle-t-on force de poussée ?</li><li>– Comparer la force de poussée au poids de la fusée.</li></ul>

**Résolution de problème**  
**La fusée à eau**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données du texte utiles sont relevées et nommées.</li><li>– Le poids de la fusée est estimé. <u>Pour la version "expert"</u> :<ul style="list-style-type: none"><li>– Les dimensions de la fusée sont estimées.</li></ul></li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Un système ouvert adapté à l'étude est défini.</li><li>– Le référentiel d'étude est choisi de sorte que le système ouvert soit fixe.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Un bilan de quantité de mouvement est effectué.</li><li>– Un bilan énergétique est effectué.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La force de poussée est extraite du bilan de quantité de mouvement.</li><li>– La valeur de la force de poussée est calculée et comparée au poids de la fusée.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Le glaçon qui coule

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur la cristallographie - programme de première année.

Cette résolution de problème propose aux étudiants d'expliquer pourquoi un glaçon de  $D_2O$  coule dans l'eau liquide alors qu'un glaçon de  $H_2O$  « flotte ». Deux voies de résolution sont proposées.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	1	2	1	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle du cristal parfait <ul style="list-style-type: none"> <li>– Description du cristal parfait : population, coordinence, compacité, masse volumique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie.</li> <li>– Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie.</li> </ul>
– Solides macrovalents et moléculaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les liaisons covalentes, les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène dans un cristal de structure donnée.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le glaçon qui coule**  
 Enoncé

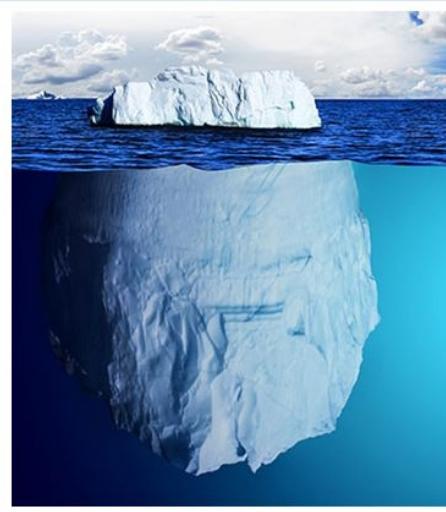
**niveau initiation**

Expliquer le phénomène observé sur la photographie 1.

(Source : <http://www.societechimiquedefrance.fr/produit-du-jour/eau-lourde.html>)

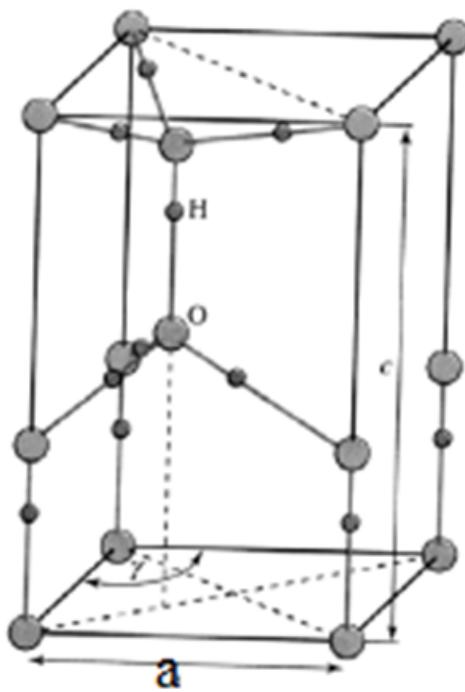


**Photographie 1**



**Photographie 2 : Iceberg dans de l'eau de mer.  
 (photomontage)**

On donne la structure de la glace ordinaire : la maille est un prisme à base losange.



$a = 452 \text{ pm}$ .

On donne la relation  $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}}$ .

L'étudiant pourra se référer à toute documentation qui lui semblera nécessaire.

**Résolution de problème**  
**Le glaçon qui coule**  
**Exemple de résolution**

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

- Système : glaçons de  $H_2O$  et  $D_2O$  dans le verre d'eau.
- Informations utiles dans les documents présentés :
  - D'après la photographie 1, le glaçon de  $D_2O$  coule alors que celui de  $H_2O$  flotte.
  - La structure de la glace fournie nous permettra de calculer la masse volumique de  $H_2O$  et de  $D_2O$ .
  - Le volume de la maille cristalline est donné.
  - La photographie de l'iceberg permet d'estimer la proportion de volume immergé dans l'eau.

Analyser	– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites. – Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. – Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. – Établir une stratégie de résolution.
----------	---

- Données supposées être connues :
  - $D$  est un des isotopes de l'hydrogène. Son écriture symbolique est  $^2H$ ,
  - la constante d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
  - les masses molaires atomiques de  $^1H$  et  $^2H$ .
- Hypothèses à faire :
  - L'eau lourde cristallise avec la même structure que  $H_2O$  et les mêmes paramètres de maille.
  - Même si la photographie de l'iceberg est réalisée dans l'eau de mer (donc de l'eau salée), il est possible, grâce à cette photographie, d'évaluer la proportion immergée de l'iceberg, et de le réinvestir dans le cadre du glaçon dans l'eau.
- La stratégie sera de calculer la masse volumique de  $D_2O$  solide et de la comparer à celle de  $H_2O$  liquide et de faire de même avec  $H_2O$  solide et  $H_2O$  liquide.
- Deux voies de résolution peuvent être adoptées :
  - un point de vue microscopique avec l'utilisation de la maille fournie. Des calculs de cristallographie seront alors réalisés.
  - un point de vue macroscopique, avec l'utilisation de l'équilibre mécanique du glaçon et de la poussée d'Archimède.

Réaliser	– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. – Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.
----------	--

Première voie de résolution :

- Population de la maille (il suffit de compter le nombre d'atomes d'oxygène pour connaître le nombre de molécules d'eau) :  $Z(H_2O) = 8 \times \frac{1}{8} + 4 \times \frac{1}{4} + 2 \times 1 = 4$  molécules d'eau. On peut le vérifier en comptant le nombre d'atomes d'hydrogène :  $Z(H) = 4 \times \frac{1}{4} + 7 \times 1 = 8$  atomes d'hydrogène.
- Volume de la maille : on trouve  $V = a^3 \sqrt{2}$  avec la relation  $c/a$  donnée.
- Expression de la masse volumique de  $H_2O$  et  $D_2O$  :

$$\rho(X_2O) = \frac{m_{\text{maille}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{Z(X_2O) M(X_2O)}{N_a a^3 \sqrt{2}}$$

Applications numériques :

$$\rho(H_2O_{\text{solide}}) = \frac{4 \times 18 \times 10^{-3}}{6,02 \times 10^{23} \times (452 \times 10^{-12})^3 \times \sqrt{2}} = 915,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho(D_2O_{\text{solide}}) = \frac{4 \times 20 \times 10^{-3}}{6,02 \times 10^{23} \times (452 \times 10^{-12})^3 \times \sqrt{2}} = 1018 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

On a donc  $\rho(D_2O_{\text{solide}}) > \rho(H_2O_{\text{liquide}}) > \rho(H_2O_{\text{solide}})$ . Il est normal que le glaçon de  $D_2O$  soit au fond du verre contrairement au glaçon de  $H_2O$  qui est en partie émergé.

Deuxième voie de résolution :

Le glaçon de  $H_2O$  flotte à la surface de l'eau liquide : l'équilibre est obtenu lorsque le poids et la poussée

d'Archimède se compensent exactement.

On peut écrire :  $\rho(H_2O_{liquide}) V_{immersion} g = \rho(H_2O_{solide}) V_{total} g$ .

Soit :  $\frac{V_{immersion}}{V_{total}} = \frac{\rho(H_2O_{solide})}{\rho(H_2O_{liquide})}$ .

Sur la photographie 2, représentant un iceberg, on peut estimer que 10% du volume total est émergé (c'est un ordre de grandeur que les élèves devraient connaître).

On a alors :  $0,9 = \frac{\rho(H_2O_{solide})}{\rho(H_2O_{liquide})}$ .

On en déduit que :  $\rho(H_2O_{solide}) = 0,9 \rho(H_2O_{liquide}) = 0,9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

En ce qui concerne  $D_2O$  solide, sa masse molaire est augmentée de  $2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  par rapport aux  $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  de  $H_2O$  solide, donc on peut en déduire qu'à volume constant, sa masse est plus grande.

On a alors la valeur  $\rho(D_2O_{solide}) = \frac{20}{18} \rho(H_2O_{solide}) = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

On trouve alors que le glaçon de  $D_2O$  a la même masse volumique que l'eau liquide... Il est alors possible de discuter sur le fait que cette approche n'est pas la meilleure. En effet, la photographie représente un iceberg dans l'eau de mer, soit de l'eau salée !

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

Le résultat montrant que le glaçon de  $H_2O$  flotte est cohérent avec ce que l'étudiant connaît et avec la photographie 2.

De plus, le nom « eau lourde » semble valider le résultat qui dit que le glaçon de  $D_2O$  se trouve au fond du verre.

Un regard plus critique peut être amené sur la voie de résolution 2 car :

- la méthode d'évaluation du volume immergé est plus approximative
- la photographie 2 montre un « glaçon » (iceberg) dans de l'eau salée et non dans de l'eau pure.

L'étudiant peut exercer son esprit critique en remarquant que les mêmes paramètres de maille ont été considérés pour  $D_2O$  solide et pour  $H_2O$  solide alors que le rayon atomique de  $D$  est vraisemblablement plus grand que celui de  $H$  : les paramètres de maille de l'eau deutérée sont sans doute plus grands que ceux de l'eau non deutérée.

Résolution de problème  
**Le glaçon qui coule**  
 Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel est le système étudié ?</li> <li>– Quelles sont les informations utiles dans les documents présentés ?</li> <li>– Quelles sont les grandeurs physiques pertinentes à introduire ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelles sont les grandeurs physiques utiles dont les valeurs ne sont pas données mais qui peuvent être évaluées ?</li> <li>– Quelle est la grandeur à calculer et à comparer pour l'eau liquide, l'eau solide et <math>D_2O</math> solide ?</li> <li>– Vers quelle voie de résolution nous oriente chacune des deux photographies ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est le nombre de molécules d'eau dans une maille (voie de résolution 1) ?</li> <li>– Comment écrire l'équilibre mécanique du glaçon (voie de résolution 2) ?</li> <li>– Quelle est la masse volumique de <math>H_2O</math>? celle de <math>D_2O</math> ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le résultat est-il en accord avec vos observations dans la vie courante ?</li> <li>– Quel regard critique peut-on poser sur le raisonnement mené ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Le glaçon qui coule**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Il est remarqué que le glaçon de <math>D_2O</math> coule alors que celui de <math>H_2O</math> reste en surface.</li> <li>– La maille de la glace et le volume de cette maille sont identifiés comme des informations importantes</li> <li>– La photographie 2 apporte une information sur le volume immergé d'un glaçon dans l'eau.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les hypothèses nécessaires à la résolution sont faites : par exemple, que l'eau lourde cristallise dans la même structure que <math>H_2O</math> (voie de résolution 1) ou que le volume immergé d'un iceberg dans de l'eau salée est similaire à celle d'un glaçon dans de l'eau non salée (voie de résolution 2).</li> <li>– Il est compris que c'est la masse volumique de chaque composé qu'il faudra calculer (méthode de résolution 1) ou que la poussée d'Archimète peut être utilisée (voie de résolution 2).</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les masses volumiques sont exprimées.</li> <li>– Le calcul est mené à son terme pour comparer les deux masses volumiques.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les masses volumiques calculées sont comparées à celle de l'eau liquide.</li> <li>– La cohérence du résultat est vérifiée.</li> <li>– Un regard critique est apporté sur les approximations réalisées, notamment pour la voie de résolution 2.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La composition d'un gong

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les diagrammes potentiel - pH - programme de première année. Le document proposé demande aux élèves d'utiliser des diagrammes potentiel-pH pour déterminer la teneur en étain du bronze constituant les gongs.

La première version fournit aux élèves les diagrammes E-pH complets ainsi qu'une classification périodique.

La deuxième version est rendue plus difficile car aucun diagramme n'est fourni. Cela rend plus difficile l'étape d'analyse.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	2	2	2
niveau "confirmé"	1	4	2	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Diagrammes potentiel-pH et réactions redox	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Principe de construction d'un diagramme potentiel-pH.</li> <li>– Lecture et utilisation des diagrammes potentiel-pH et potentiel-pL.</li> <li>– Attribuer les différents domaines d'un diagramme fourni à des espèces données.</li> <li>– Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes.</li> <li>– Discuter de la stabilité des espèces dans l'eau.</li> <li>– Prévoir la stabilité d'un état d'oxydation en fonction du pL ou du pH du milieu.</li> <li>– Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réactions d'oxydoréduction</li> <li>– Aspect thermodynamique.</li> <li>– Dismutation et médiamutation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction.</li> <li>– Pratiquer une démarche expérimentale mettant en jeu des réactions d'oxydo-réduction.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**La composition d'un gong**  
 Enoncé

**niveau initiation**

**Problématique :**

Le gong désigne une variété d'instruments de musique de percussion en métal, originaires de l'Asie du Sud-Est. Sa sonorité est, entre autres, liée au matériau utilisé pour sa fabrication : le bronze, alliage de cuivre et d'étain. Cette sonorité dépend du pourcentage d'étain constituant le bronze.



Pour analyser le bronze d'un gong, on plonge un échantillon de 3,00 g d'un gong dans un demi-litre d'acide chlorhydrique de concentration décimolaire. Un gaz se dégage. Son volume est mesuré grâce à un tube à dégagement introduit dans une éprouvette graduée remplie d'eau. En fin d'expérience le volume de gaz dégagé est de 153 mL.

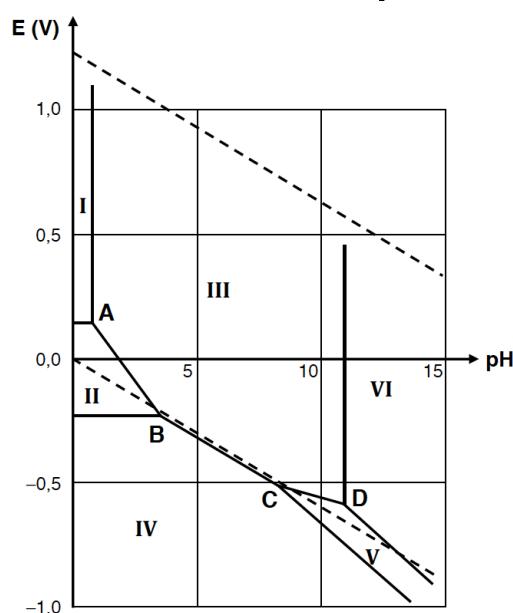
**Quel est le pourcentage massique d'étain constituant le gong ?**

**Quelques diagrammes E-pH :**

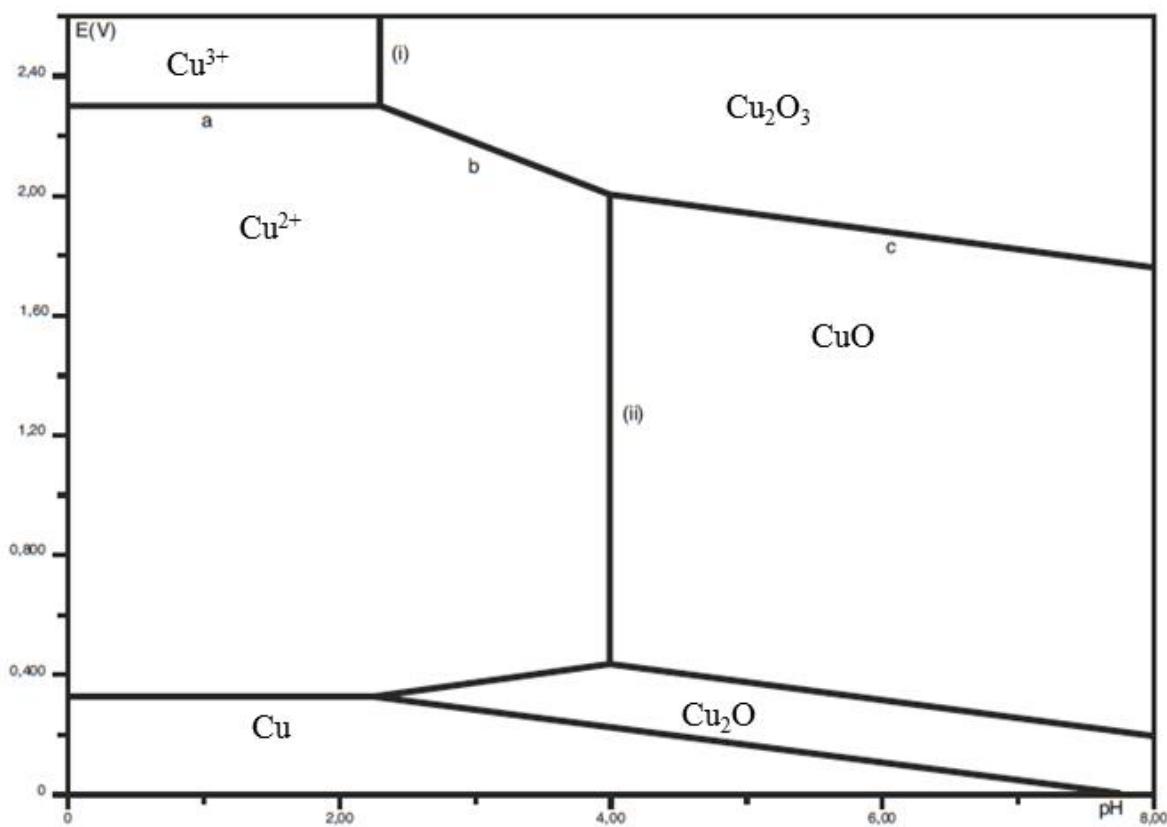
□ Diagramme E-pH de l'étain : Il fait intervenir les espèces  $\text{SnO}_2(s)$ ,  $\text{Sn}_{(s)}$ ,  $\text{Sn}_{(aq)}^{2+}$ ,  $\text{Sn}_{(aq)}^{4+}$ ,  $\text{SnO}_3^{2-}_{(aq)}$  et  $\text{HSnO}_2^{-}_{(aq)}$ .

Espèce	$\text{Sn}_{(s)}$	$\text{Sn}^{2+}$	$\text{HSnO}_2^{-}$	$\text{Sn}^{4+}$	$\text{SnO}_2$	$\text{SnO}_3^{2-}$
Domaine	IV	II	V	I	III	VI

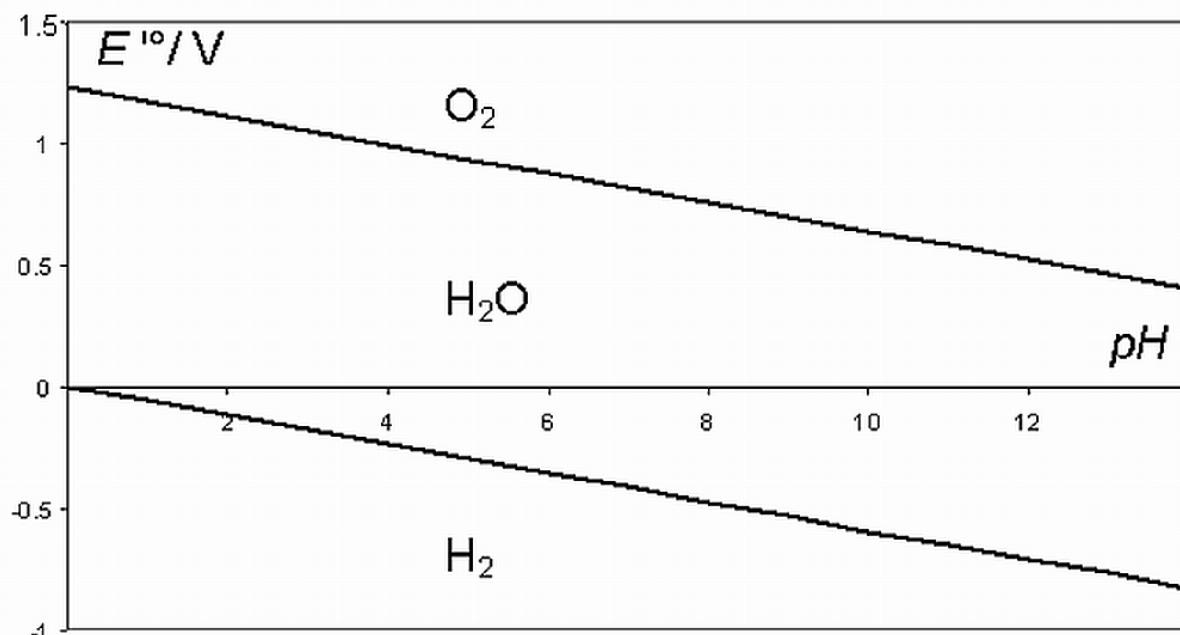
Le tracé a été effectué à 25°C pour une concentration totale en espèces dissoutes de  $1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .



□ Diagramme E-pH du cuivre : Il fait intervenir les espèces  $\text{Cu}_{(s)}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}_{(s)}$ ,  $\text{CuO}_{(s)}$ ,  $\text{Cu}^{2+}_{(aq)}$ ,  $\text{Cu}^{3+}_{(aq)}$  et  $\text{Cu}_2\text{O}_3{}_{(s)}$ . Le tracé a été effectué à 25°C pour une concentration totale en espèces dissoutes de 1 mol/L.



□ Diagramme E-pH de l'eau : Le tracé a été effectué à 25°C pour une pression totale en espèces gazeuses de 1 bar.



18 VIIA

## Classification périodique des éléments

1 IA

1	<b>H</b>	Hydrogène	2 II A
3	<b>Li</b>	Lithium	<b>Be</b>
2		Béryllium	
11	<b>Na</b>	Sodium	<b>Mg</b>
3		Magnésium	
19	<b>K</b>	Kalium	<b>Ca</b>
4		Scandium	<b>Sc</b>
37	<b>Rb</b>	Strontrium	<b>Sr</b>
5		Zirconium	<b>Y</b>
55	<b>Cs</b>	Barium	<b>Ta-Lu</b>
6			<b>La-Lu</b>
87	<b>Fr</b>	Radium	<b>Ra</b>
7		Françium	<b>Rf</b>

**z** masse  
**Symbol**  
Nom

1	<b>H</b>	Hydrogène	2 II A	3 III A	4 IV A	5 VA	6 VI A	7 VII A	8 VII B	9 VIII B	10 VIII B	11 I B	12 II B
3	<b>Li</b>	Lithium	<b>Be</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
2		Béryllium		Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Phosphore	Souffre	Chlore	Iode	Xénon
11	<b>Na</b>	Sodium	<b>Mg</b>	<b>Sc</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ge</b>	<b>Ga</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Sb</b>	<b>Antimoine</b>
3		Magnésium		Scandium	Chrome	Manganèse	Nickel	Germanium	Gallium	Asénic	Sélénium	Antimoine	Asénic
19	<b>K</b>	Kalium	<b>Ca</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Ge</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Te</b>	<b>Pb</b>	<b>At</b>
4		Scandium		Titanium	Vanadium	Cobalt	Nickel	Gallium	Inium	Étain	Tellure	Pb	Radon
37	<b>Rb</b>	Strontrium	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ru</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>Sn</b>	<b>Te</b>	<b>Bi</b>	<b>Atome</b>
5		Zirconium	<b>Y</b>	<b>Nb</b>	<b>Tc</b>	<b>Ruthérium</b>	<b>Palladium</b>	<b>Argent</b>	<b>Cadmium</b>	<b>Inium</b>	<b>Te</b>	<b>Po</b>	<b>Atome</b>
55	<b>Cs</b>	Barium	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>Atome</b>	<b>Atome</b>
6			<b>Ta-Lu</b>	<b>Ta</b>	<b>Rhenium</b>	<b>Osmium</b>	<b>Platine</b>	<b>Or</b>	<b>Mercure</b>	<b>Bismuth</b>	<b>Po</b>	<b>Atome</b>	<b>Atome</b>
87	<b>Fr</b>	Radium	<b>Rf</b>	<b>Dubnium</b>	<b>Sg</b>	<b>Bh</b>	<b>Mt</b>	<b>Ds</b>	<b>Rg</b>	<b>Uub</b>	<b>Uuo</b>	<b>Uuh</b>	<b>Uuo</b>
7		Françium	<b>Ac-Lr</b>	<b>Rutherfordium</b>	<b>Seaborgium</b>	<b>Bohrium</b>	<b>Hassium</b>	<b>Mēternium</b>	<b>Roentgenium</b>	<b>Ununquadium</b>	<b>Ununpentium</b>	<b>Ununhexium</b>	<b>Ununoctium</b>

57	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
6		Cénum	Praséodyme	Néodyme	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
89	<b>Ac</b>	<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lu</b>
7		Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendéléium	Nobélium	Lawrencium

- Alcalins
- Alcalino terreux
- Métal
- Métalloïde
- Non-métal
- Halogène
- Gaz rares
- Lanthanide/Actinide
- Éléments synthétiques

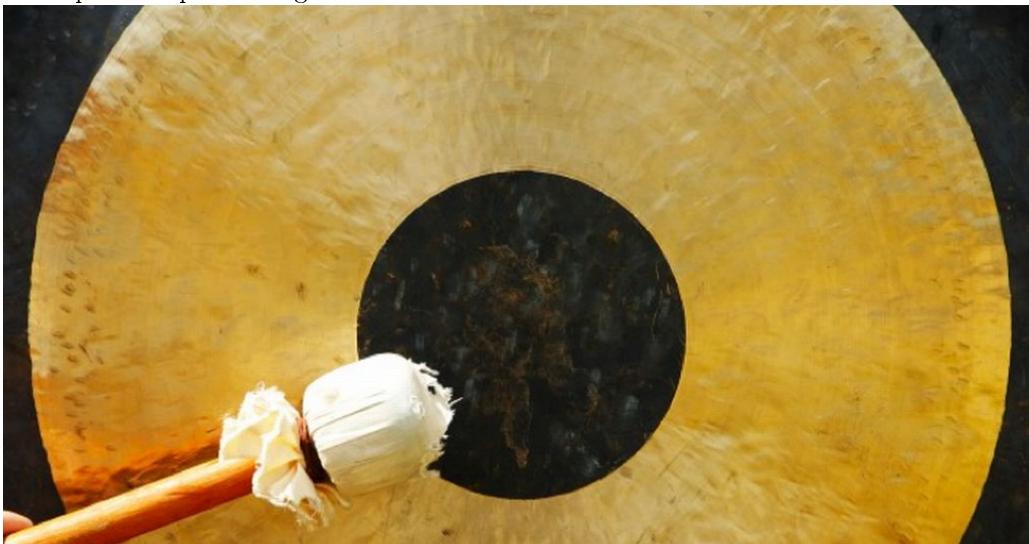
— Règle de Sanderson

---

### niveau confirmé

**Problématique :**

Le gong désigne une variété d'instruments de musique de percussion en métal, originaires de l'Asie du Sud-Est. Sa sonorité est, entre autres, liée au matériau utilisé pour sa fabrication : le bronze, alliage de cuivre et d'étain. Cette sonorité dépend du pourcentage d'étain constituant le bronze.



Pour analyser le bronze d'un gong, on plonge un échantillon de 3,00 g d'un gong dans un demi-litre d'acide chlorhydrique de concentration décimolaire. Un gaz se dégage. Son volume est mesuré grâce à un tube à dégagement introduit dans une éprouvette graduée remplie d'eau. En fin d'expérience le volume de gaz dégagé est de 153 mL.

**Quel est le pourcentage massique d'étain du bronze constituant le gong ?**

L'étudiant pourra se référer à toute documentation qui lui semble nécessaire.

**Résolution de problème**  
**La composition d'un gong**  
**Exemple de résolution**

S'approprier le problème.	– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.
---------------------------	--

- Système : échantillon de bronze de masse  $m = 3,00 \text{ g}$ .
- Informations utiles dans les documents présentés :
- L'expérience décrite, notamment le volume de gaz dégagé, qui va permettre de déterminer le pourcentage massique d'étain.  
Version "initiation" :
  - les diagrammes E-pH vont permettre d'identifier les réactions chimiques modélisant la transformation chimique qui a lieu dans l'expérience.

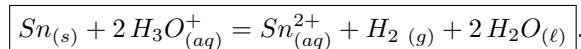
Analyser	– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites. – Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. – Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. – Établir une stratégie de résolution.
----------	---

Version "confirmé" : Les diagrammes du cuivre, de l'étain et de l'eau doivent être recherchés par l'étudiant.

- Transformation(s) chimique(s) ayant lieu lors de l'expérience décrite :

D'après les diagrammes E-pH, quand on leur superpose celui de l'eau, on se rend compte que :

- Si on introduit un morceau de cuivre  $\text{Cu}_{(s)}$  dans une solution aqueuse d'acide chlorhydrique ; on n'observe aucune transformation chimique. Le cuivre  $\text{Cu}_{(s)}$  est stable dans l'eau en milieu acide.
- Si on introduit un morceau d'étain  $\text{Sn}_{(s)}$  dans une solution aqueuse d'acide chlorhydrique ; il se forme des ions  $\text{Sn}^{2+}_{(aq)}$  et du dihydrogène gazeux.



Vu que les domaines de prédominance et d'existence sont disjoints, on pourra considérer cette réaction comme totale.

À noter que l'étudiant peut privilégier l'exploitation directe d'une échelle de potentiels standard des couples  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$ ,  $\text{H}^+/\text{H}_2$  et  $\text{Sn}^{2+}/\text{Sn}$  compte tenu du milieu acide.

On en déduit que le gaz dégagé quand on plonge l'échantillon de bronze est du dihydrogène.

Il faudra faire un tableau d'avancement et un bilan de matière pour déterminer le pourcentage massique d'étain dans le bronze.

- Hypothèses et données supposées être connues

- Volume molaire environ  $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Réaliser	– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. – Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.
----------	--

- Quantité de matière de dihydrogène dégagé :

$$n(\text{H}_2) = \frac{V}{V_m} = \frac{0,153}{24} = 6,38 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- Quantité de matière initiale d'ion  $\text{H}_3\text{O}^+$  :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = CV = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Quantité en mol	$\text{Sn}_{(s)}$	$\text{H}_3\text{O}^+$	$\text{Sn}^{2+}$	$\text{H}_2(g)$	$\text{H}_2\text{O}$
$t = 0$	$n_0$	0,05	0	0	solvant
$t$	$n_0 - \xi$	$0,05 - 2\xi$	$\xi$	$\xi$	solvant
$t_{final}$	$\varepsilon$		$6,38 \times 10^{-3}$	$6,38 \times 10^{-3}$	solvant

On en déduit que l'avancement final est de  $6,38 \times 10^{-3}$  mol. La réaction étant quantitative, on en déduit que c'est la quantité d'étain contenue dans l'échantillon de bronze étudié.

La masse d'étain dans le bronze étudié est donc de :  $m(\text{Sn}) = \xi_f M_{\text{Sn}} = 0,76 \text{ g}$ .

Le pourcentage d'étain dans le bronze est donc de :  $25\%$ .

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li><li>- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li></ul>
----------------	---

Il est possible de calculer la constante d'équilibre de la réaction grâce aux potentiels standard afin de vérifier que celle-ci est quantitative.

Les élèves peuvent aussi remarquer que le bronze constituant les gongs est particulièrement riche en étain, les bronzes classiques comportant entre 3 et 20 % d'étain.

Résolution de problème  
**La composition d'un gong**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quel est le système étudié ?</li><li>- Quelles sont les informations utiles dans les documents proposés ?</li><li>- Quelles sont les grandeurs physiques pertinentes à introduire ?</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quelle est la transformation chimique mise en jeu ?</li><li>- Peut-on considérer cette réaction comme quantitative ?</li><li>- Quelles sont les grandeurs physiques utiles dont les valeurs ne sont pas données mais que je peux évaluer ?</li></ul> <p><u>Version "confirmé"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Quels sont les diagrammes et /ou les données qui pourraient m'être utiles ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quelle est la quantité initiale d'ions hydronium ?</li><li>- Quelle est la quantité de dihydrogène dégagée ?</li><li>- Quel est l'avancement final ?</li><li>- Quel est le pourcentage massique d'étain dans le bronze ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>- Le résultat paraît-il cohérent ?</li><li>- Quelle grandeur peut-on calculer pour vérifier que la réaction est quantitative ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**La composition d'un gong**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La nature du gaz dégagé et les informations du texte sont considérées comme importantes.</li> </ul> <p><u>Version "initiation"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les diagrammes E-pH sont considérés comme une information importante pour comprendre les transformations chimiques mises en jeu et la nature du gaz dégagé.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La transformation chimique qui a lieu est analysée et le gaz dégagé identifié.</li> <li>– Les hypothèses nécessaires à la résolution sont faites.</li> </ul> <p><u>Version "confirmé"</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Chercher les diagrammes E-pH utiles dans les tables.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La quantité initiale d'ions <math>\text{H}_3\text{O}^+</math> et la quantité de dihydrogène dégagée sont exprimées puis calculées.</li> <li>– Le tableau d'avancement est réalisé, l'avancement final est calculé.</li> <li>– Le calcul est mené à son terme pour connaître le pourcentage massique d'étain dans le bronze.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La cohérence du résultat est vérifiée.</li> <li>– Un regard critique est apporté sur les approximations réalisées.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le haut parleur (expérimental)

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème expérimentale sur la caractéristique d'un dipôle électrocinétique - programme de première année PCSI.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	1	3	2	4	2

## Cadre du programme officiel : Programme de première année de la filière PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Circuits électriques dans l'ARQS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utiliser les relations entre l'intensité et la tension.</li> <li>– Citer des ordres de grandeur des composants R, L et C.</li> </ul>
– Résistances de sortie, résistances d'entrée.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Étudier l'influence des ces résistances sur le signal délivré par un GBF, sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.</li> </ul>
– Caractéristique d'un dipôle. Point de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Étudier la caractéristique d'un dipôle pouvant être éventuellement non linéaire.</li> </ul>
Oscillateurs amortis	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir et connaître l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine en régime harmonique.</li> </ul>
– Régime sinusoïdal forcé, impédances complexes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.</li> </ul>
– Associations de deux impédances.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mettre en œuvre un dispositif expérimental autour du phénomène de résonance.</li> </ul>
– Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir et connaître l'expression de la résultante des forces extérieures de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire.</li> </ul>
Actions d'un champ magnétique	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Expliquer le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique dans la configuration simplifiée des rails de Laplace.</li> </ul>
Résultante et puissance des forces de Laplace s'exerçant sur une barre conductrice en translation rectiligne sur deux barres parallèles (rails de Laplace) dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal à la barre.	
Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	
– Haut-parleur électrodynamique.	

## Mesures et capacités expérimentales

Nature et méthodes	Capacités exigibles
<p>Électricité</p> <p>Mesurer une tension :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– mesure directe au voltmètre numérique ou à l'oscilloscope numérique.</li> </ul> <p>Mesurer un courant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– mesure directe à l'ampèremètre numérique</li> <li>– mesure indirecte à l'oscilloscope aux bornes d'une résistance adaptée.</li> </ul> <p>Mesurer une résistance ou une impédance :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– mesure directe à l'ohmmètre/capacimètre</li> <li>– mesure indirecte à l'oscilloscope ou au voltmètre sur un diviseur de tension.</li> </ul> <p>Caractériser un dipôle quelconque.</p>	<p>Capacités communes à l'ensemble des mesures électriques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Expliquer le lien entre résolution, calibre, nombre de points de mesure</li> <li>– Préciser la perturbation induite par l'appareil de mesure sur le montage et ses limites (bande passante, résistance d'entrée)</li> <li>– Définir la nature de la mesure effectuée (valeur efficace, valeur moyenne, amplitude, valeur crête à crête,...).</li> </ul> <p>Visualiser la caractéristique d'un capteur à l'aide d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition.</p>

### Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

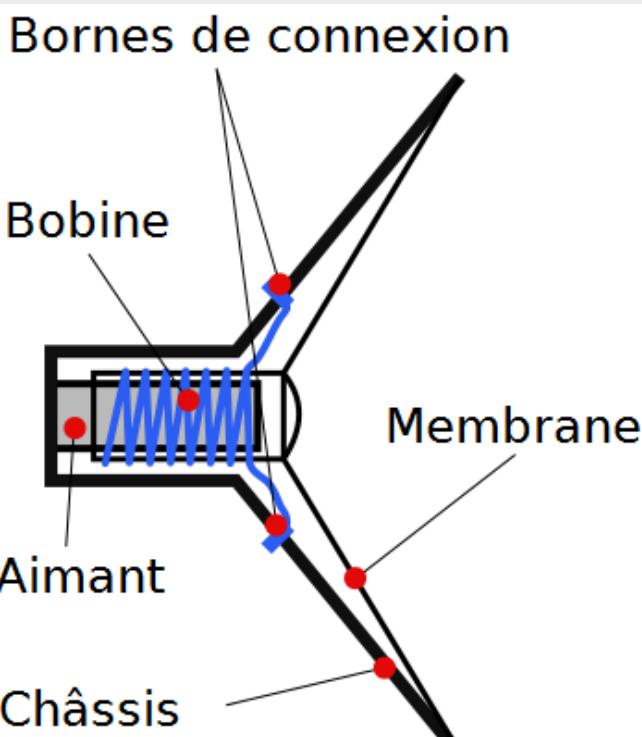
Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le haut parleur (expérimental)**  
 Enoncé

## Présentation du haut-parleur électrodynamique

*issu de l'article wikipedia sur le haut-parleur*



### Haut-parleurs

Un haut-parleur ou hautparleur est un transducteur électroacoustique destiné à produire des sons à partir d'un signal électrique. Il est en cela l'inverse du microphone.

Il existe de nombreux types de haut-parleurs :

- électrodynamique
- électrostatique,
- piézoélectrique

qui représentent les technologies actuelles les plus courantes. Le haut-parleur électrodynamique, couvrant environ 99 % du marché, a aujourd'hui encore un fonctionnement relativement simple pour une technologie de masse.

### Principe de fonctionnement

Le haut-parleur électrodynamique fonctionne selon le principe suivant :

- Un moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ;
- ce moteur transmet cette énergie mécanique à la membrane ;
- la membrane transmet l'énergie mécanique à l'air ambiant - d'où le son.
- la membrane est libre de mouvement car elle est dirigée dans l'axe de l'entrefer par la suspension.

### niveau confirmé

Proposer un schéma électrique qui modélise de manière satisfaisante le comportement électrique du haut-parleur mis à votre disposition (on utilisera des résistances, condensateurs et bobines).

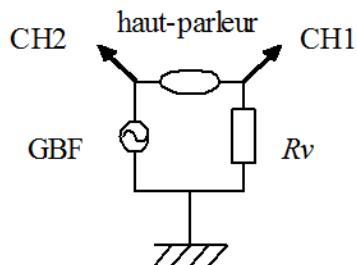
On répondra, en explicitant le protocole adopté et en fournissant un graphique sur lequel figureront les points expérimentaux (si possible avec une représentation des incertitudes) et une courbe de modélisation. On donnera les valeurs des paramètres de cette modélisation.

#### Matériel à disposition :

- un haut parleur électrodynamique à étudier
- un générateur basse fréquence à masse flottante
- une boîte de résistances à décades (de  $1 \Omega$  à  $11 \text{ k}\Omega$ )
- un oscilloscope numérique
- divers fils électriques et connexions
- un ordinateur avec tableur et carte d'acquisition

Résolution de problème  
**Le haut parleur (expérimental)**  
 Exemple de résolution

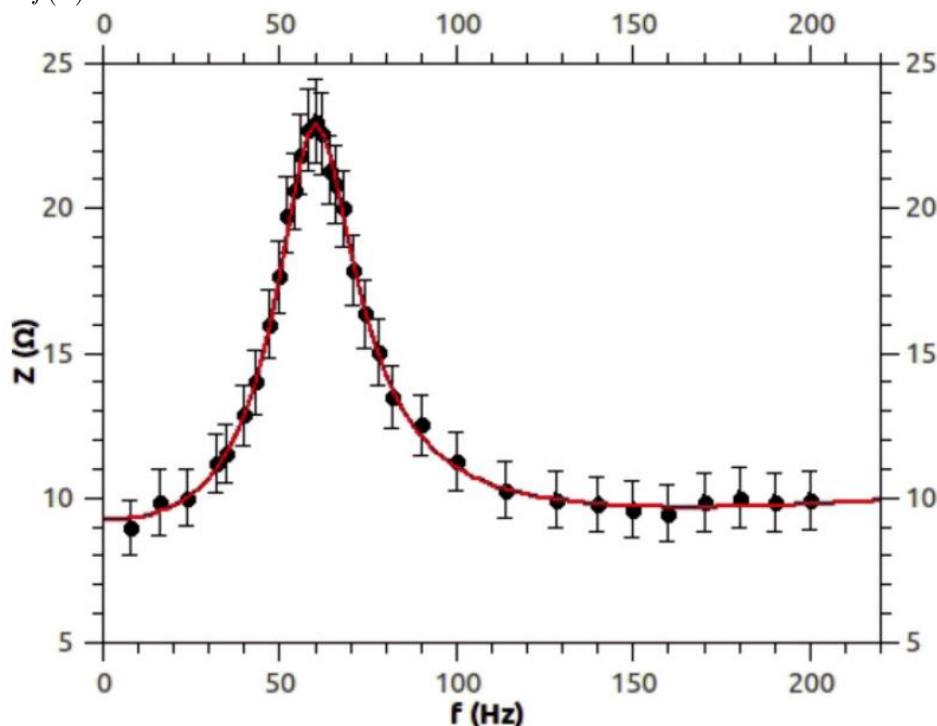
On peut, par exemple, utiliser le montage suivant en régime sinusoïdal forcé de pulsation  $\omega$  :



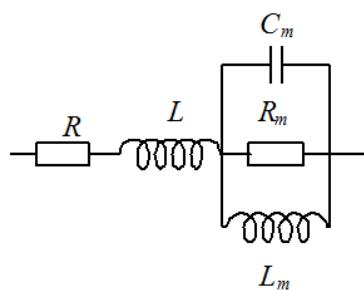
Sur la voie 1 d'un oscilloscope numérique, on visualise la tension  $u_1(t)$  et on mesure la tension pic-à-pic  $U_1$ , dont on déduit l'intensité  $I$  pic à pic qui parcourt le haut-parleur par  $I = \frac{U_1}{R_v}$ .

Sur la voie 2, on visualise la tension  $u_2(t)$ . La possibilité offerte de visualiser  $u_3(t) = u_2(t) - u_1(t)$ , c'est-à-dire la tension aux bornes du haut-parleur, permet d'en mesurer sa tension  $U$  pic-à-pic.

On peut ainsi en déduire le module de l'impédance complexe du haut-parleur :  $|\tilde{Z}| = \frac{U}{I}$ . Le graphique suivant représente  $|\tilde{Z}| = f(\omega)$  :



où les résultats expérimentaux sont modélisés suivant le modèle :



avec  $R = 9,27 \Omega$ ,  $L = 3,35 \text{ mH}$ ,  $C_m = 95 \mu\text{F}$ ,  $L_m = 74 \text{ mH}$  et  $R_m = 13,6 \Omega$ .

Ces résultats expérimentaux sont issus de l'article "Détection interférométrique de mouvements" par François VANDENBROUCK et al., BUP n° 951 Vol. 107 - Février 2013, p. 1 –11.

Résolution de problème  
**Le haut parleur (expérimental)**  
 Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Un schéma équivalent du dipôle "haut-parleur" permet-il de déterminer l'expression de son impédance <math>\tilde{Z}</math> ?</li> <li>– De quel paramètre dépend <math>\tilde{Z}</math> ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment faire varier expérimentalement ce paramètre ?</li> <li>– Quelles mesures permettent de déduire <math>\tilde{Z}</math> ?</li> <li>– Quel montage faire pour avoir accès à ces mesures ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faire les mesures nécessaires à la détermination de l'impédance du haut-parleur en estimant les incertitudes sur celles-ci.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel serait le graphique de <math> \tilde{Z}  = f(\omega)</math> pour une résistance ?</li> <li>– Pour un condensateur ?</li> <li>– Pour une bobine ?</li> </ul>

Résolution de problème  
**Le haut parleur (expérimental)**  
Exemples d'indicateurs de réussite

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le haut-parleur est assimilé à un dipôle électrocinétique d'impédance inconnue.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Un protocole est choisi pour connaître l'impédance du haut-parleur.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le protocole est mis en œuvre.</li><li>– Les mesures nécessaires à la détermination de l'impédance du haut-parleur sont effectuées en estimant les incertitudes sur celles-ci.</li></ul>
Validier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Une modélisation des résultats expérimentaux cohérente est testée.</li><li>– Un schéma électrique équivalent est associé à la précédente modélisation.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les étapes du travail sont présentées de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensible.</li></ul>

# L'iceberg

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les transferts thermiques par conducto-convection et les changements d'état - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	3	2	1	2

## Cadre du programme officiel : première année PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Premier principe. Bilans d'énergie <ul style="list-style-type: none"> <li>– Premier principe de la thermodynamique : <math>\Delta U + \Delta E_c = Q + W</math>.</li> <li>– Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail <math>W</math> et transfert thermique <math>Q</math>.</li> <li>– Exploiter l'extensivité de lenthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.</li> </ul>

## Cadre du programme officiel : deuxième année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Diffusion thermique <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vecteur densité de flux thermique <math>\vec{j}_Q</math>.</li> <li>– Régimes stationnaires. Résistance thermique.</li> <li>– Équation de la diffusion thermique en l'absence de sources internes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exprimer le flux thermique à travers une surface en utilisant le vecteur <math>\vec{j}_Q</math>.</li> <li>– Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne.</li> <li>– Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique.</li> <li>– Exprimer une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel en géométrie cartésienne.</li> <li>– Utiliser des associations de résistances thermiques.</li> <li>– Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.</li> <li>– Utiliser la relation de Newton <math>\delta Q = h(T_s - T_a) dS dt</math> fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'iceberg**  
 Enoncé

## Le projet "icedream"

Extraits de la page web disponible à l'adresse "[www.3ds.com/fr/icedream/](http://www.3ds.com/fr/icedream/)"  
*firme Dassault*

### Remorquer un iceberg pour avoir de l'eau douce

Le projet icedream est l'idée de l'ingénieur français Georges Mougin qui développe et affine son concept révolutionnaire depuis plus de 40 ans : remorquer des icebergs et les exploiter pour produire de l'eau douce !

Les fondamentaux du projet pilote sont donc les suivants : un iceberg d'environ 10 millions de tonnes, un remorqueur qui met 140 jours à relier Terre-Neuve et les Iles Canaries.

#### Données :

Puissance thermique  $P_{th}$  échangée par un système à la température  $T$  en contact sur une surface  $S$  avec un fluide à la température  $T_{fluide}$  dans le modèle conducto-convectif de Newton :

$$P_{th} = h (T_{fluide} - T) S$$

avec

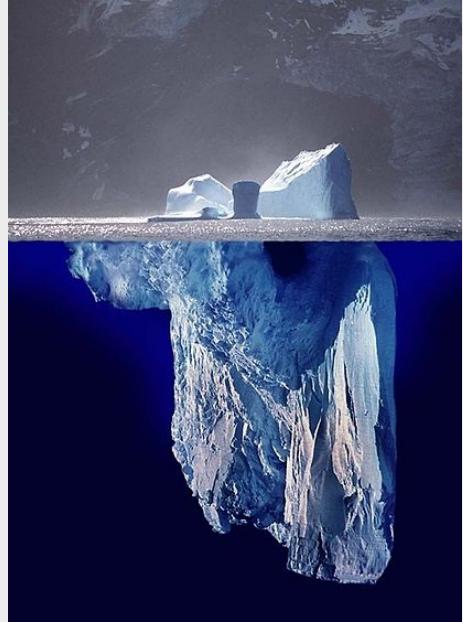
- le coefficient de transfert thermique de l'air :

$$h \approx 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- le coefficient de transfert thermique de l'eau :

$$h \approx 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Enthalpie de fusion de la glace :  $L_{fus} = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$



photomontage (Uwe Kils).

### niveau initiation

Estimer la proportion de l'iceberg qui fond par jour.

## Résolution de problème

# L'iceberg

### Exemple de résolution

On peut, par exemple, prendre un iceberg sphérique de rayon  $R$  tel que

$$\mu \frac{4}{3} \pi R^3 = m = 10^{10} \text{ kg}$$

avec  $\mu = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (la majeure partie est immergée), soit  $R \approx \left( \frac{3 \times 10^{10}}{4\pi \times 10^3} \right)^{\frac{1}{3}} = 134 \text{ m}$ .

On considère que les échanges thermiques se font avec l'eau de mer à  $T \approx 10^\circ C = 283 \text{ K}$  car  $h$  est beaucoup plus important avec l'eau.

La surface d'échange est donc :

$$S \approx 4\pi R^2$$

En supposant que cette surface d'échange ne change pas (alors que le glaçon fond...) un bilan énergétique donne :

$$\Delta m L_{fus} = h (T_{fluide} - T) S \Delta t$$

soit

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{3 h (T_{fluide} - T) 4\pi R^2 \Delta t}{4\mu\pi R^3 L_{fus}} = \frac{3 h (T_{fluide} - T) \Delta t}{\mu R L_{fus}} = \frac{3 \times 10^2 \times 10 \times 86400}{10^3 \times 134 \times 333 \times 10^3} = 0,5\%$$

Lors du trajet de 140 jours, une bonne partie de l'iceberg aura donc disparu, mais on peut espérer en conserver : on peut estimer grossièrement la quantité restante à  $(1 - 5 \times 10^{-3})^{140} \approx 50\%$ .

**Résolution de problème**  
**L'iceberg**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Modéliser l'iceberg et déterminer ses dimensions.</li><li>– Modéliser les échanges thermiques à la surface de l'iceberg.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Faire un bilan thermique et en déduire la variation de l'iceberg.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle serait la variation totale de l'iceberg pour le trajet ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**L'iceberg**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données utiles du problème sont relevées et nommées.</li><li>– La majeure partie de l'iceberg est immergée.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– La géométrie de l'iceberg est modélisée.</li><li>– Les échanges thermiques sont considérés à l'interface entre l'eau et l'iceberg.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Un bilan thermique est effectué pour en déduire la variation de l'iceberg.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La variation totale est estimée pour le trajet.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Le laser Lune

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur le faisceau d'un laser - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	2	3	2	2	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Ondes électromagnétiques dans le vide  – Aspects énergétiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relier le flux du vecteur de Poynting à un flux de photons en utilisant la relation d'Einstein-Planck.</li> <li>– Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens (laser hélium-néon, flux solaire, téléphonie,etc...) et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.</li> </ul>
Introduction à la physique du laser  – Rôle de la diffraction dans l'ouverture angulaire du faisceau à grande distance.  – Description simplifiée d'un faisceau de profil gaussien : longueur de Rayleigh $L_R$ .  – Utilisation d'une lentille pour transformer un faisceau cylindrique en faisceau conique et réciproquement.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relier l'ouverture angulaire <math>\lambda/a</math> et le rayon minimal <math>a</math>.</li> <li>– Utiliser l'expression fournie du profil radial d'intensité en fonction de la distance axiale.</li> <li>– Construire l'allure d'un faisceau de profil gaussien à partir de l'enveloppe d'un faisceau cylindrique de rayon <math>a</math> et d'un faisceau conique centré sur l'orifice de sortie du laser, et de demi-ouverture angulaire <math>\lambda/a</math>.</li> <li>– Exploiter la convergence angulaire du faisceau issue de l'optique géométrique, la loi du retour inverse, et le lien entre l'ouverture angulaire <math>\lambda/a</math> et le rayon minimal <math>a</math> pour obtenir la dimension et la position de la section minimale.</li> <li>– Montrer que le rayon minimal est de l'ordre de <math>\lambda</math>.</li> <li>– Utiliser un élargisseur de faisceau pour réduire l'ouverture angulaire.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

**Résolution de problème  
Le laser Lune  
Enoncé**

---

## L'expérience « laser-lune »

Extraits de l'expérience « laser-lune » (disponible en ligne : [culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml](http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml))

*par Marie-Christine Artru. - Centre de recherche d'astrophysique de Lyon, ENS Lyon*

### Déterminer la distance terre-lune et ses variations grâce à un laser

L'expérience « laser-lune » de l'Observatoire de La Côte d'Azur (OCA) a pour but la détermination précise de la distance terre-lune et de ses variations.

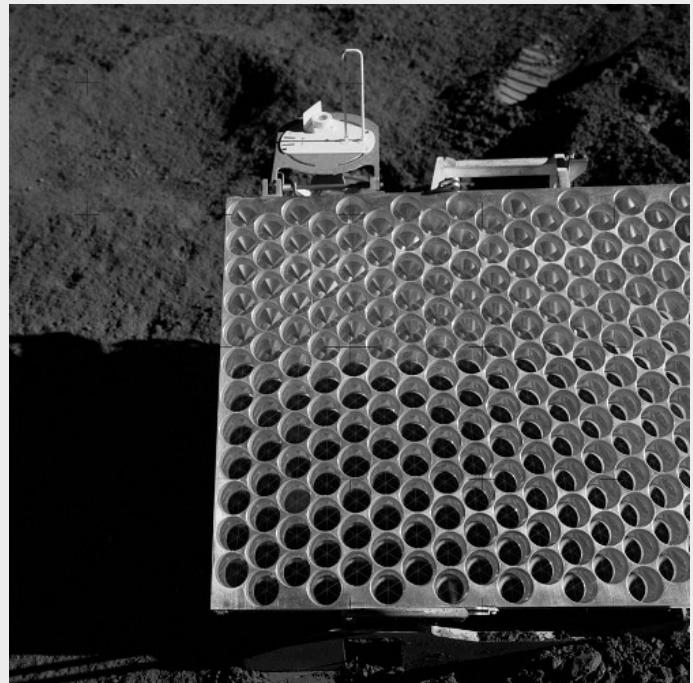
Le principe est la mesure de la durée d'aller-retour d'une impulsion laser émise du sol terrestre vers un réflecteur lunaire, soit  $\tau = 2,56$  s entre l'émission d'une impulsion et la réception du signal de retour correspondant. Actuellement, la distance terre-lune est déterminée au centimètre près, la précision atteinte sur la mesure de  $\tau$  étant de  $\delta\tau \approx 100$  ps.

Dans le cas du laser-lune la longueur d'onde est  $\lambda = 532$  nm (laser YAG-Nd doublé). Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est de 1,2 cm. Le laser émet une centaine d'impulsions en 10 s. Chaque impulsion du laser émet une énergie  $E = 0,3$  J sur une durée de 0,3  $\mu$ s (puissance-crête de 1 MW!).

Le réflecteur lunaire est un panneau composé d'une mosaïque d'éléments catadioptriques, de type « coins de cube ». La proportion moyenne des photons détectés après réflexion sur la lune est inférieure à 1 sur  $10^{19}$ .

à droite : réflecteur déposé sur la Lune par les astronautes de la mission Appolo XV. C'est le plus grand des réflecteurs déposés sur la lune (dimensions 1 m x 0,6 m).

Source : NASA, Appolo XV Map and Image Library, image n° AS15-85-11468



### niveau confirmé

Quel est le nombre de photons qui arrivent pour chaque impulsion sur le réflecteur posé sur la Lune ?

# Résolution de problème

## Le laser Lune

### Exemple de résolution

Ce qui suit est adapté de la page web [culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml](http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml)

Pour une impulsion, le nombre de photons émis par le laser est

$$N_{emis} = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} = 0,8 \times 10^{18}$$

C'est la géométrie du faisceau laser et sa perturbation par la turbulence atmosphérique qui cause la perte de rayonnement entre l'émission de l'impulsion laser et la réception du signal réfléchi.

Bien que très directif, un faisceau laser n'est jamais strictement parallèle. Les lasers fournissent en général des faisceaux « gaussiens », l'amplitude sur la section de sortie diminuant exponentiellement en fonction du carré de la distance à l'axe. Le faisceau du laser admet un petit angle d'ouverture  $\theta$  qui est dû au phénomène de diffraction et dont la valeur est inversement proportionnelle à la dimension transversale du faisceau. La petitesse de l'angle  $\theta$  caractérise la « cohérence spatiale » du faisceau. On a la relation usuelle  $\theta \approx \frac{\lambda}{d}$  où  $d$  est le diamètre du faisceau. Ici,

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d} \approx \frac{532 \times 10^{-9}}{1,2 \times 10^{-2}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

soit  $\theta \approx 10$  arcsec. Le faisceau laser passe par l'optique du télescope pour être dirigé vers la lune, ce qui élargit le faisceau laser et réduit son angle de divergence d'un facteur 5 environ. La prise en compte de l'effet de la turbulence, variable selon la qualité du ciel, détériore la cohérence et augmente la divergence d'un angle de l'ordre de 1 à 2 arcsec. En définitive la divergence effective du faisceau laser envoyé vers la lune est de 4 arcsec environ.

$D$  est égale à la distance terre-lune :

$$D = c \frac{\tau}{2} = 3 \times 10^8 \times \frac{2,56}{2} \approx 4 \times 10^8 \text{ m}$$

Le faisceau laser atteint la lune avec une section de diamètre

$$L_1 = D\theta \approx 7 \text{ km}$$

En fait, l'éclairement de la tache circulaire sur le sol lunaire a une structure irrégulière de type « speckle », due à la traversée de l'atmosphère terrestre.

La surface du réflecteur est  $S = 1 \times 0,6 = 0,6 \text{ m}^2$ . On évalue donc que la fraction de la lumière laser arrivant sur le réflecteur est dans le rapport des deux surfaces. Elle est donc égale à  $\frac{S}{\pi \frac{L_1^2}{4}} \approx 1,6 \times 10^{-8}$ .

Aussi, le nombre de photons qui arrivent en une seconde sur le réflecteur posé sur la Lune est

$$N_{arrives} = N_{emis} \frac{S}{\pi \frac{L_1^2}{4}} = \frac{E\lambda}{hc} \frac{S}{\pi \frac{L_1^2}{4}} \approx 10^{10}$$

On a

$$\frac{N_{emis}}{N_{arrives}} \approx \frac{10^{18}}{10^{10}} = 10^8$$

ce qui est cohérent avec le fait qu'après un aller retour "la proportion moyenne des photons détectés après réflexion sur la lune est inférieure à 1 sur 10<sup>19</sup>".

Résolution de problème  
**Le laser Lune**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le faisceau du laser est-il cylindrique ?</li><li>– Comment déterminer la distance Terre-Lune ?</li><li>– Quelle est l'énergie d'un photon ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quel est le rapport du nombre de photons récupérés par le miroir sur la Lune ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Si on suppose que le retour du faisceau du laser vers la Terre se fait avec le même rapport de photons récupérés, cela est-il cohérent avec les données du document ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**Le laser Lune**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données du texte sont relevées et nommées : puissance du laser, longueur d'onde, temps aller-retour de l'impulsion...</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'énergie lumineuse est reliée au nombre de photons grâce à la relation d'Einstein - Planck.</li><li>– Le faisceau du laser est modélisé par un cône d'ouverture angulaire connue.</li><li>– Le flux lumineux reçu par le miroir sur la Lune est relié au flux surfacique et à la surface du miroir.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les calculs sont menés à bout correctement.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le rapport du nombre de photons récupérés par le miroir est relié intelligemment à celui donné par le document.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Les lunettes 3D (expérimental)

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème expérimentale sur la polarisation des ondes électromagnétiques - programme de seconde année P.C.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	3	2	2	2

## Cadre du programme officiel : Programme de seconde année de la filière PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Ondes électromagnétiques dans le vide</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques homogènes : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne.</li> </ul> <p>Analyse d'une lumière totalement polarisée.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Utiliser une lame quart d'onde ou demi-onde pour modifier ou analyser un état de polarisation, avec de la lumière totalement polarisée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation d'une onde.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reconnaître une lumière non polarisée.</li> <li>– Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</li> </ul>

## Mesures et capacités expérimentales

Nature et méthodes	Capacités exigibles
<p>Optique</p> <p>Analyser une lumière complètement polarisée.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier de façon absolue l'axe d'un polariseur par une méthode mettant en <math>\frac{1}{2}</math>uvre la réflexion vitreuse</li> <li>– Identifier les lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde, sans distinction entre axe lent et rapide.</li> <li>– Modifier la direction d'une polarisation rectiligne.</li> <li>– Obtenir une polarisation circulaire à partir d'une polarisation rectiligne, sans prescription sur le sens de rotation.</li> <li>– Mesurer un pouvoir rotatoire naturel.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Les lunettes 3D (expérimental)**  
Enoncé

## Les lunettes pour le cinéma 3D

Extraits des articles "Image stéréoscopique" et "Lunettes stéréoscopiques"

Disponible sur le site «[wikipedia](#)»

Voir en trois dimensions

Une image stéréoscopique est réalisée par deux capteurs optiques prenant une même scène à partir de deux points de vue légèrement distants. Ces deux vues peuvent alors être présentées au spectateur de manière à ce que l'image de la caméra gauche soit vue uniquement par l'œil gauche, et l'image de la caméra droite par l'œil droit pour donner un effet de relief.

Les lunettes 3D servent essentiellement à l'observation des images stéréoscopiques projetées en lumière polarisée sur un écran métallisé. Chaque œil reçoit l'image qui lui est destinée grâce à un système stéréoscopique. La lumière destinée à l'autre œil ne traverse pas le filtre polarisant des lunettes, car son orientation ne la laisse pas passer.



### niveau initiation

Comment « fonctionnent » les lunettes 3D ? On répondra de façon écrite, en explicitant le(s) protocole(s) adopté(s) et les résultats des expériences, aux questions suivantes :

- 1) Quelles sont les polarisations des lumières issues de chacune des deux images projetées sur un écran de cinéma 3D ?
- 2) De quels éléments sont constitués chacun des deux verres de la lunette 3D ?
- 3) Pourquoi un verre de la lunette 3D laisse passer la lumière issue d'une des deux images projetées mais pas l'autre ?

**Matériel à disposition :**

- 1 paire de lunettes 3D
- 1 lampe à vapeur de sodium
- 1 diaphragme
- 1 condenseur
- 1 lentille convergente de courte focale
- 1 écran
- 1 lame quart d'onde
- 1 lame demi onde
- 2 polariseurs

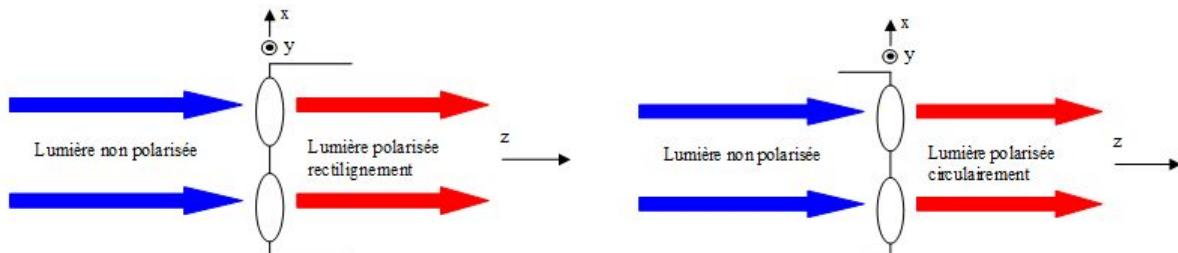
# Résolution de problème

## Les lunettes 3D (expérimental)

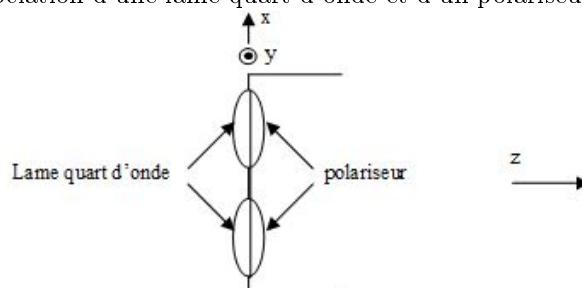
### Exemple de résolution

L'étude de la lumière polarisée par passage dans les verres de la lunette 3D dans un premier sens montre que ces verres contiennent un polariseur rectiligne placé à  $45^\circ$  par rapport à  $x$  et  $y$  pour un verre, un polariseur placé à  $-45^\circ$  par rapport à  $x$  et  $y$  pour l'autre verre.

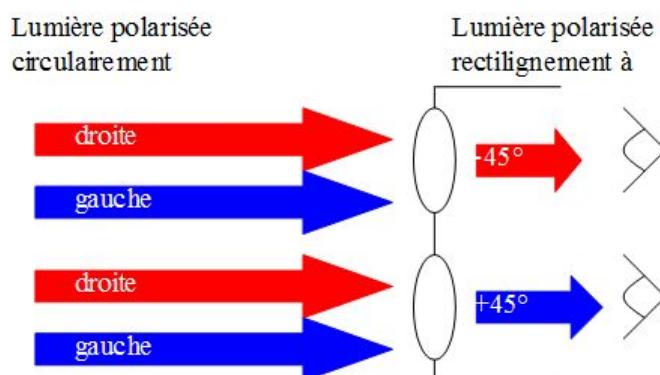
L'étude de la lumière polarisée par passage dans les verres de la lunette 3D dans l'autre sens montre que ces verres contiennent une lame quart d'onde associé au polariseur rectiligne dont les axes neutres sont suivant  $x$  et  $y$ .



Ainsi, les verres sont l'association d'une lame quart d'onde et d'un polariseur :



On peut vérifier qu'une onde polarisée circulairement gauche passe à travers un verre de la lunette 3D mais pas à travers l'autre verre, et réciproquement pour une onde polarisée circulairement droite :



NB : l'intervention de polarisations circulaires est satisfaisant pour le spectateur car les lunettes fonctionnent quelle que soit l'orientation de la tête du spectateur, contrairement au cas de deux polarisations rectilignes orthogonales.

Résolution de problème  
**Les lunettes 3D (expérimental)**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Faire un schéma optique où apparaîtront : les lumières issues des deux images et la lunette 3D avec ses deux verres.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– On peut proposer comme protocole l'étude de la polarisation de la lumière de la lampe à vapeur de sodium une fois traversé un verre de la lunette 3D dans un sens puis dans l'autre sens.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comment analyser la polarisation d'une lumière ?</li><li>– Comment est créée une lumière polarisée rectilignement ?</li><li>– Comment est créée une lumière polarisée circulairement ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Créer une lumière de polarisation idoine, et vérifier qu'elle est arrêtée par un verre de la lunette 3D mais pas par l'autre verre.</li></ul>

Résolution de problème  
**Les lunettes 3D (expérimental)**  
Exemples d'indicateurs de réussite

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'effet de la lunette 3D sur les lumières issues des deux images est schématisé.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Des hypothèses sont formulées.</li><li>– Une stratégie pour répondre à la problématique est proposée.</li><li>– Un protocole pertinent est choisi.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le protocole est mis en œuvre.</li><li>– Les différentes polarisations inconnues sont déduites des observations.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les verres de la lunette 3D sont modélisés.</li><li>– Les polarisations des lumières issues des deux images sont définies.</li><li>– Le fonctionnement de la lunette 3D est vérifié avec des lumières polarisées circulairement.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les étapes du travail sont présentées de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensible.</li></ul>

# Le microscope

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sans données sur la diffraction et la limite de résolution de l'oeil - programme de première année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	1	2	2
niveau "confirmé"	2	3	1	2	2
niveau "expert"	2	4	2	3	2

## Cadre du programme officiel : première année PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Propagation d'un signal – Diffraction à l'infini.  Optique géométrique – L'oeil.	– Utiliser la relation $\sin \frac{\lambda}{d}$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture.  – Connaître les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

**Résolution de problème**  
**Le microscope**  
**Enoncé**

---




---

**niveau initiation**

En ne prenant en compte que les limitations dues à la diffraction dans le microscope, quelle est la taille du plus petit objet discernable avec un tel microscope ?

---

**niveau confirmé**

On donne le grossissement d'un microscope optique :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha_m} = 60$$

avec :

- $\alpha'$  : diamètre apparent sous lequel est vue l'image de l'objet à travers l'instrument
- $\alpha_m$  : diamètre apparent maximal de l'objet vu à l'œil nu (c'est-à-dire lorsqu'il est au *punctum proximum*).

En ne prenant en compte que les limitations dues à l'œil, quelle est la taille du plus petit objet discernable avec un tel microscope ?

---

**niveau expert**

On donne le grossissement d'un microscope optique :

$$G = \frac{\alpha}{\alpha_0} = 60$$

où  $\alpha$  est l'angle sous lequel apparaît un objet visualisé à travers un microscope qui serait vu, au mieux, sous un angle  $\alpha_0$  à l'œil nu.

Quelle est la taille du plus petit objet discernable avec un tel microscope ?

# Résolution de problème

## Le microscope

### Exemple de résolution

#### niveau initiation

**S'approprier :**

- la longueur d'onde est  $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$
- le diamètre de l'objectif est  $D \approx 1 \text{ cm}$
- la distance objectif - objet est  $d \approx 1 \text{ cm}$

**Analyser :**

L'angle limite dû à la diffraction est  $\theta_d \approx \frac{\lambda}{D}$ .

**Réaliser :**

La limite de résolution due à la diffraction est

$$x_{\text{diffraction}} \approx \theta_d d \approx \frac{\lambda d}{D} \approx 0,5 \mu\text{m}$$

**Valider :**

La limite de résolution angulaire du microscope due à la diffraction est

$$\theta_d \approx \frac{\lambda}{D} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ rad} \times 10^{-5} \frac{180 \times 60}{\pi} = 0,17'$$

qui est plus faible que  $1'$  (cas de l'œil nu).

#### niveau confirmé

**S'approprier :**

- la limite de résolution angulaire de l'œil est  $\alpha_{\text{oeil}} = 1'$  qui correspond à un objet de taille  $x$  vu à une distance  $d_{pp} = 25 \text{ cm}$  (distance de l'œil au *punctum proximum*),
- un objet vu sous un angle  $\alpha_0$  à l'œil nu est vu à travers le microscope avec un angle  $\alpha = G \alpha_0$  avec  $G = 60$ .

**Analyser :**

La limite de résolution angulaire est donc divisée par  $G = 60$  grâce au microscope. Si on est à la limite de résolution angulaire de l'œil, alors  $\frac{\alpha_{\text{oeil}}}{G} = \frac{x_{\text{oeil}}}{d_{pp}}$ .

**Réaliser :**

La limite de résolution due à l'œil est

$$x_{\text{oeil}} \approx \frac{\alpha_{\text{oeil}}}{G} d_{pp} = \frac{1}{60} \times 1 \times \frac{\pi}{180 \times 60} \times 0,25 \approx 1,2 \mu\text{m}$$

**Valider :**

La limite de résolution angulaire de l'œil qui est  $1'$ , donne pour l'œil nu une limite de résolution (le *punctum proximum* étant pris égal à  $25 \text{ cm}$ ) :

$$x_0 \approx \frac{\pi}{180 \times 60} \times 0,25 = 72 \mu\text{m}$$

qui est (60 fois) plus grand que  $x_{\text{oeil}}$ .

---

### niveau expert

---

**S'approprier :**

- la limite de résolution angulaire de l'œil est  $1'$ ,
- un objet vu sous un angle  $\alpha_0$  à l'œil nu est vu à travers le microscope avec un angle  $\alpha = G \alpha_0$  avec  $G = 60$ ,
- la longueur d'onde  $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$
- le diamètre de l'objectif  $D \approx 1 \text{ cm}$
- la distance objectif - objet  $d \approx 1 \text{ cm}$

**Analysier :**

- L'angle limite dû à la diffraction est  $\theta_d \approx \frac{\lambda}{D}$ , qui correspond à une taille  $x_{diffraction} \approx \theta_d d$ .
- La limite de résolution angulaire est donc divisée par  $G = 60$  grâce au microscope. Si on est à la limite de résolution angulaire de l'œil, alors  $\frac{\alpha_{oeil}}{G} = \frac{x_{oeil}}{d_{pp}}$ .

Il s'agira de comparer les deux limites, celle due à l'œil et celle due à la diffraction du microscope.

**Réaliser :**

La limite de résolution due à l'œil est

$$x_{oeil} \approx \frac{\alpha_{oeil}}{G} d_{pp} = \frac{1}{60} \times 1 \times \frac{\pi}{180 \times 60} \times 0,25 \approx 1,2 \mu\text{m}$$

La limite de résolution due à la diffraction est

$$x_{diffraction} \approx \theta_d \times d \approx \frac{\lambda \times d}{D} \approx 0,5 \mu\text{m}$$

**Valider :**

La limite de résolution angulaire de l'œil qui est  $1'$ , donne pour l'œil nu une limite de résolution (le *punctum proximum* étant pris égal à 25 cm) :

$$x_0 \approx \frac{\pi}{180 \times 60} \times 0,25 = 72 \mu\text{m}$$

On a  $x_0 > x_{oeil} > x_{diffraction}$ . Ce qui limite la résolution, c'est donc la résolution de l'œil et

$$x_{limite} = x_{oeil} \approx 1 \mu\text{m}$$

**Résolution de problème**  
**Le microscope**  
Aides à la résolution

---

**niveau initiation**

---

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relever les tailles caractéristiques impliquées dans le cas du microscope et les nommer.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la limitation angulaire due à la diffraction ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment relier la limitation angulaire due à la diffraction à la taille du plus petit objet discernable ?</li> </ul>
Validier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la résolution angulaire de l'oeil ?</li> <li>– Comparer la résolution trouvée à la résolution angulaire de l'oeil.</li> </ul>

---

**niveau confirmé**

---

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relever les tailles caractéristiques impliquées dans le cas du microscope et les nommer.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la résolution angulaire de l'oeil ?</li> <li>– Par quel facteur la limite de résolution angulaire est-elle divisée grâce au microscope ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment relier la limitation angulaire à la taille du plus petit objet discernable ?</li> </ul>
Validier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comparer la résolution trouvée à la résolution de l'oeil.</li> </ul>

---

**niveau expert**

---

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quelle est la résolution angulaire de l'oeil ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Par quel facteur la limite de résolution angulaire est-elle divisée grâce au microscope ?</li> <li>– Quelle est la limitation angulaire due à la diffraction ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comment relier la limitation angulaire à la taille du plus petit objet discernable ?</li> </ul>
Validier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comparer les deux résolutions trouvées à la résolution de l'oeil.</li> <li>– Quel phénomène va limiter la résolution du microscope ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Le microscope**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

**niveau initiation**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données du texte sont relevées et nommées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– l'angle de diffraction dû à l'ouverture du microscope est rappelé</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la résolution due à la diffraction est déduite de l'angle de diffraction</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la résolution due à la diffraction est comparée à la résolution de l'oeil nu.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

**niveau confirmé**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données du texte sont relevées et nommées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– l'effet du microscope est compris divisant la limite de résolution angulaire de l'oeil (<math>1'</math>) par <math>G</math>.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la résolution due à l'oeil est déduite en estimant la distance oeil - <i>punctum proximum</i></li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la résolution due à l'oeil est comparée à la résolution de l'oeil nu.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

---

**niveau expert**


---

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données du texte sont relevées et nommées.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– les deux causes de limitation possible de la résolution sont trouvées, une comparaison devant être faite <i>a posteriori</i>,</li> <li>– l'effet du microscope est compris divisant la limite de résolution angulaire de l'oeil (<math>1'</math>) par <math>G</math>,</li> <li>– l'angle de diffraction dû à l'ouverture du microscope est rappelé.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la résolution due à l'oeil est déduite en estimant la distance oeil - <i>punctum proximum</i></li> <li>– la résolution due à la diffraction est déduite de l'angle de diffraction en estimant la distance objectif - objet,</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– les résolutions dues à l'oeil et à la diffraction, ainsi que la résolution de l'oeil nu sont comparées.</li> <li>– la limitation de la résolution du microscope est comprise comme la plus grande des deux résolutions parmi celles dues à l'oeil et à la diffraction.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# L'objectif photographique

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur la réflexion des ondes électromagnétiques sur un dioptrre - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	1	2	1	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Interfaces entre deux milieux <ul style="list-style-type: none"> <li>– Réflexion d'une onde plane progressive harmonique entre deux demi-espaces d'indices complexes <math>n_1</math> et <math>n_2</math> sous incidence normale : coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique.</li> <li>– Coefficients de réflexion et de transmission en puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exploiter la continuité (admise) du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression du coefficient de réflexion en fonction des indices complexes.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'objectif photographique**  
Enoncé

## L'ouverture et le T-Stop

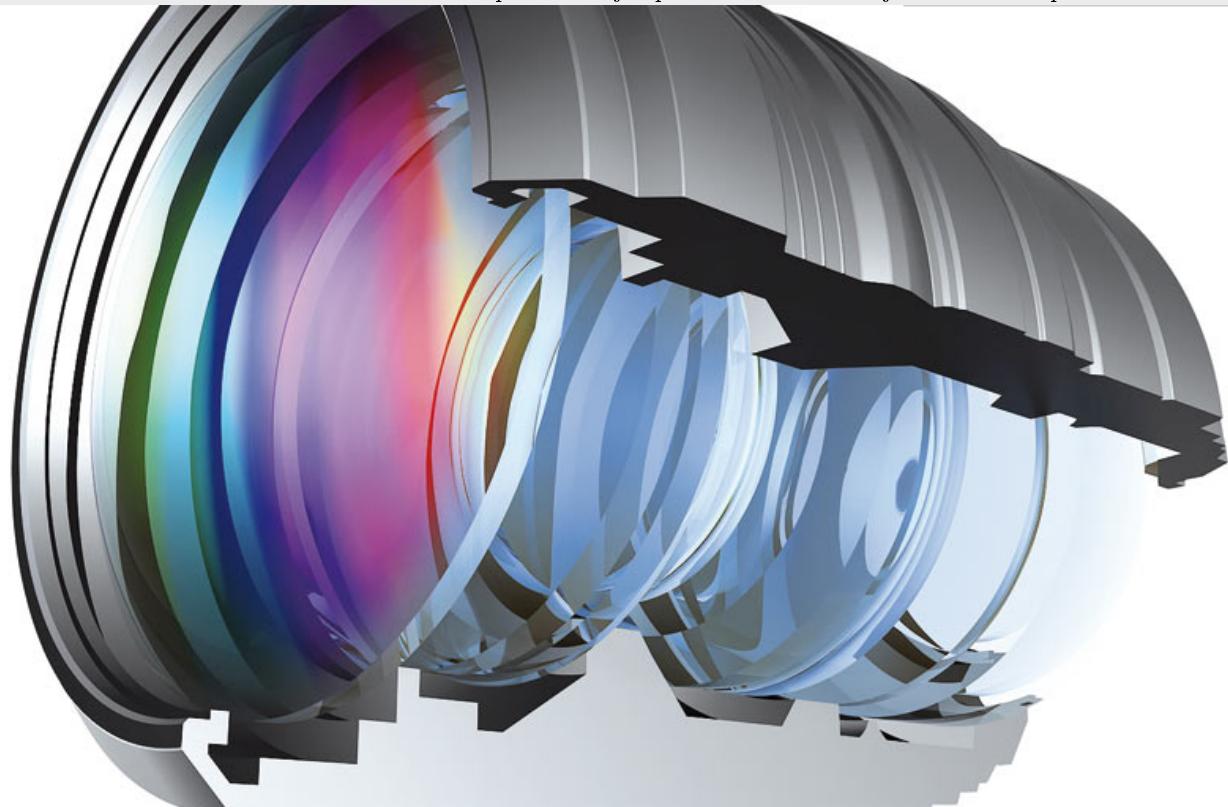
En photographie, l'indice de lamination (IL ou EV en anglais : exposure value) est une mesure de l'exposition lumineuse sur une échelle logarithmique : IL augmente d'une unité à chaque fois que la quantité de lumière qui arrive sur le capteur est divisée par 2. L'indice de lamination dépend du temps de pose (également appelé vitesse d'obturation) et de l'ouverture (qui fixe la profondeur de champ).

L'ouverture est le rapport de la longueur focale de l'objectif sur le diamètre du diaphragme. Par exemple, un objectif de 50mm qui ouvre à f/2 a un diaphragme de diamètre  $50/2=25\text{mm}$ .

Les valeurs courantes d'ouverture possibles sont 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8 ... Elles sont en progression géométrique de raison 1,4 environ (racine de 2) de sorte que la quantité de lumière soit divisée par 2 d'une valeur à la suivante (la quantité de lumière traversante étant proportionnelle à la surface et donc au carré du diamètre du diaphragme).

On parle aussi de l'ouverture photométrique ou T-Stop, notée T, qui prend en compte la perte de lumière à l'intérieur de l'objectif. Le nombre de lentilles ainsi que la qualité de leur traitement de surface influe beaucoup sur la transmittance de l'objectif. L'ouverture photométrique est toujours inférieure à l'ouverture relative puisqu'il y a toujours une perte de lumière dans l'objectif. Un objectif ouvrant à N=1,4 aura un T supérieur, par exemple 2.

L'ouverture photométrique est particulièrement intéressante, même si celle-ci n'est pratiquement jamais affichée par les constructeurs. Des mesures effectuées par un laboratoire indépendant (voir <http://luminous-landscape.com/an-open-letter-to-the-major-camera-manufacturers/>) ont montré que la perte de luminosité due à la transmittance peut aller jusqu'à 1 IL sur des objectifs assez réputés.



### niveau initiation

Estimer, grâce aux lois de l'électromagnétisme, le pourcentage de l'intensité lumineuse transmise au capteur d'un appareil photographique par un objectif.

Résolution de problème  
**L'objectif photographique**  
 Exemple de résolution

---

L'indice optique du verre est  $n \in [1,5; 1,9]$ . L'approximation de Gauss permet de dire qu'on est dans le cas d'une incidence quasi-normale sur les dioptres air-verre sur les surfaces des lentilles.

A l'interface entre deux milieux diélectriques d'indices  $n_1$  et  $n_2$ , une onde incidente normale à l'interface est réfléchie et transmise. Il y a continuité des champs électriques et magnétiques à l'interface.

Le calcul des coefficients de réflexion en champ électrique  $r_E$  et en champ magnétique  $r_B$  conduit à  $r_E = -r_B = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ . On en déduit le coefficient de réflexion en énergie :  $R_1 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$ . L'intensité transmise est  $T_1 = (1 - R_1)$  pour une interface.

En estimant le nombre de lentilles à  $p = 7$  (cf. schéma), on arrive à  $2p$  interfaces dont un coefficient de transmission en énergie

$$T = T_1^{2p} = \left(1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}\right)^{2p}$$

AN : on trouve 0,56 pour  $n = 1,5$  et 0,24 pour  $n = 1,9$ .

Comme indiqué dans le document, on perd 1 IL (ou un diaphragme), soit 50% semble le bon ordre de grandeur.

NB : les traitements anti-reflet essaient d'augmenter  $T$ .

Résolution de problème  
**L'objectif photographique**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li> <li>– Quel est l'ordre de grandeur de l'indice du verre ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Modéliser le verre de lunette par deux dioptres plans.</li> <li>– Quel est le pourcentage de l'intensité lumineuse perdue à cause des reflets en fonction du coefficient de réflexion énergétique de l'onde électromagnétique ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Écrire les expressions des ondes électromagnétiques incidente, réfléchie et transmise dans le cas d'une incidence normale sur un dioptrre plan séparant deux demi-espaces d'indices complexes <math>n_1</math> et <math>n_2</math>.</li> <li>– En exploitant la continuité (admise) du champ électromagnétique dans cette configuration, obtenir l'expression des coefficients de réflexion en amplitude en fonction des indices complexes.</li> <li>– Comment relier le coefficient de réflexion en amplitude au coefficient de réflexion en énergie ?</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le pourcentage de l'intensité lumineuse perdue à cause des reflets qui a été trouvé est-il cohérent avec celui donné par le document ?</li> </ul>

Résolution de problème  
**L'objectif photographique**  
Exemples d'indicateurs de réussite

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données utiles du texte sont relevées et nommées.</li><li>– L'indice du verre et le nombre de lentilles sont estimés.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'objectif est modélisé par une succession de dioptres air-verre.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le calcul de coefficients de réflexion et/ou de transmission en amplitude dans le cas d'une incidence normale sur un dioptre plan séparant deux demi-espaces d'indices complexes <math>n_1</math> et <math>n_2</math> est fait correctement.</li><li>– Le(s) coefficient(s) de réflexion et/ou de transmission en énergie est (sont) déduit(s).</li><li>– Le pourcentage de l'intensité lumineuse transmise est estimé.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le résultat trouvé est comparé à celui donné par le document (en deux endroits).</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# L'œuf dur en rotation

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sans données sur l'énergie potentielle de pesanteur et l'énergie cinétique de rotation - programme de première année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	1	2	2	4	2
niveau "expert"	2	4	3	3	2

## Cadre du programme officiel : Programme de première année de la filière PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers – Rotation autour d'un axe fixe.	– Décrire le mouvement d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
Loi du moment cinétique – Généralisation au cas du solide en rotation autour d'un axe fixe : moment d'inertie.	– Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté dans un référentiel galiléen. – Énergie cinétique d'un solide en rotation.	– Utiliser la relation $E_c = \frac{1}{2}J_{\Delta}\omega^2$ , l'expression de $J_{\Delta}$ étant fournie.
Approche énergétique du mouvement d'un point matériel – Énergie potentielle. Énergie mécanique.	– Établir et connaître l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

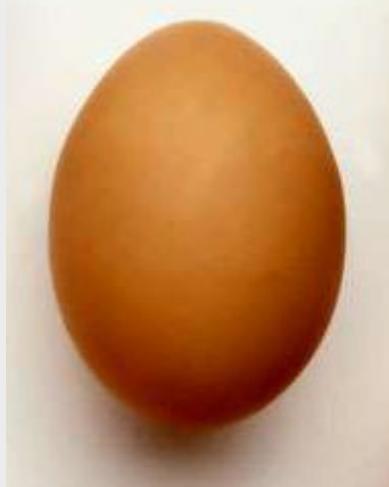
Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**L'œuf dur en rotation**  
Enoncé

Un œuf dur posé sur une table est mis en rotation autour de son petit axe.



---

**niveau initiation**

Montrer qu'il existe une vitesse angulaire limite au delà de laquelle l'œuf se redresse spontanément et se met à tourner autour de son grand axe.

---

**niveau expert**

Déterminer l'ordre de grandeur de la vitesse angulaire limite au delà de laquelle l'œuf se redresse spontanément et se met à tourner autour de son grand axe.

Quelques moments d'inertie :

- moment d'inertie d'une sphère pleine, homogène, de masse  $m$ , de rayon  $R$  autour d'un de ses axes :  $J = \frac{2mR^2}{5}$ ,
- moments d'inertie d'un cylindre plein, homogène, de masse  $m$ , d'axe  $Oz$ , de rayon  $R$  et de longueur  $\ell$  :  $J_{Oz} = \frac{mR^2}{2}$ ,  $J_{Ox} = J_{Oy} = \frac{mR^2}{4} + \frac{m\ell^2}{12}$ .

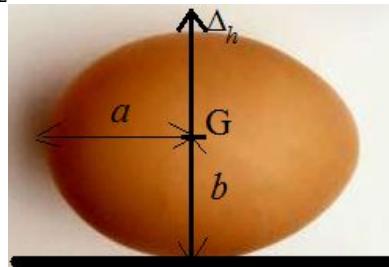
# Résolution de problème

## L'œuf dur en rotation

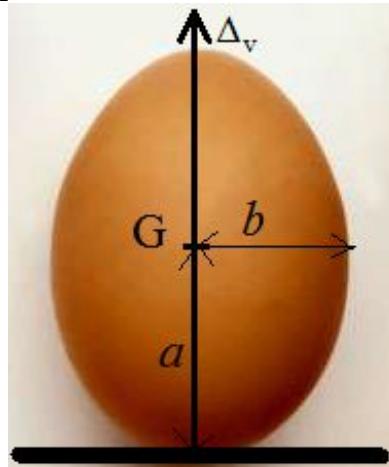
### Exemple de résolution

On note  $a$  le demi grand axe et  $b$  le demi petit axe de l'œuf dur, et  $G$  son centre d'inertie qu'on considère au centre de l'œuf si ce dernier est homogène, de masse volumique  $\mu \approx 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . L'énergie mécanique est la somme de l'énergie potentielle de pesanteur  $m g z_G$  et cinétique  $\frac{1}{2} J \omega^2$ . Deux cas sont à considérer :

- soit l'œuf dur est mis en rotation autour de son petit axe (noté  $\Delta_h$ ), avec le moment d'inertie  $J_h$  et l'énergie mécanique est  $E_h = m g b + \frac{1}{2} J_h \omega^2$ ;



- soit l'œuf dur est mis en rotation autour de son grand axe (noté  $\Delta_v$ ), avec le moment d'inertie  $J_v < J_h$  et l'énergie mécanique est  $E_v = m g a + \frac{1}{2} J_v \omega^2$ .



L'allure des deux courbes  $E_v$  et  $E_h$  en fonction de  $\omega$  est donnée sur la figure :



On voit que  $E_v < E_h$  (donc l'œuf dur se relève) si  $\omega > \omega_c$ , tel que

$$m g a + \frac{1}{2} J_v \omega_c^2 = m g b + \frac{1}{2} J_h \omega_c^2$$

soit

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2m g (a - b)}{J_h - J_v}}$$

Pour la version expert :

On peut évaluer le rayon (le plus faible) à  $b \approx 2,25$  cm, la hauteur à  $a \approx 3,25$  cm.

Le moment d'inertie vertical est tel que  $\frac{J_v}{m} < \frac{b^2}{4} + \frac{a^2}{12} = 2,15 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>.

Le moment d'inertie horizontal est tel que  $\frac{J_h}{m} > \frac{2b^2}{5} = 2,02 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup> et  $\frac{J_h}{m} < \frac{2a^2}{5} = 4,23 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>.

On pourrait prendre :  $\frac{J_h}{m} \approx 3 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup> et  $\frac{J_v}{m} \approx 2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>, soit

$$\omega_c \approx \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 1 \times 10^{-2}}{1 \times 10^{-4}}} = 66 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

soit 10 tours par seconde, ce qui semble possible à faire à la main, bien que difficile.

Résolution de problème  
**L'œuf dur en rotation**  
Aides à la résolution

- 
- Où se trouve le centre de masse de l'œuf ?
  - En comparant les énergies potentielles de pesanteur de l'œuf vertical et horizontal, montrer qu'en absence de rotation l'oeuf se met en position horizontale.
  - Rappeler la forme de l'énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.
  - Comparer les moments d'inertie de l'œuf autour de son grand et de son petit axe.
  - Tracer, en fonction de la vitesse angulaire, les allures des énergies mécaniques de l'œuf en rotation autour de son grand et de son petit axe.  
Pour la version expert :
    - Essayer d'évaluer les moments d'inertie de l'œuf autour de son grand et de son petit axe.

**Résolution de problème**  
**L'œuf dur en rotation**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les grand et petit axes de l'œuf sont repérés et associés aux positions horizontale et verticale.</li> <li>– La position du centre de masse de l'œuf est repérée.</li> <li>– Les moments d'inertie par rapport aux grand et petit axes sont comparés.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'énergie mécanique est comprise comme étant un paramètre à minimiser.</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les moments d'inertie de l'œuf autour de son grand et de son petit axe sont évalués.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les expressions des énergies mécaniques de l'œuf dur en rotation par rapport à ses deux axes sont déterminées.</li> <li>– Les expressions des énergies mécaniques de l'œuf dur en rotation par rapport à ses deux axes sont comparées en fonction de la vitesse de rotation.</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La vitesse angulaire limite est calculée.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Le cas limite de la non rotation est étudié.</li> </ul> <p>Pour la version expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La vitesse angulaire limite est estimée comme étant possible à atteindre ou pas.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le smartphone

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sans données sur la limite de résolution de l'oeil - programme de première année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	1	2	2

## Cadre du programme officiel : première année PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Optique géométrique – L'oeil.	– Connaître les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

**Résolution de problème**  
**Le smartphone**  
**Enoncé**

Pour chacun des trois smartphones présentés, dire s'il est possible ou non de discerner, à l'œil nu, un pixel dans l'écran.

Donnée : 1 pouce = 2,5 cm.

# Résolution de problème

## Le smartphone

### Exemple de résolution

<b>S'approprier le problème.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> </ul>
----------------------------------	--

- la limite de résolution angulaire de l'œil est  $\alpha_{oeil} = 1'$ .
- la distance de l'œil au *punctum proximum* est  $d_{pp} = 25$  cm.
- le tableau donne la diagonale  $d$  de l'écran ainsi que le nombre de pixels  $n$  et  $n'$  suivant la longueur et la largeur de l'écran.

<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
-----------------	---

- si  $a$  est la taille d'un pixel (supposé carré), le théorème de Pythagore donne

$$(n a)^2 + (n' a)^2 = d^2$$

- l'angle sous lequel ce pixel est vu par l'œil au *punctum proximum* est

$$\alpha = \frac{a}{d_{pp}}$$

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

La combinaison des deux relations donne

$$\alpha = \frac{d}{d_{pp} \sqrt{n^2 + n'^2}}$$

en radians (petit angle) soit numériquement :

- pour le smartphone A :  $\alpha_A = \frac{5,5 \times 2,5}{25 \sqrt{1334^2 + 750^2}} \frac{180 \times 60}{\pi} = 1,0'$
- pour le smartphone B :  $\alpha_B = \frac{4,7 \times 2,5}{25 \sqrt{1920^2 + 1080^2}} \frac{180 \times 60}{\pi} = 0,73'$
- pour le smartphone C :  $\alpha_C = \frac{5 \times 2,5}{25 \sqrt{800^2 + 480^2}} \frac{180 \times 60}{\pi} = 1,8'$

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

- pour le smartphone A :  $\alpha_A \approx \alpha_{oeil}$  donc il est tout juste possible de discerner, à l'œil nu, un pixel dans l'écran.
- pour le smartphone B :  $\alpha_B < \alpha_{oeil}$  donc il est impossible de discerner, à l'œil nu, un pixel dans l'écran.
- pour le smartphone C :  $\alpha_C > \alpha_{oeil}$  donc il est possible de discerner, à l'œil nu, un pixel dans l'écran.

**Résolution de problème**  
**Le smartphone**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données relatives aux écrans comparés et les nommer.</li><li>– Quelle est la résolution angulaire de l'oeil ?</li><li>– Qu'est-ce que le <i>punctum proximum</i> ?</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Faire un schéma d'un écran en y faisant apparaître un pixel ainsi que les données relatives à cet écran.</li><li>– Faire un schéma de l'oeil qui observe un pixel en y nommant les angles et les distances.</li><li>– Dans quel cas l'angle sous lequel l'oeil voit le pixel est-il maximal ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relier l'angle maximal sous lequel l'oeil voit un pixel aux données relatives aux écrans.</li><li>– Faire une application numérique pour chacun des trois smartphones.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comparer l'angle maximal sous lequel l'oeil voit un pixel à la résolution angulaire de l'oeil.</li><li>– Dans quel cas est-il possible de discerner, à l'œil nu, un pixel dans l'écran ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**Le smartphone**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les données du document (diagonale et nombre de pixels) sont relevées et nommées.</li><li>– La limite de résolution angulaire de l'oeil (<math>1'</math>) est rappelée.</li><li>– La distance oeil - <i>punctum proximum</i> (25 cm) est rappelée.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– La taille d'un pixel est reliée aux données de l'écran (diagonale et nombre de pixels).</li><li>– L'angle maximal sous lequel l'oeil voit le pixel est relié à la taille de ce pixel et à la distance oeil - <i>punctum proximum</i>.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Une expression littérale est trouvée qui permet de conclure.</li><li>– Les applications numériques sont faites dans les trois cas de smartphones présentés.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La réponse à la question est apportée de façon satisfaisante grâce à une comparaison.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Le télésiège

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur l'énergie mécanique - programme de première année.  
La version "expert" peut bien sûr être rendue plus facile grâce à des questions pour aider à la résolution.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	2	2	2	2
niveau "expert"	3	4	3	2	2

## Cadre du programme officiel : première année MPSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approche énergétique du mouvement d'un point matériel <ul style="list-style-type: none"> <li>– Puissance et travail d'une force.</li> <li>– Loi de l'énergie cinétique et loi de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen.</li> <li>– Énergie potentielle.</li> <li>– Énergie mécanique.</li> <li>– Mouvement conservatif.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.</li> <li>– Savoir que la puissance dépend du référentiel.</li> <li>– Utiliser la loi appropriée en fonction du contexte.</li> <li>– Établir et connaître les expressions des énergies potentielles de pesanteur (champ uniforme), énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), énergie potentielle élastique, énergie électrostatique (champ uniforme et champ créé par une charge ponctuelle).</li> <li>– Distinguer force conservative et force non conservative.</li> <li>– Reconnaître les cas de conservation de l'énergie mécanique.</li> <li>– Utiliser les conditions initiales.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le télésiège**  
Enoncé

## Le télésiège du Châtelet au Grand Bornand

Caractéristiques techniques  
*disponibles sur le site de la station de ski du Grand Bornand*

**Un moyen de transport à la montagne**



Takamagahara Ski lift - Shiga Kogen. Photo : Meg Yamagute.

Caractéristiques administratives :

- Nom de l'installation : le Châtelet
- Type d'appareil : télésiège à pinces fixes
- Constructeur : Pomagalski
- Année de construction : 1997

Caractéristiques géométriques :

- Altitude de la gare aval : 1270 m
- Altitude de la gare amont : 1545 m
- Longueur : 950 m
- Dénivelé : 275 m
- Pente moyenne : 30%
- Pente maximale : 76%

Caractéristiques de la ligne et d'exploitation :

- Nombre de pylônes : 11
- Vitesse en ligne : 2,5 m/s
- Temps de montée : 6mn 20s
- Débit : 2250 personnes par heure

Caractéristiques techniques :

- Emplacement de la station motrice : aval

- Type de motorisation principale : électrique
- Nombre de moteur(s) électrique : 1
- Puissance : 225 kW
- Nombre de frein(s) de service : 1
- Nombre de frein(s) de poulie : 2
- Capacité des sièges : 4 personnes
- Nombre de sièges : 119
- Type de sièges : sièges "Arceau"
- Dispositif d'accouplement : pinces fixes
- Type d'embarquement : face à la ligne

---

### niveau initiation

---

Évaluer la puissance nécessaire lors du fonctionnement en régime permanent.

---

### niveau expert

---

Lors de la remise en route après un arrêt d'urgence, le téléski reprend sa vitesse nominale presque instantanément. Évaluer le temps nécessaire à la remise en route du téléski arrêté lorsque les sièges sont pleins.

# Résolution de problème

## Le télésiège

### Exemple de résolution

#### niveau initiation

Les frottements ne travaillent pratiquement pas car il n'y a pas de glissement du câble sur les poulies.

Pour un skieur de masse  $m = 80 \text{ kg}$ , la variation d'énergie cinétique entre le bas ( $v = 0$ ) et le haut ( $v = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) est de  $\Delta E_c = 250 \text{ J}$  alors que la variation d'énergie potentielle est  $\Delta E_p = mg\Delta z = 220 \text{ kJ}$ .

En fonctionnement normal (régime permanent), la variation d'énergie cinétique est donc négligeable devant la variation d'énergie potentielle.

Les sièges se déplacent toujours à la même vitesse et le travail nécessaire pour leur montée est compensé par le travail récupéré lors de leur descente. On peut aussi associer les sièges par 2 (à l'opposé sur la ligne) et constater que le barycentre des deux sièges reste immobile.

En une heure, 2250 skieurs sont passés du bas de la piste à son sommet et la variation totale d'énergie potentielle est :  $\Delta E_{p,tot} = 2250 \times 220 \approx 500 \text{ MJ}$ .

La puissance correspondante est donc approximativement  $500 \times 10^6 / 3600 = 140 \text{ kW}$ .

La valeur trouvée est le bon ordre de grandeur puisque la valeur réelle est de 225 kW.

#### niveau expert

Les frottements ne travaillent pratiquement pas car il n'y a pas de glissement du câble sur les poulies.

Pour la remise en route sur une durée de  $\Delta t$ , on peut évaluer les variations de vitesse et d'altitude :

- variation de vitesse : de 0 à  $v = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en  $\Delta t$ ,
- accélération moyenne correspondante :  $a = \frac{v}{\Delta t}$
- distance parcourue :  $\Delta x = \frac{1}{2}a\Delta t^2 = \frac{1}{2}v\Delta t$
- variation d'altitude :  $\Delta z = \Delta x \times 0,3 = \frac{0,3}{2}v\Delta t$  (pente moyenne de 30%).

La variation d'énergie pour les sièges (de masse  $m_{siege}$ ) est (on ne prend pas en compte la variation d'énergie potentielle qui est globalement nulle) :

$$\Delta E_{sieges} = 119 m_{siege} \frac{v^2}{2}$$

La variation d'énergie pour les skieurs (4 skieurs sur la moitié des 119 sièges) est :

$$\Delta E_{skieurs} = 4 \times 119/2 \times m_{skieur} \left( \frac{v^2}{2} + \frac{0,3}{2}g v \Delta t \right)$$

Comme

$$P_{max} = \frac{\Delta E_{sieges} + \Delta E_{skieurs}}{\Delta t} \approx 225 \text{ kW}$$

soit

$$P_{max} \Delta t = 119 m_{siege} \frac{v^2}{2} + 2 \times 119 \times m_{skieur} \left( \frac{v^2}{2} + \frac{0,3}{2}g v \Delta t \right)$$

$\Rightarrow$

$$(P_{max} - 0,3 \times 119 m_{skieur} g v) \Delta t = 119 (m_{siege} + 2 m_{skieur}) \frac{v^2}{2}$$

Avec  $m_{siege} \approx 200 \text{ kg}$ , et  $m_{skieur} \approx 80 \text{ kg}$ , on trouve :

$$\Delta t = \frac{119 (m_{siege} + 2 m_{skieur}) \frac{v^2}{2}}{P_{max} - 0,3 \times 119 m_{skieur} g v} = \frac{119 (200 + 2 \times 80) \frac{2,5^2}{2}}{225 \times 10^3 - 0,3 \times 119 \times 80 \times 9,81 \times 2,5} = 0,9 \text{ s}$$

(ou 0,4 s si on prend  $m_{siege} = 0$ ), ce qui semble dans tous les cas instantané.

NB : on aurait pu négliger  $0,3 \times 119 m_{skieur} g v$  devant  $P_{max}$ , ce qui revient à dire que toute la puissance est dévolue à l'augmentation d'énergie cinétique (la variation d'énergie potentielle étant négligée).

Résolution de problème  
**Le télésiège**  
Aides à la résolution

---

**niveau initiation**

- Expliquer pourquoi les frottements sont très certainement négligeables.
  - Pour un skieur initialement immobile en bas de la piste et transporté jusqu'en haut de la piste, quelles sont les variations d'énergies cinétique et potentielle ?
  - Expliquer pourquoi la masse des paniers est sans importance.
  - Estimer l'énergie nécessaire pour transporter les skieurs jusqu'au sommet.
  - En déduire la puissance moyenne en fonctionnement normal.
- 

**niveau expert**

Pendant la durée  $\Delta t$  du régime transitoire de remise en marche du télésiège :

- Expliquer pourquoi les frottements sont très certainement négligeables.
- De combien s'élève un skieur ?
- Quelle est la variation de l'énergie d'un skieur ?
- Combien y a-t-il de skieurs, au plus, dans la montée du télésiège ?
- Pourquoi peut-on négliger la variation d'énergie potentielle des câbles et des sièges ?
- A quoi sert l'énergie fournie par le moteur ?

**Résolution de problème**  
**Le télésiège**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

**niveau initiation**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données pertinentes du texte sont relevées et nommées.</li> <li>– La masse d'un skieur est estimée.</li> </ul>
Analyser	<p>Un bilan d'énergie est fait sur une durée donnée, où :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– les frottements sont négligés,</li> <li>– la variation d'énergie des sièges est négligée,</li> <li>– la variation d'énergie d'un ou plusieurs skieurs est explicitée,</li> <li>– la variation d'énergie totale est reliée à la puissance du moteur.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La puissance est exprimée en fonction des données du problème.</li> <li>– La puissance est calculée numériquement.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La puissance trouvée est comparée à la puissance maximale des données fournies.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

**niveau expert**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données pertinentes du texte sont relevées et nommées.</li> <li>– Les masses des skieurs et des sièges sont estimées.</li> </ul>
Analyser	<p>Pendant la durée du régime transitoire de remise en marche du télésiège :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– la variation de vitesse est explicitée,</li> <li>– la variation d'altitude est estimée.</li> </ul> <p>Un bilan d'énergie est fait sur la durée du régime transitoire, où</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– les frottements sont négligés,</li> <li>– la variation d'énergie potentielle des sièges est négligée,</li> <li>– la variation d'énergie potentielle d'un ou plusieurs skieurs est explicitée,</li> <li>– la variation d'énergie cinétique des sièges et des skieurs est explicitée,</li> <li>– la variation d'énergie totale est reliée à la puissance du moteur.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La durée du régime transitoire est exprimée en fonction des données du problème.</li> <li>– La durée du régime transitoire est calculée numériquement.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La durée du régime transitoire est validée (ou pas) au vu de l'expression "instantanée".</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# La tornade

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données graphiques sur le rotationnel en mécanique des fluides - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	2	1	2	3	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Description d'un fluide en mouvement</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vecteur tourbillon.</li>   <li>– Écoulement irrotationnel défini par la nullité du rotationnel du champ des vitesses en tout point ; potentiel des vitesses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Illustrer sur des exemples simples la signification qualitative du vecteur tourbillon.</li>   <li>– Utiliser <math>\vec{\text{rot}}\vec{v} = \vec{0}</math> pour un écoulement irrotationnel et en déduire l'existence d'un potentiel des vitesses. Savoir que le caractère irrotationnel dépend du référentiel.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

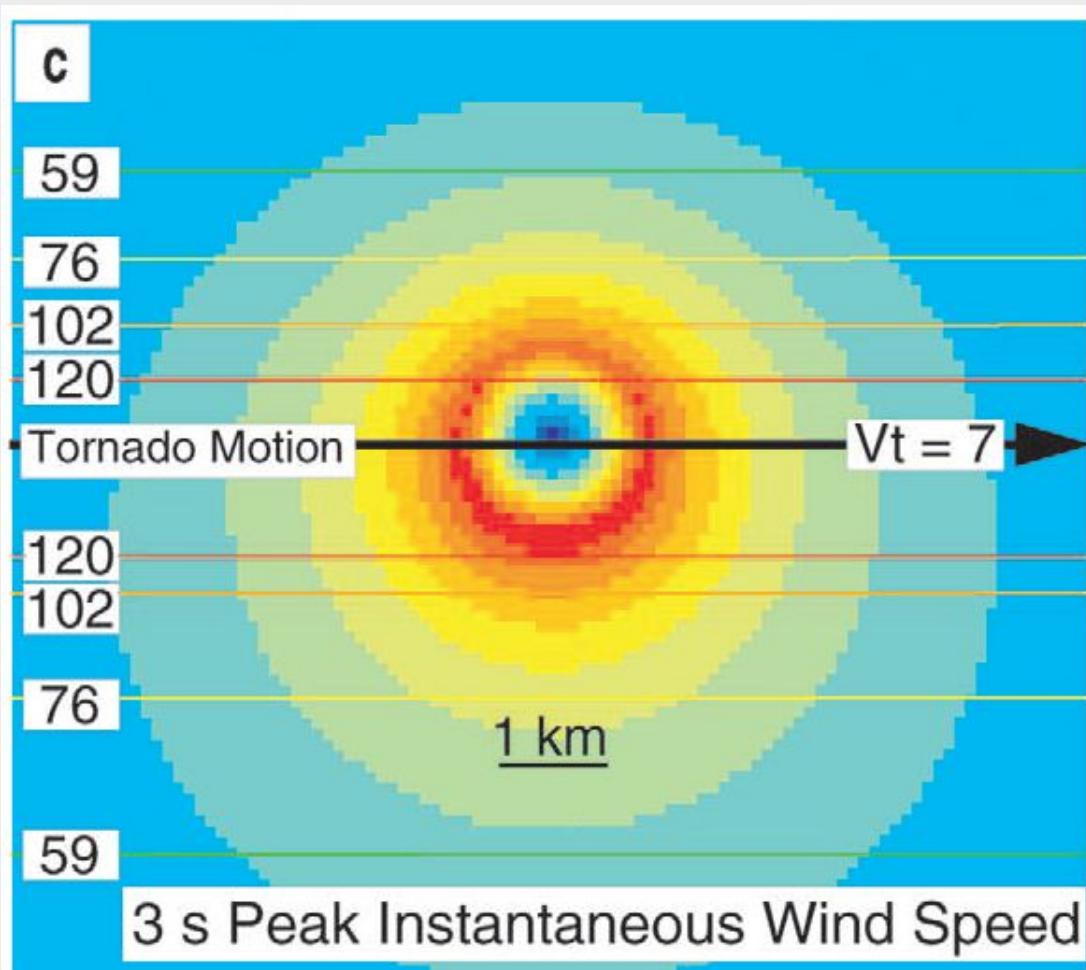
Résolution de problème  
**La tornade**  
 Enoncé

## Les vents au passage d'une tornade

Extraits de l'article "LOW-LEVEL WINDS IN TORNADOES AND POTENTIAL CATASTROPHIC TORNADO IMPACTS IN URBAN AREAS" de J. WURMAN, C. ALEXANDER, P. ROBINSON et Y. RICHARDSON

publié dans AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY JANUARY 2007 p. 31

Quelle est la répartition des vitesses aux abords d'une tornade ?



Ci-dessus : vue du dessus de la vitesse instantanée du vent en échelle de couleur (bleu : vitesse nulle, rouge : vitesse maximale). Les vitesses maximales en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  sont relevées à gauche le long de l'axe horizontal correspondant. L'échelle correspondant à 1 km est indiquée sur le graphique. Le déplacement global de la tornade se fait de la gauche vers la droite sur le schéma à la vitesse  $V_t = 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

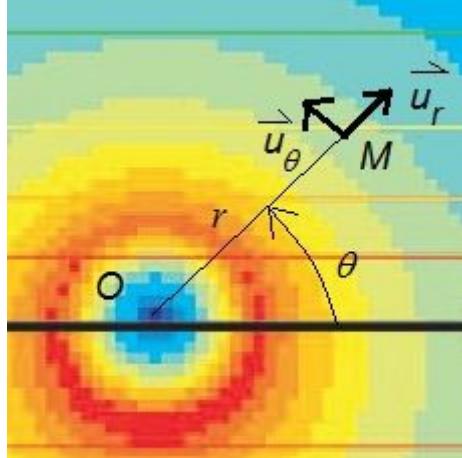
### niveau initiation

Montrer quantitativement que le document est cohérent avec le modèle d'une tornade centrée sur un point  $O$ , tel qu'en coordonnées cylindriques d'axe  $Oz$  orienté vers le haut :

- si  $r < R$ ,  $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{v} = 2\vec{\Omega}$ ;
- si  $r > R$ ,  $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{v} = \vec{0}$ .

## Résolution de problème La tornade Exemple de résolution

Le schéma modèle est le suivant :



$$\vec{v} = v_\theta(r) \vec{u}_\theta$$

La modélisation imposée est la suivante :

$$\begin{cases} r < R \Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}} \vec{v} = 2\vec{\Omega} \\ r > R \Rightarrow \overrightarrow{\text{rot}} \vec{v} = \vec{0} \end{cases}$$

Plusieurs voies sont possibles :

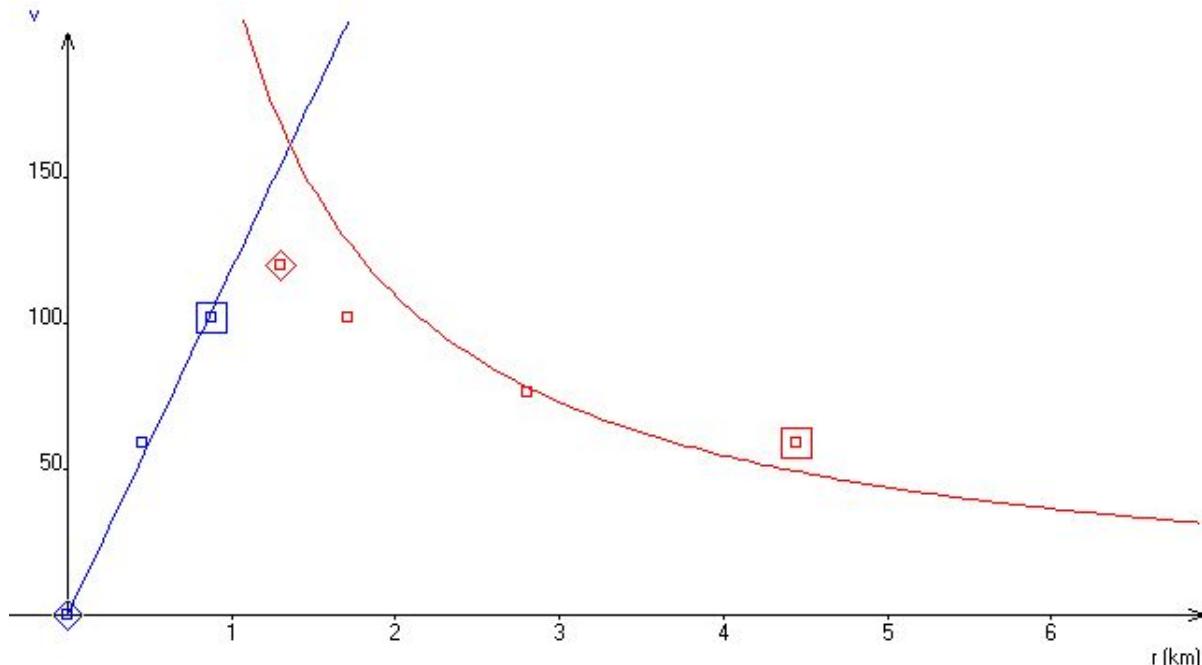
$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{v}$ grâce au formulaire	$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{v}$ grâce à la formule de Stokes	ou      ou      modélisation comme solide $\Rightarrow v = r \Omega$
---	--	--

Le calcul mène à

$$\begin{cases} \vec{v} = r \cdot \Omega \cdot \vec{u}_\theta \text{ pour } r < a \\ \vec{v} = \frac{\Omega \cdot a^2}{r} \vec{u}_\theta \text{ pour } r > a \end{cases}$$

On lit sur le document  $R \approx 1 \text{ km}$ . De plus, la vitesse maximale est  $V_m = R\Omega$  et on lit sur le document  $V_m = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Aussi,  $\Omega = 0,12 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La modélisation est donnée sur le graphique suivant :



**Résolution de problème**  
**La tornade**  
**Aides à la résolution**

---

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel repère semble adapté pour étudier le problème ?</li> <li>– De quoi dépend la vitesse ?</li> <li>– Comment varie la vitesse avec <math>r</math> ?</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quel contour fermé prendre pour appliquer la formule de Stokes ?</li> <li>– Existe-t-il une formule pour calculer le rotationnel dans ces coordonnées ?</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utiliser le formulaire pour calculer le rotationnel d'un vecteur :</li> </ul> $\overrightarrow{rot} (\vec{A}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu_2 \cdot \mu_3} \left[ \frac{\partial(\mu_3 \cdot A_3)}{\partial s_2} - \frac{\partial(\mu_2 \cdot A_2)}{\partial s_3} \right] \\ \frac{1}{\mu_3 \cdot \mu_1} \left[ \frac{\partial(\mu_1 \cdot A_1)}{\partial s_3} - \frac{\partial(\mu_3 \cdot A_3)}{\partial s_1} \right] \\ \frac{1}{\mu_1 \cdot \mu_2} \left[ \frac{\partial(\mu_2 \cdot A_2)}{\partial s_1} - \frac{\partial(\mu_1 \cdot A_1)}{\partial s_2} \right] \end{pmatrix}$
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ne pourrait-on pas relever les valeurs de la vitesse sur le document fourni et représenter <math>v(r)</math> ?</li> <li>– Serait-il possible avec un logiciel de modéliser le graphique précédent ?</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**La tornade**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un schéma modèle est tracé avec le repère.</li> <li>- Les grandeurs physiques pertinentes sont déterminées et un symbole leur est attribué : <math>\vec{v} = v_\theta(r) \vec{u}_\theta</math>.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les formules qui seront utilisées sont explicitées (formule de Stokes, utilisation du formulaire...).</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les calculs analytiques sont menés à leur terme : <math>r &lt; R \Rightarrow v = r\Omega</math> et <math>r &gt; R \Rightarrow v = \frac{cste}{r}</math>.</li> <li>- La démarche est menée jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée : <math>v_{max} = v(R) = R\Omega</math>.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le résultat obtenu est comparé avec le document joint : <math>v_{max} = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}</math>, <math>R \approx 1 \text{ km} \Rightarrow \Omega \approx 0,12 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}</math>.</li> <li>- La modélisation est faite en numérisant la courbe <math>v(r)</math>.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>- Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le vaisseau spatial

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sur les forces d'inertie - programme de seconde année.

Le niveau "expert" demande implicitement de répondre à la question posée dans le niveau "initiation", avant de répondre à la question posée dans le niveau "confirmé".

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	2	2	2	2	2
niveau "confirmé"	2	3	2	3	2
niveau "expert"	4	4	2	3	2

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dynamique dans un référentiel non galiléen  – Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen : force d'inertie d'entraînement, force d'inertie de Coriolis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exprimer la force d'inertie axifuge et la force d'inertie de Coriolis. Associer la force d'inertie axifuge à l'expression familière « force centrifuge ».</li> <li>– Appliquer la loi de la quantité de mouvement, la loi du moment cinétique et la loi de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le vaisseau spatial**  
Enoncé

## 2001 - L'Odyssée de l'espace

D'après les scènes du film  
*de Stanley Kubrick*

**Comment créer une pesanteur artificielle dans l'espace ?**



Dans le film "2001 l'odyssée de l'espace" de Stanley Kubrick, un vaisseau spatial (photo de gauche) constitué d'un tore tourne autour de son axe avec une vitesse angulaire constante dans un référentiel galiléen. Alors qu'ils sont loin de toute planète, les astronautes vivent dans le tore comme sur Terre (photo de droite), ils sont soumis à une gravité artificielle et l'on voit même, dans une des scènes du film, l'un d'entre eux nommé Poole faire un jogging.

### niveau initiation

Évaluer le rayon du vaisseau et sa vitesse angulaire de rotation pour que les astronautes subissent une gravité artificielle de valeur équivalente à celle existant sur Terre, à 10% près.

### niveau confirmé

Évaluer le rayon du vaisseau et sa vitesse angulaire de rotation pour que les astronautes subissent une gravité artificielle de valeur équivalente à celle existant sur Terre, à 10% près.

Expliquer alors pourquoi il peut être très fatigant de courir dans la station spatiale (on choisira des valeurs numériques pour illustrer le raisonnement). Le sens choisi pour faire le footing est-il important ?

### niveau expert

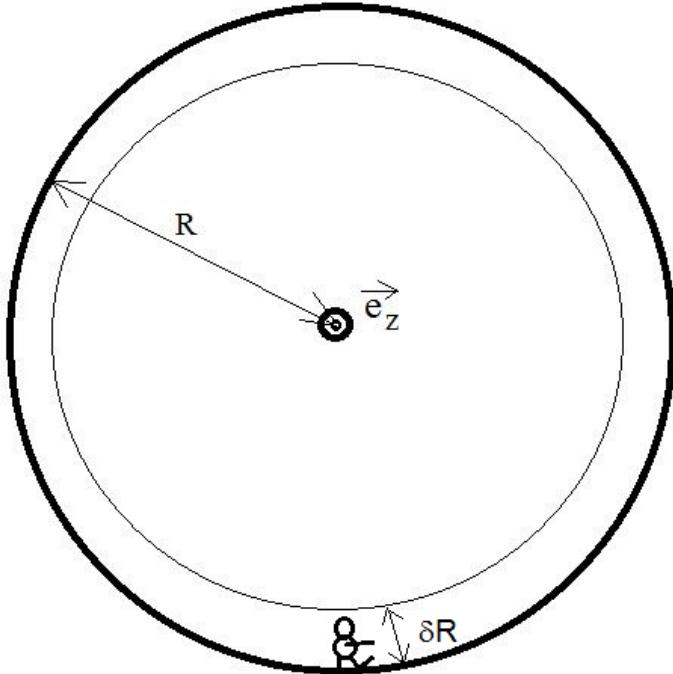
Expliquer pourquoi il peut être très fatigant de courir dans la station spatiale (on choisira des valeurs numériques pour illustrer le raisonnement). Le sens choisi pour faire le footing est-il important ?

# Résolution de problème

## Le vaisseau spatial

### Exemple de résolution

- On nomme  $R$  le rayon du vaisseau spatial,  $Oz$  son axe, et le vecteur vitesse angulaire  $\vec{\Omega} = \omega \cdot \vec{e}_z$  ( $\omega > 0$ ).
- On pourra prendre  $\delta R \approx 1,75$  m (la distance entre les pieds et la tête).



- La pesanteur sur Terre est  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

#### Force d'entraînement

Dans le tore, il y a la force d'inertie d'entraînement qui vaut  $m R \omega^2$ . On cherche donc  $R \omega^2 = g$ , avec  $\frac{\delta R}{R} = 10\%$ .

D'où  $R = 17,5$  m. Ainsi  $\omega = \sqrt{\frac{9,81}{17,5}} = 0,75 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , soit une période de rotation de 8 s.

La comparaison avec les photos laisse entendre que le rayon est bien plus grand : la variation de la pesanteur artificielle est  $\frac{\delta R}{R} < 10\%$ .

NB : dans le film, le vaisseau spatial envoyé vers Jupiter contient une centrifugeuse de 6 mètres de rayon tournant à 3 tours par minute.

#### Force de Coriolis

Poole se déplace dans le vaisseau : il est soumis à la force d'inertie de Coriolis

$$\vec{f}_{iC} = -2m \vec{\Omega} \wedge \vec{v} = -2m \omega \vec{e}_z \wedge v_\theta \vec{e}_\theta = 2m \omega v_\theta \vec{e}_r$$

Si  $v_\theta > 0$ , c'est-à-dire si la vitesse de l'astronaute est dans le même sens que la vitesse du vaisseau (vitesse d'entraînement), l'astronaute semble alors plus lourd, comme soumis à une pesanteur  $g + \delta g$  avec

$$\delta g = 2\omega v_\theta$$

Si  $v = 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\delta g = 2 \times 0,56 \times \frac{10}{3,6} = 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  : il pèse 30% plus lourd !

Si au contraire  $v_\theta < 0$ , c'est-à-dire si la vitesse de l'astronaute est opposée à la vitesse du vaisseau (vitesse d'entraînement), l'astronaute semble alors moins lourd, comme soumis à une pesanteur  $g - \delta g$  avec

$$\delta g = 2\omega |v_\theta|$$

Cas limite : si  $|v_\theta| = R \omega$ , l'astronaute est en apesanteur, car il est fixe dans un référentiel galiléen.

Pour plus d'informations :

<http://www.scilog.fr/signal-sur-bruit/weightless-3-graviteartificielle-et-centrifugeuses/>

**Résolution de problème**  
**Le vaisseau spatial**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Relever les données utiles du texte et les nommer.</li> <li>– Faire un schéma du vaisseau spatial avec un repère adapté et les données précédentes.</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Exprimer le vecteur vitesse de l'astronaute qui court dans le repère choisi.</li> <li>– Évaluer la valeur numérique de la norme de ce vecteur vitesse.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– A quelles forces l'astronaute est-il soumis dans le référentiel du vaisseau s'il y est immobile ?</li> <li>– Comparer le précédent bilan des forces au cas d'un homme sur Terre.</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Refaire un bilan des forces ressenties par l'astronaute s'il court dans un sens, puis dans l'autre.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exprimer la force d'inertie d'entraînement.</li> <li>– Exprimer les variations de la force d'inertie d'entraînement massique suivant l'endroit du corps de l'astronaute.</li> <li>– En déduire des valeurs numériques du rayon du vaisseau et de sa vitesse angulaire.</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Estimer la norme de la force d'inertie de Coriolis ressentie par l'astronaute qui court.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Comparer la valeur du rayon du vaisseau spatial à celui qu'on pourrait estimer à partir des photographies.</li> </ul> <p>Pour les versions confirmé et expert :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Estimer le rapport de la norme de la force d'inertie de Coriolis ressentie par l'astronaute qui court à la force d'inertie d'entraînement.</li> </ul>

**Résolution de problème**  
**Le vaisseau spatial**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les données utiles du texte sont relevées et nommées.</li> <li>– Le dispositif est schématisé.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Le vecteur vitesse de l'astronaute qui court est exprimé convenablement.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Un bilan des forces ressenties par l'astronaute immobile dans le vaisseau est comparé au bilan des forces dans le cas d'un homme sur Terre.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La direction et le sens des forces d'inertie de Coriolis ressenties par l'astronaute s'il court dans un sens, puis dans l'autre sont déterminés.</li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La force d'inertie d'entraînement est exprimée.</li> <li>– Les variations de la force d'inertie d'entraînement massique sont discernées selon l'endroit du corps de l'astronaute.</li> <li>– Des valeurs numériques du rayon du vaisseau et de sa vitesse angulaire sont déduites des deux précédentes relations.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– La norme de la force d'inertie de Coriolis ressentie par l'astronaute qui court est exprimée et évaluée numériquement.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La valeur du rayon du vaisseau spatial est comparé à celui qu'on pourrait estimer à partir des photographies.</li> </ul> <p><u>Pour les versions confirmé et expert :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L'importance de la force d'inertie de Coriolis ressentie par l'astronaute qui court est estimée comparativement à la force d'inertie d'entraînement.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le verre d'eau dans un réfrigérateur

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les changements d'état - programme de première année.

Cette résolution de problème est à proposer après avoir présenté en cours la pression de vapeur saturante et le diagramme de phase de l'eau.

Dans la version proposée, le graphe représentant la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température est un point de départ pour la réflexion des étudiants sur l'équilibre liquide-vapeur.

La compétence Analyser joue un rôle majeur car l'élaboration des différentes hypothèses nécessaires à la résolution est difficile.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	3	4	2	3	2

## Cadre du programme officiel : Programme de première année de la filière PCSI

Notions et contenus	Capacités exigibles
États physiques et transformations de la matière – États de la matière : gaz, liquide, solide cristallin, solide amorphe et solide semi-cristallin, variétés allotropiques – Notion de phase. – Transformations physique, chimique, nucléaire. – Les transformations physiques : diagramme d'état (P,T)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reconnaître la nature d'une transformation.</li> <li>– Déterminer l'état physique d'une espèce chimique pour des conditions expérimentales données de P et T.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

Résolution de problème  
**Le verre d'eau dans un réfrigérateur**  
Enoncé

**niveau confirmé**

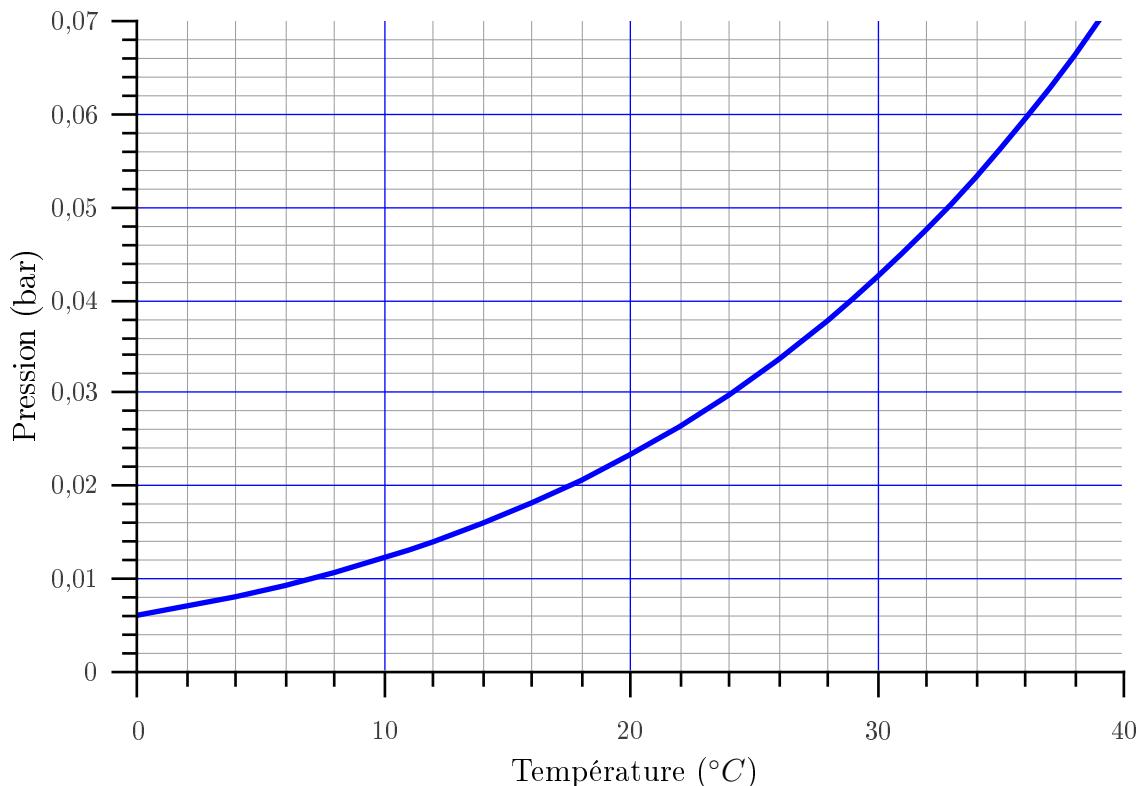
Un utilisateur place un verre d'eau dans un réfrigérateur. Il constate au bout de quelques jours que le niveau de l'eau dans le verre a baissé.



**Dans le cadre d'une utilisation normale du réfrigérateur, au bout de combien de temps le verre sera-t-il vide ?**

Document :

**Pression de vapeur saturante pour l'eau**



**Résolution de problème**  
**Le verre d'eau dans un réfrigérateur**  
**Exemple de résolution**

<b>S'approprier le problème.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> </ul>
----------------------------------	--

- Système : l'eau contenue dans le verre.
- Informations utiles dans les documents présentés :
  - la pression de vapeur saturante de l'eau à la température de l'intérieur du réfrigérateur.
- Dans le cas d'une utilisation normale du réfrigérateur, celui-ci est ouvert plusieurs fois par jour.

<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
-----------------	---

- Transformation mise en jeu :

L'évaporation atteint son équilibre dans le réfrigérateur entre deux ouvertures de porte (transformation physique = changement d'état, modélisé par  $H_2O_{(\ell)} \rightleftharpoons H_2O_{(g)}$ ), alors la pression partielle de l'eau dans l'enceinte atteint la pression de vapeur saturante de l'eau à  $4^\circ C$  qu'on détermine avec la courbe donnée, soit  $813Pa$ .

- Loi utile : la loi des gaz parfaits.

- Données supposées être connues :

- Masse volumique de l'eau :  $\rho_{eau} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ .
- Masse molaire de l'eau :  $M_{eau} = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
- Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

- Grandeur à estimer :

- Volume du verre d'eau environ  $V_{eau} = 100 \text{ mL}$ ,
- un réfrigérateur, modélisable comme un enceinte de volume environ  $V_{frigo} = 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 1,0 \text{ m} = 0,25 \text{ m}^3$ ,
- La pression à l'intérieur du réfrigérateur est environ la pression atmosphérique :  $P \approx 1 \text{ bar}$ .
- La température à l'intérieur du réfrigérateur de l'ordre de  $T = 4^\circ C = 277 \text{ K}$
- Environ le dixième de l'air est renouvelé quand l'utilisateur ouvre la porte.

- Hypothèses à faire :

- L'utilisateur ouvre le réfrigérateur une dizaine de fois par jour.
- On néglige la présence d'eau ailleurs que dans le verre : l'air de la cuisine est sec et l'humidité apportée par les autres aliments dans le réfrigérateur est négligeable.

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

La masse d'eau dans le verre est :  $m = V_{eau} \rho_{eau} = 100 \text{ g}$ .

La quantité de matière en eau dans ce verre est :  $v = \frac{V_{eau} \rho_{eau}}{M_{eau}} = 5,6 \text{ mol}$ .

Le changement d'état d'équation  $H_2O_{(\ell)} \rightleftharpoons H_2O_{(g)}$  conduit à un état d'équilibre et la quantité de matière contenue dans la vapeur saturante est  $n_g$ ; en approximant la vapeur saturante à un gaz parfait, on trouve la quantité de matière d'eau alors présente dans la phase gazeuse :  $n_g = \frac{P_{sat} V}{R T} = 0,087 \text{ mol}$ .

A chaque ouverture du réfrigérateur, la quantité de vapeur d'eau  $n_s$  quittant est  $n_s = 10\% n_g = 0,0087 \text{ mol}$ .

Après chaque ouverture, le changement d'état  $H_2O_{(\ell)} \rightleftharpoons H_2O_{(g)}$  conduit à un nouvel état d'équilibre de l'eau entre les deux phases, on a donc entre chaque ouverture de porte,  $n_s = 0,0087 \text{ mol}$  d'eau qui s'évaporent : la porte est ouverte 10 fois par jour, le nombre de jours  $N$  nécessaire à l'évaporation complète de l'eau dans le verre est donc :  $N = \frac{n}{10 n_s} = 64 \text{ jours}$ .

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li><li>- Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li></ul>
----------------	---

- Il faut vérifier la cohérence du résultat en critiquant les hypothèses faites :
- la proportion d'air renouvelé à chaque ouverture de porte repose sur une simple estimation, c'est donc une source d'incertitudes importante ;
  - on peut discuter le fait que seul le verre d'eau apporte de l'humidité. Ceci est une approximation forte car il y a beaucoup d'humidité dans un réfrigérateur : brique de lait ouverte, autres aliments présents ;
  - Il serait aussi possible de prendre en compte les capacités thermiques des autres éléments (diazote par exemple) présents, bien que celle de l'eau soit beaucoup plus élevée. L'hypothèse faite est donc bien plus légitime ;
  - pour aller plus loin, on pourrait discuter du fait que l'uniformité de la pression dans l'ensemble du réfrigérateur n'est pas assurée et que l'équilibre n'est peut-être pas atteint très rapidement dans l'ensemble de l'enceinte.

Résolution de problème  
**Le verre d'eau dans un réfrigérateur**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quel est le système étudié ?</li><li>- Quelles sont les informations utiles dans les documents présentés ?</li><li>- Quelles sont les grandeurs physiques pertinentes à introduire ?</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quelle est la transformation mise en jeu ?</li><li>- Quelles sont les grandeurs physiques utiles dont les valeur ne sont pas données mais que je peux évaluer ?</li><li>- Quelles sont les hypothèses à faire ?</li><li>- Quelles sont les lois physiques qui peuvent être utiles ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>- Quelle est la quantité de matière d'eau liquide dans le verre ?</li><li>- Quelle est la quantité de matière d'eau gazeuse dans l'air du réfrigérateur ?</li><li>- Quelle quantité de matière d'eau s'échappe à chaque ouverture du réfrigérateur ?</li><li>- Au bout de combien de jours toute l'eau s'est évaporée ?</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>- Le résultat paraît-il cohérent ?</li><li>- Quel regard critique peut-on poser sur le raisonnement mené et sur les hypothèses formulées ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**Le verre d'eau dans un réfrigérateur**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La pression de vapeur saturante est extraite du document et convertie dans les unités légales du système international.</li> </ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La transformation physique qui a lieu est analysée.</li> <li>– Les grandeurs utiles sont estimées et les hypothèses nécessaires à la résolution sont faites : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Volume du verre</li> <li>– Volume du réfrigérateur</li> <li>– Pression à l'intérieur du réfrigérateur</li> <li>– Température à l'intérieur du réfrigérateur</li> <li>– Quantité d'air renouvelée quand l'utilisateur ouvre la porte.</li> <li>– Nombre d'ouvertures du réfrigérateur par jour</li> <li>– Autres sources d'humidité négligées</li> </ul> </li> </ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les quantités de matière d'eau liquide et d'eau gazeuse dans la vapeur saturante sont exprimées.</li> <li>– Le calcul est mené à son terme pour connaître le nombre de jours recherché.</li> </ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La cohérence du résultat est vérifiée.</li> <li>– Un regard critique est apporté sur les approximations réalisées.</li> </ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>

# Le wifi

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les grandeurs relatives aux ondes électromagnétiques dans le vide  
- programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "initiation"	3	1	1	2	2

## Cadre du programme officiel : seconde année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Ondes électromagnétiques dans le vide  – Structure d'une onde plane progressive harmonique homogène.  – Aspects énergétiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Établir et décrire la structure d'une OPPHH.</li> <li>– Relier la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde.</li> <li>– Relier le flux du vecteur de Poynting à un flux de photons en utilisant la relation d'Einstein-Planck.</li> <li>– Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens (laser hélium-néon, flux solaire, téléphonie,etc...) et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche.

La dernière fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par compétences s'il le souhaite.

# Résolution de problème

## Le wifi

### Enoncé

### La dangerosité du Wi-Fi

**On s'interroge sur l'effet des émetteurs d'ondes électromagnétiques sur la santé**

#### Les antennes Wi-Fi

L'antenne tige basique omnidirectionnelle à 2,4 GHz (1/4 d'onde) ressemblant à un stylo est la plus rencontrée. Elle est omnidirectionnelle, et est dédiée à la desserte de proximité.

Référence : Article wikipédia sur le wifi

#### Le DAS

Le DAS (Débit d'Absorption Spécifique ou SAR en anglais) dont la mention doit figurer obligatoirement dans la notice du fabricant, exprimé en  $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ , représente la puissance absorbée par kilogramme de tissus et représente généralement un DAS local correspondant à l'absorption d'énergie au niveau de la tête. Elle est mesurée par rapport à un "fantôme", qui consiste en une tête moulée en résine et contenant un liquide aux propriétés d'absorption proches de celle d'une tête humaine. Une sonde plongée dans ce liquide permet de recueillir des mesures sur le mobile testé à émission maximale et dans diverses positions, selon un protocole validé par le CENELEC (Comité Européen de la Normalisation Electrotechnique). Le consensus adopté par l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) évalue à  $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  le seuil de puissance à partir duquel des effets nocifs peuvent apparaître.

Le DAS émis par les appareils WiFi est généralement de l'ordre de  $0,2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Référence : Site génération nouvelles technologies (disponible à l'adresse [www.generation-nt.com/dossier-radiofrequencies-sante-mobiles-article-95591-2.html](http://www.generation-nt.com/dossier-radiofrequencies-sante-mobiles-article-95591-2.html))

#### Niveaux de référence pour l'exposition de la population générale.

Ces niveaux sont donnés pour les conditions de couplage maximal du champ à la personne exposée, assurant ainsi une protection maximale.

Domaine de fréquence	$E$ en $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	$B$ en $\mu\text{T}$	densité de puissance en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
2 - 300 GHz	61	0,20	10

Référence : Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)

Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - N° 182, 1er trimestre 2001 - INRS



Antenne tige basique omnidirectionnelle à 2,4 GHz.



#### niveau initiation

Quelle doit être la puissance maximale d'une antenne WiFi pour qu'elle vérifie les normes en vigueur ? Estimer le DAS d'un tel dispositif.

# Résolution de problème

## Le wifi

### Exemple de résolution

<b>S'approprier le problème.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole.</li> </ul>
----------------------------------	--

L'émetteur wifi est omnidirectionnel : il émet une onde sphérique.

La taille de l'antenne est

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4\nu} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 2,45 \times 10^9} = 3 \text{ cm}$$

Les limites de  $E$  ( $E_{max} = 61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $B$  ( $B_{max} = 0,20 \mu\text{T}$ ) et  $\Pi$  ( $\Pi_{max} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) sont données dans le texte.

<b>Analyser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Organiser et exploiter ses connaissances ou les informations extraites.</li> <li>– Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.</li> <li>– Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées.</li> <li>– Établir une stratégie de résolution.</li> </ul>
-----------------	---

Il faut considérer que l'on se trouve à une distance  $r$  de l'antenne. On prendra  $r > r_{min} = 4 \text{ cm}$ .

La "densité de puissance" est, au plus,

$$\Pi_{max} = \frac{P_{max}}{4\pi r_{min}^2}$$

Il s'agit de déterminer  $P_{max}$  à partir des limites de  $E$ ,  $B$  et  $\Pi$  données dans le texte.

<b>Réaliser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> <li>– Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique.</li> </ul>
-----------------	--

Le calcul donne

$$P_{max} = 4\pi r_{min}^2 \Pi_{max} = 2\pi \times 0,04^2 \times 10 \approx 0,1 \text{ W}$$

Comme  $P_{max} = 4\pi r_{min}^2 < \Pi >$  avec

$$< \Pi > = c < e_{em} > = c \left( \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = c \left( \frac{\varepsilon_0 E_{max}^2}{4} + \frac{B_{max}^2}{4\mu_0} \right) = c \frac{\varepsilon_0 E_{max}^2}{2} = c \frac{B_{max}^2}{2\mu_0}$$

on trouve grâce au champ électrique de référence :

$$P_{max} = 4\pi r_{min}^2 c \frac{\varepsilon_0 E_{max}^2}{2} = 4\pi \times 0,04^2 \times 3 \times 10^8 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,5 \times 61^2 \approx 0,1 \text{ W}$$

on trouve grâce au champ magnétique de référence :

$$P_{max} = 4\pi r_{min}^2 c \frac{B_{max}^2}{2\mu_0} = 4\pi \times 0,04^2 \times 3 \times 10^8 \times 0,5 \times \frac{(2 \times 10^{-7})^2}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 0,1 \text{ W}$$

<b>Valider</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Discuter de la pertinence du résultat trouvé (identification des sources d'erreur, choix des modèles, formulation des hypothèses,...).</li> <li>– Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue</li> </ul>
----------------	--

Une autre modélisation possible du DAS est la suivante : la tête absorbe la moitié de la puissance, elle est assimilée à une sphère de rayon  $R \approx 10 \text{ cm}$ , d'eau (de masse volumique  $\mu = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , soit de masse

$$m = \frac{4}{3}\pi R^3 \mu \approx \frac{4}{3}\pi \times (0,1)^3 \times 10^3 \approx 4 \text{ kg}$$

On aurait donc un DAS du wifi, au maximum de  $0,025 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ , qui est 8 fois plus petit que ce qui est donné par le document, donc pas très éloigné.

NB : en fait la limite légale est... 100 mW !

**Résolution de problème**  
**Le wifi**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les limites légales données par le document.</li><li>– Déterminer la taille de l'antenne wifi.</li><li>– Classer les puissances du téléphone portable et du wifi.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– A quelle distance le wifi est-il le plus dangereux ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relier la puissance rayonnée au vecteur de Poynting, au champ électrique et au champ magnétique.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– La puissance du wifi trouvée est-elle cohérente avec les données du document sur le portable ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**Le wifi**  
**Exemples d'indicateurs de réussite**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Les limites légales données par le document sont nommées et leurs valeurs numériques notées.</li><li>– La taille de l'antenne wifi est déterminée.</li><li>– Les puissances du téléphone portable et du wifi sont classées.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– L'onde émise par l'antenne wifi est modélisée par une onde sphérique.</li><li>– La dangerosité reliée à la distance minimale d'approche de l'antenne.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– La puissance maximale est reliée à une (au moins) des grandeurs maximales suivantes : vecteur de Poynting, champ électrique et champ magnétique.</li><li>– La puissance maximale est reliée à toutes les grandeurs maximales suivantes : vecteur de Poynting, champ électrique et champ magnétique.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Le DAS du wifi est comparé à celui du portable.</li></ul>
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"><li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li><li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li></ul>

# Le cor des Alpes

---

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les ondes acoustiques (session de juin 2014 du baccalauréat S).

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau	2	2	2	2	2

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche (ces aides n'étaient pas disponibles lors de l'épreuve!).

Une fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences.

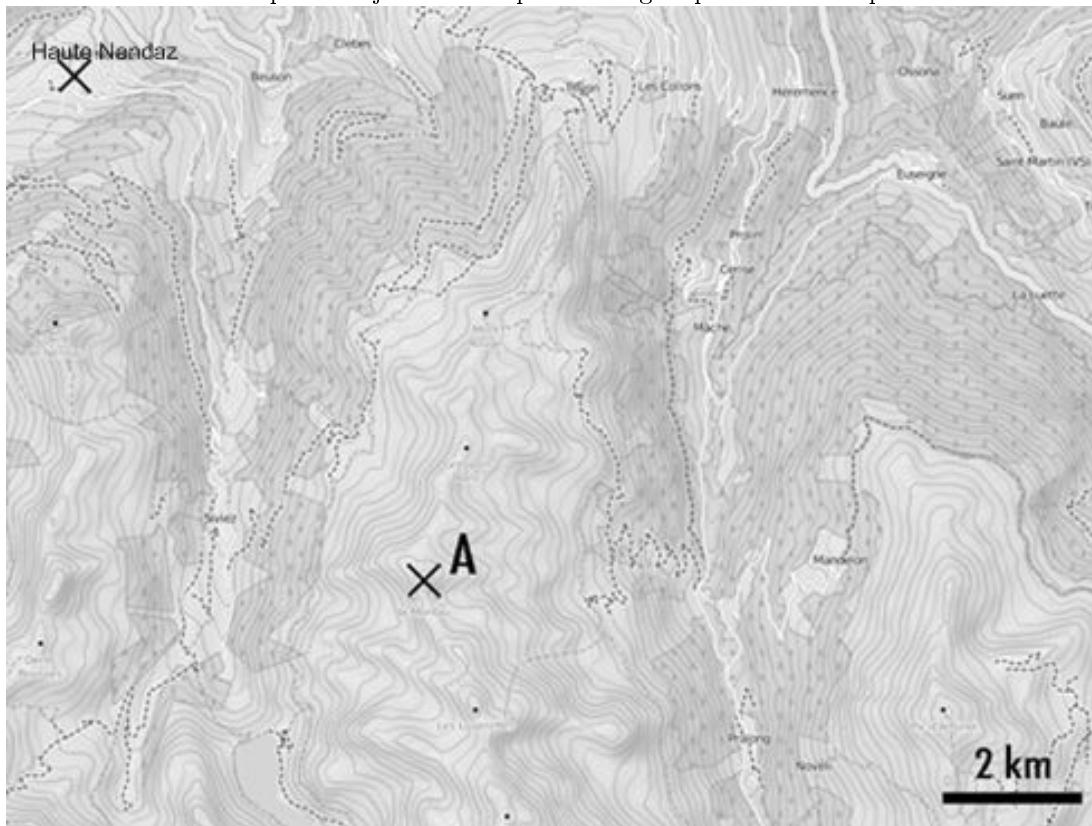
La dernière fiche propose des critères d'évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite.

# Résolution de problème

## Le cor des Alpes

### Enoncé

Chaque année, au mois de juillet, se déroule le festival international du cor des Alpes à Haute Nendaz, en Suisse. Cet instrument folklorique était jadis utilisé par les bergers pour communiquer entre eux.



Le berger, situé au sommet d'une colline (point A sur la carte) joue la note la plus grave de son cor des Alpes. Son instrument a une longueur de 3,4 m.

**Pourra-t-on l'entendre à Haute Nendaz si le niveau d'intensité sonore est de 100 dB à un mètre de l'instrument ?**

Hypothèses de travail :

- L'amortissement de l'onde n'est pas pris en compte : la dissipation d'énergie au cours de la propagation est négligeable.
- Le rayonnement de la source est supposé isotrope.

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie seront évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Les calculs numériques seront menés à leur terme avec rigueur. Il est aussi nécessaire d'apporter un regard critique sur le résultat et de discuter de la validité des hypothèses formulées.

**Donnée :**

Intensité acoustique de référence :  $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

**Document 1.** Valeurs de la célérité du son dans l'air en fonction de la température

Température en °C	10	20	30	40
Célérité en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	337	343	349	355

**Document 2.** Un instrument à vent : le cor des Alpes

Lorsque l'on souffle dans un cor des Alpes pour la première fois, il semble impossible d'en sortir un seul son harmonieux. Mais avec un peu de pratique, on peut apprendre à produire jusqu'à vingt-deux notes, ceci sans utiliser ni valves ni boutons. La gamme de notes réalisable sur cet instrument dépend d'abord de sa géométrie, puis du talent de celui qui en joue. Les premiers cors des Alpes datent du 14ème siècle, ils étaient traditionnellement utilisés par les gardiens de troupeaux pour communiquer entre eux sur des distances d'une dizaine de kilomètres. Cet instrument de la famille des cuivres est fait d'une seule pièce de bois, un tube recourbé à son extrémité et mesurant en général de deux à quatre mètres de long. Pour en jouer, le musicien souffle dans une embouchure. La note la plus grave est atteinte lorsque la longueur d'onde de la note fait deux fois la longueur du cor.

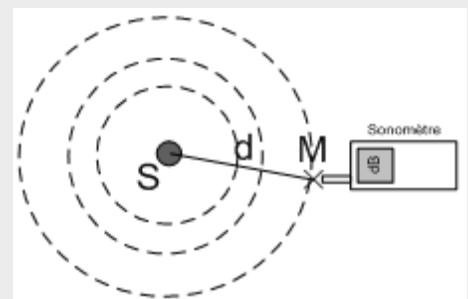
**Document 3.** L'intensité sonore d'une source isotrope

Pour une source isotrope (c'est-à-dire émettant la même énergie dans toutes les directions) de puissance  $P$ , l'intensité sonore  $I$  au point M dépend de la distance  $d$  à la source et s'exprime de la façon suivante :

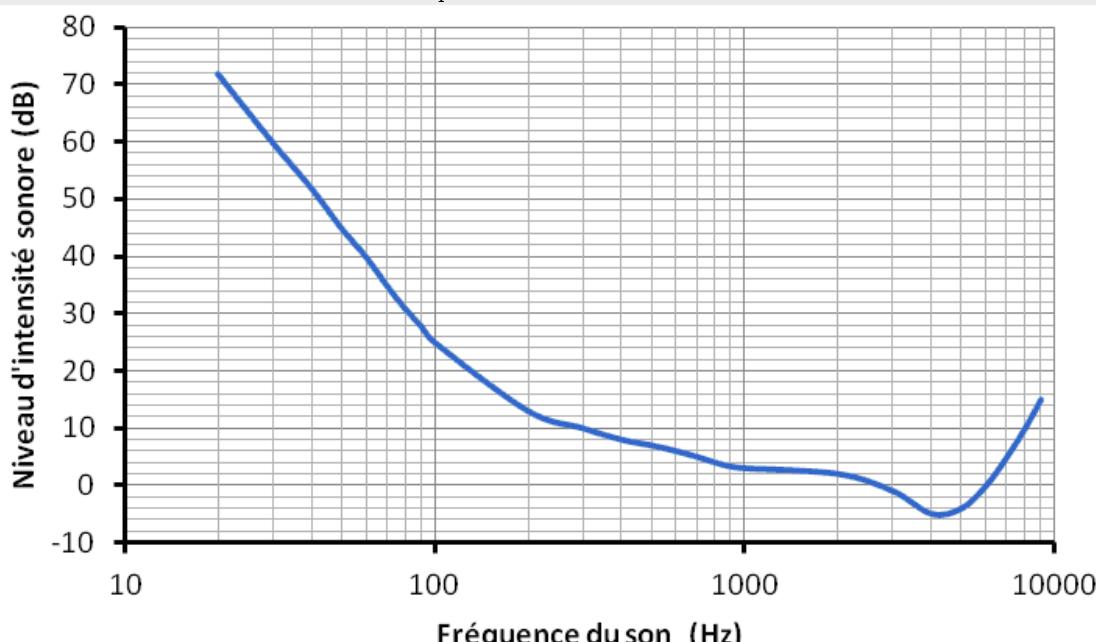
$$I = \frac{P}{4\pi d^2}$$

avec :

- $I$  en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  ;
- $P$  en W ;
- $d$  en m.

**Document 4.** Seuil d'audibilité en fonction de la fréquence

Le graphique suivant indique les valeurs minimales de niveau d'intensité sonore audible en fonction de la fréquence.



# Résolution de problème

## Le cor des Alpes

### Exemple de résolution

Détermination de la distance entre le berger et Haute Nendaz :  $d = 9 \text{ km}$ .

Fréquence du son joué :

Document 2 : « la note la plus grave possible sur l'instrument. Pour le cor des Alpes, elle est atteinte lorsque la longueur d'onde de la note fait deux fois la longueur du cor. »

Calcul de la fréquence à l'aide des données :  $v = \lambda f \Leftrightarrow f = \frac{v}{\lambda} = 50 \text{ Hz}$ .

On note  $d_A = 1 \text{ m}$  et  $d_B = 9,0 \text{ km}$ .  $I_A = \frac{P}{4\pi d_A^2}$  et  $I_B = \frac{P}{4\pi d_B^2}$  soit  $\frac{I_A}{I_B} = \frac{d_B^2}{d_A^2}$  (le point B désigne Haut Nendaz).

Méthode 1 :

Atténuation due à la distance :  $\Delta L = L_A - L_B = 10 \log \left( \frac{I_A}{I_0} \right) - 10 \log \left( \frac{I_B}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{I_A}{I_B} \right)$

donc  $\Delta L = 10 \log \left( \frac{d_B^2}{d_A^2} \right) = 20 \log \left( \frac{d_B}{d_A} \right) = 20 \log (9 \times 10^3) = 79 \text{ dB}$

Ainsi  $L_B = L_{Nendaz} = 100 - 79 = 21 \text{ dB}$ .

Méthode 2 :

A partir de la relation  $L_A = 10 \log \left( \frac{I_A}{I_0} \right)$ , on calcule  $I_A$  :  $I_A = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

On en déduit  $I_B$  :  $I_B = 1,2 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

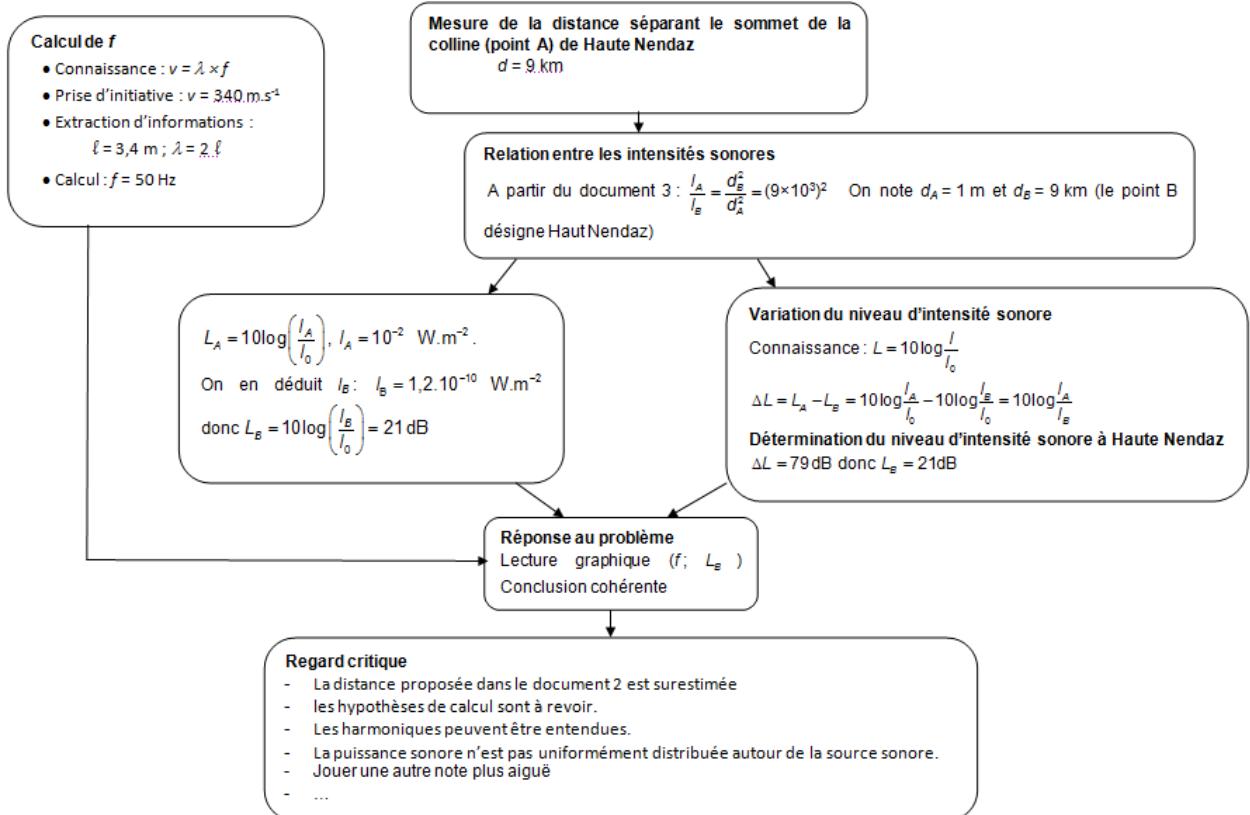
et donc  $L_B = L_{Nendaz} = 10 \log \left( \frac{I_B}{I_0} \right) = 21 \text{ dB}$ .

Conclusion :

lecture sur la courbe : à la fréquence de 50 Hz, ce son est inaudible pour l'oreille humaine. Le cor ne sera pas entendu.

Esprit critique :

- La distance proposée dans le document 2 est surestimée ou les hypothèses de calcul sont à revoir.
- Les harmoniques peuvent être entendues.
- Pour une source ponctuelle directive, la puissance sonore n'est pas uniformément distribuée autour de la source sonore.
- Jouer une autre note plus aiguë...



**Résolution de problème**  
**Le cor des Alpes**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est la distance séparant le sommet de la colline (point A) de Haute Nendaz ?</li><li>– Quelle est la longueur d'onde du cor ?</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Rappeler la relation entre intensité sonore et niveau sonore.</li><li>– Quel est le rapport des intensités sonores pour deux distances depuis le cor ?</li><li>– Comment relier la longueur d'onde d'émission du cor à la longueur de l'instrument ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Calculer la fréquence d'émission du cor.</li><li>– Déterminer le niveau d'intensité sonore à Haute Nendaz.</li><li>– En comparant le niveau d'intensité sonore à Haute Nendaz et la courbe du document 4, répondre à la question.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Si la fréquence augmente, a-t-on plus de chance d'entendre le cor ?</li></ul>

## Résolution de problème Le cor des Alpes

### Évaluation de l'activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences

- La grille permet d'apprécier, selon quatre niveaux (A, B, C, D), le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice. Pour cela, elle s'appuie sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution.
  - Dans cet exercice la compétence « réaliser » est particulièrement sollicitée, sa contribution dans l'évaluation a un poids double par rapport aux autres ; elle dispose donc de deux lignes dans la grille de compétence. Ainsi, lors de l'évaluation de la compétence « réaliser », le correcteur place une croix dans chacune des deux lignes correspondant à cette compétence ; ces deux croix doivent être dans la même colonne correspondant au niveau choisi (A, B, C ou D).
- 
- Niveau A : les indicateurs de réussite apparaissent dans leur (quasi) totalité.
  - Niveau B : les indicateurs de réussite apparaissent partiellement.
  - Niveau C : les indicateurs de réussite apparaissent de manière insuffisante.
  - Niveau D : les indicateurs de réussite ne sont pas présents.

L'exercice sera évalué globalement en fonction de la position des différentes croix dans la grille suivant des indications précisées ci-dessous.

En fonction de la position des croix dans la grille de compétences, le correcteur donne une note en point entier, en portant un regard global en deux étapes sur la grille et en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

Première étape :

- majorité de A et de B : note entre 3 et 5
- majorité de C et de D : note entre 0 et 3

Deuxième étape :

- majorité de A : note entre 4 et 5 (majorité de A et aucun C ou D : 5)
- majorité de B : note entre 2 et 4 (uniquement des B : 3)
- majorité de C : note entre 1 et 3 (uniquement des C : 2)
- majorité de D : note entre 0 et 2 (uniquement des D : 0; dès qu'il y a d'autres niveaux que le D : 1 ou 2)

Indicateurs de réussite

Compétences	Indicateurs de réussite	A	B	C	D
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'étudiant a identifié les grandeurs pertinentes et leur a attribué un symbole : fréquence <math>f</math>, longueur d'onde <math>\lambda</math>, intensité sonore <math>I</math>, niveau d'intensité sonore <math>L</math>.</li> <li>- L'étudiant a évalué quantitativement les grandeurs physiques non précisées : célérité du son <math>v_{son}</math>, distance cor-Haut Nendaz <math>d</math>, longueur du cor <math>\ell</math>.</li> </ul>				
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'étudiant a proposé et énoncé les lois qui semblent pertinentes pour la résolution : <math>v_{son} = \lambda f</math>, <math>L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)</math>, <math>I = \frac{P}{4\pi d^2}</math>.</li> <li>- L'étudiant a établi les étapes de la résolution à partir des lois identifiées : les différents éléments de la démarche sont proposés et sont aboutis.</li> </ul>				
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'étudiant a mené la démarche afin de répondre explicitement à la problématique posée : les éléments de la démarche apparaissent dans un ordre cohérent pour répondre au problème.</li> <li>- L'étudiant a établi les relations littérales entre les grandeurs intervenant dans le problème par exemple et selon la démarche choisie : <math>f = \frac{v}{\lambda}</math>, <math>\frac{I_A}{I_B} = \frac{d_B^2}{d_A^2}</math> et <math>\Delta L = 10 \log\left(\frac{I_A}{I_B}\right)</math>.</li> <li>- L'étudiant a réalisé les calculs analytiques et numériques et exprime le résultat : les calculs ont été menés correctement et les résultats ont été exprimés avec l'unité adaptée.</li> </ul>				
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'étudiant a répondu à la question posée : la réponse au problème est donnée par une argumentation (lecture graphique).</li> <li>- L'étudiant a porté un regard critique sur le résultat obtenu : un élément critique a été proposé.</li> </ul>				

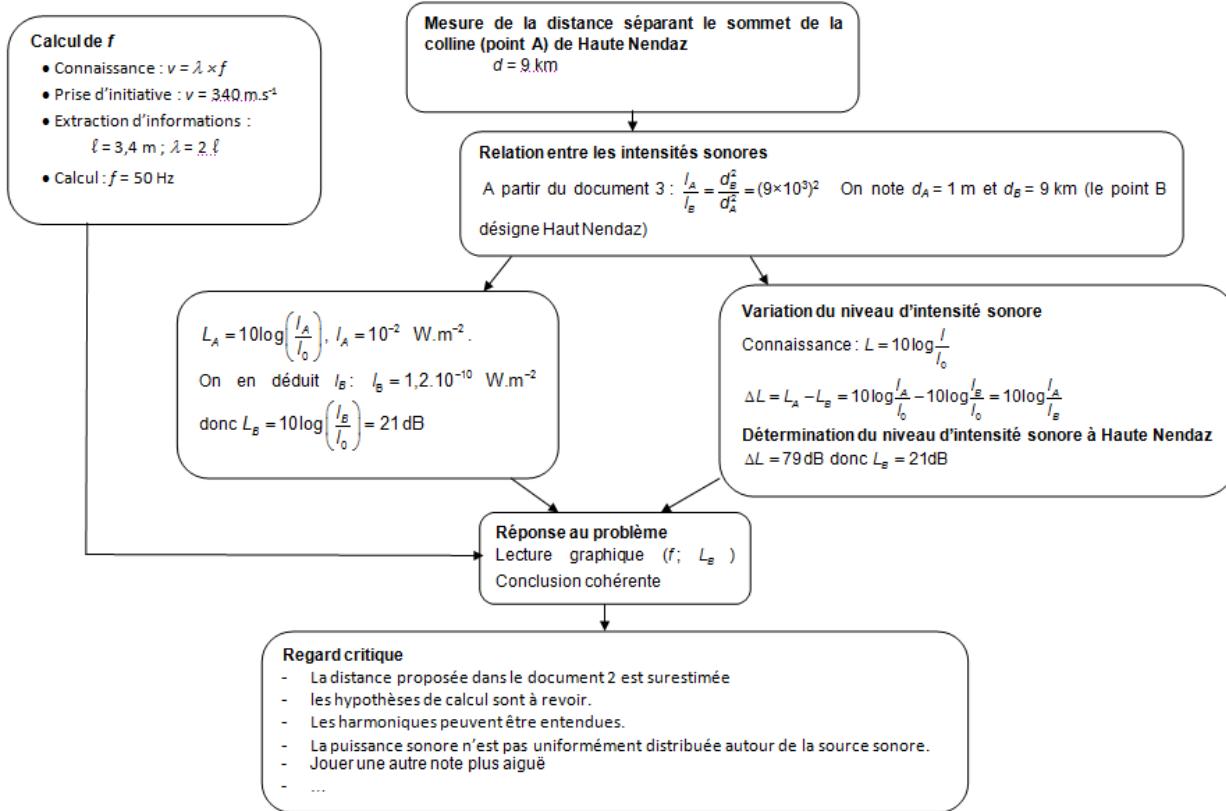
# Résolution de problème

## Le cor des Alpes

### Évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite

#### Schéma d'analyse des démarches

Le correcteur fonde son évaluation sur l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès par le candidat pour traiter l'exercice :



NB : Il convient de s'adapter car on ne peut pas lister toutes les démarches possibles.

#### Attribution d'une note sur 5

L'exercice est évalué globalement en fonction de l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

<b>Pas de résolution</b>	0 : aucun élément valorisable. 1 : peu d'indicateurs valorisables
<b>Résolution partielle</b>	2 : des indicateurs valorisables 3 : les indicateurs précédents + un début pertinent d'analyse du principe de résolution.
<b>Résolution satisfaisante</b>	4 : les indicateurs précédents + un schéma d'analyse pertinent du principe de résolution avec un début de mise en œuvre. 5 : les indicateurs précédents + une mise en œuvre crédible et/ou une analyse critique des résultats.

NB : Le doute doit bénéficier au candidat car on n'est pas dans un schéma habituel de résolution d'un exercice guidé. D'autre part, une résolution à 5 points n'est pas forcément parfaite mais toutes les étapes sont présentes et pertinentes ; par exemple, on accepte une faute numérique finale si elle est suivie d'une bonne analyse.

# Combien de photons pour une photo ?

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème donnée au Capes 2013 - programme de première année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	3	2	2	2	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Introduction au monde quantique – Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. – Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie.	– Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche (ces aides n'étaient pas disponibles lors de l'épreuve!).

Une fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences.

La dernière fiche propose des critères d'évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite.

# Résolution de problème

## Combien de photons pour une photo ?

### Enoncé

Nous allons ici considérer le cas de la photographie numérique, avec comme objectif la détermination du nombre de photons par pixel nécessaires à la réalisation d'une photographie de qualité.

Pour cette détermination, le candidat pourra s'appuyer sur les documents ci-dessous et introduire toute grandeur qu'il jugera utile à la résolution du problème. Certaines informations données ne sont pas directement utiles à la résolution et d'autres, qui relèvent de la culture générale, ne sont pas rappelées ; le candidat devra donc faire preuve d'initiative.

**Document numéro 1 :**

Les données techniques relevées sur le site d'un revendeur d'appareils photos, concernant un appareil reflex moyen gamme sont :

- Taille du capteur C.C.D. :  $18 \times 13,5 \text{ mm}^2$
- Nombre de pixels : 12 millions
- Focale de l'objectif : 50 mm
- Ouverture de l'objectif : f/3,5-5,6
- Vitesse d'obturation : de 60 à 1/4000 sec.

**Document numéro 2 :**

Photo de l'appareil photo



**Document numéro 3 :**

D'après l'article "La lumière, c'est combien de photons" ; Pour la Science ; Octobre Décembre 2006

*Texte 1 :*

Compter les photons à l'unité c'est ce que réalisent les détecteurs des appareils photos numériques : les C.C.D. (charge coupling device). Le détecteur C.C.D. est un damier de détecteurs élémentaires, les photosites. Chacun d'eux est composé d'une jonction de matériaux semi-conducteurs. Chaque photon incident extrait un électron de l'un des matériaux de la jonction. L'électron libéré traverse la jonction et est collecté dans un condensateur électrique associé à chaque photosite.

*Texte 2 :*

L'énergie solaire qui nous parvient du Soleil atteint un kilowatt par mètre carré lorsque le Soleil est au zénith. Lors d'une prise de vue de jour, les objets éclairés renvoient dans toutes les directions la lumière solaire. Le flux de photons nous parvenant de ces objets vaut un centième du flux solaire.

*Texte 3 :*

Les photons arrivent au hasard sur le détecteur, à la manière des gouttes de pluies sur une vitre de voiture. Le nombre de photons reçus par pixel fluctue d'une grandeur égale à la racine carrée de la moyenne de ce nombre. Si l'on photographie une page uniformément blanche de sorte que 100 photons arrivent en moyenne sur un pixel, on constate que le nombre de photons reçus par pixel varie de 90 à 110. De telles variations de 10 % sont visibles sur l'image. En revanche pour 10000 photons en moyenne les fluctuations typiques sont de 100, soit de un pour cent : elles restent invisibles à l'œil.

---

### niveau confirmé

---

À partir de ces documents et en introduisant toute grandeur pertinente utile à votre résolution, déterminer un ordre de grandeur du nombre de photons qui, en plein jour, parviennent sur un pixel de l'appareil photo envisagé. On explicitera la démarche et on analysera soigneusement le résultat obtenu.

Résolution de problème  
**Combien de photons pour une photo ?**  
Exemple de résolution

---

**Passage d'une puissance surfacique à une puissance.**

On note  $\Phi$  la puissance surfacique et  $d$  le diamètre de l'objectif à l'entrée de l'appareil photo. On évalue la puissance  $P$  qui rentre dans l'appareil photo, on supposera par la suite que celle-ci est reçue par le capteur CCD. On a donc  $P = \Phi \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ . On trouve numériquement  $P = 6 \times 10^{-3}$  W. Naturellement un candidat connaisseur pourra faire intervenir le diaphragme qui limite en réalité le flux lumineux. Par exemple pour une ouverture de f/3,5, ce diaphragme à un diamètre de  $50/3,5 = 14$  mm environ.

**Passage d'une puissance à une énergie.**

On suppose qu'il y a beaucoup de lumière et on multiplie par le temps de pose le plus court :  $\Delta t = 1/4000$  s, l'énergie reçue  $E$  vaut donc  $E = P \Delta t = 1,5 \times 10^{-6}$  J.

**Passage d'une énergie à un nombre de photons.**

L'énergie d'un photon est donnée par l'expression  $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ; on peut prendre une longueur d'onde représentative du domaine du visible :  $\lambda = 550$  nm par exemple. On en déduit que le nombre de photons  $N$  reçu par le capteur CCD est égal à :  $N = \frac{E}{\frac{hc}{\lambda}} = 4 \times 10^{12}$ .

**Nombre de photons reçus par pixel.**

Il suffit de diviser le résultat précédent par le nombre de pixels du capteur CCD pour trouver le nombre  $n$  de photons reçus par un pixel :  $n \approx 300\,000$ .

**Commentaire.** Le nombre de photons reçu est suffisant, les fluctuations sont de 500 environ et donc représentent 0,2 % ... la photo réalisée est donc techniquement de qualité.

Résolution de problème  
**Combien de photons pour une photo ?**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relever les données du texte et les nommer.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Relier la puissance surfacique et le diamètre de l'objectif à l'entrée de l'appareil photo.</li><li>– Rappeler les relations entre énergie, puissance et puissance surfacique.</li><li>– Rappeler les relations entre l'énergie d'un photon et les caractéristiques de l'onde qui lui est associée.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Exprimer le nombre de photons lors d'une prise de vue en fonction des données du problème.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Exprimer les fluctuations et vérifier que la photo réalisée est techniquement de qualité.</li></ul>

## Résolution de problème

# Combien de photons pour une photo ?

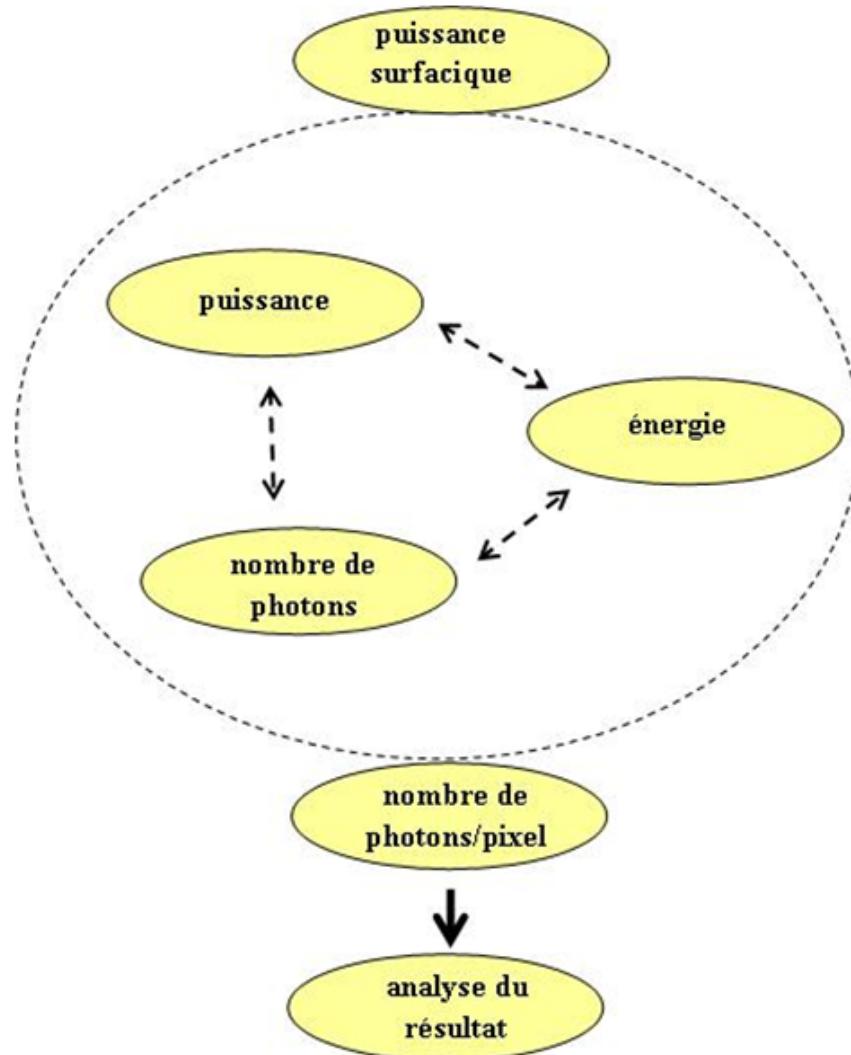
Évaluation de l'activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences

Indicateurs de réussite

Compétences	Indicateurs de réussite	Niveau de maîtrise	poids
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– identifier et nommer les grandeurs physiques pertinentes : <math>P</math>, <math>E</math>, <math>\lambda</math>...</li> <li>– lire attentivement des documents :</li> <li>– extraire des valeurs numériques de grandeurs pertinentes : nombre de pixels, vitesse d'obturation, diamètre de l'objectif, flux solaire parvenant aux objets,...</li> <li>– donner du sens au texte : « juger de la qualité d'une photo »</li> </ul>		1
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– identifier les principales étapes de la résolution</li> <li>– introduire l'idée d'un comptage de photons</li> <li>– proposer un schéma de résolution (cf. plus bas)</li> </ul>		1
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– utiliser les lois adaptées reliant les différentes grandeurs : puissance-surfacique/puissance, puissance-énergie, énergie</li> <li>– vérifier l'homogénéité des formules, effectuer correctement les applications numériques et utiliser les unités adaptées</li> </ul>		1
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– identifier d'éventuelles valeurs aberrantes</li> <li>– juger de la qualité de la photo</li> </ul>		1
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>		1

**Schéma de résolution :**

Le schéma en tant que tel n'est pas demandé, il ne doit pas être exigé. Il est donc facultatif en tant que schéma mais la réponse doit faire apparaître sous une forme ou une autre les étapes de la résolution.

**Attribution d'une note à partir des compétences évaluées****Première méthode : évaluation par des lettres des niveaux de maîtrise**

Le correcteur apprécie, selon quatre niveaux (A, B, C, D), le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice :

- Niveau A : les indicateurs de réussite apparaissent dans leur (quasi) totalité.
- Niveau B : les indicateurs de réussite apparaissent partiellement.
- Niveau C : les indicateurs de réussite apparaissent de manière insuffisante.
- Niveau D : les indicateurs de réussite ne sont pas présents.

Pour cela, il s'appuie sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), en mettant autant de fois la lettre voulue que la compétence a de poids.

L'exercice est évalué en fonction des niveaux de maîtrise relevés, en portant un regard en deux étapes sur la grille et en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

- Première étape :
  - majorité de A et de B : note entre 3 et 5
  - majorité de C et de D : note entre 0 et 3
- Deuxième étape :
  - majorité de A : note entre 4 et 5 (majorité de A et aucun C ou D : 5)
  - majorité de B : note entre 2 et 4 (uniquement des B : 3)
  - majorité de C : note entre 1 et 3 (uniquement des C : 2)
  - majorité de D : note entre 0 et 2 (uniquement des D : 0; dès qu'il y a d'autres niveaux que le D : 1 ou 2)

**Seconde méthode : évaluation chiffrée des niveaux de maîtrise**

En s'appuyant sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), le correcteur apprécie le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice en mettant une note à la compétence entre :

- 0 (les indicateurs de réussite ne sont pas présents)
- et le poids attribué à la compétence (les indicateurs de réussite apparaissent dans leur quasi totalité).

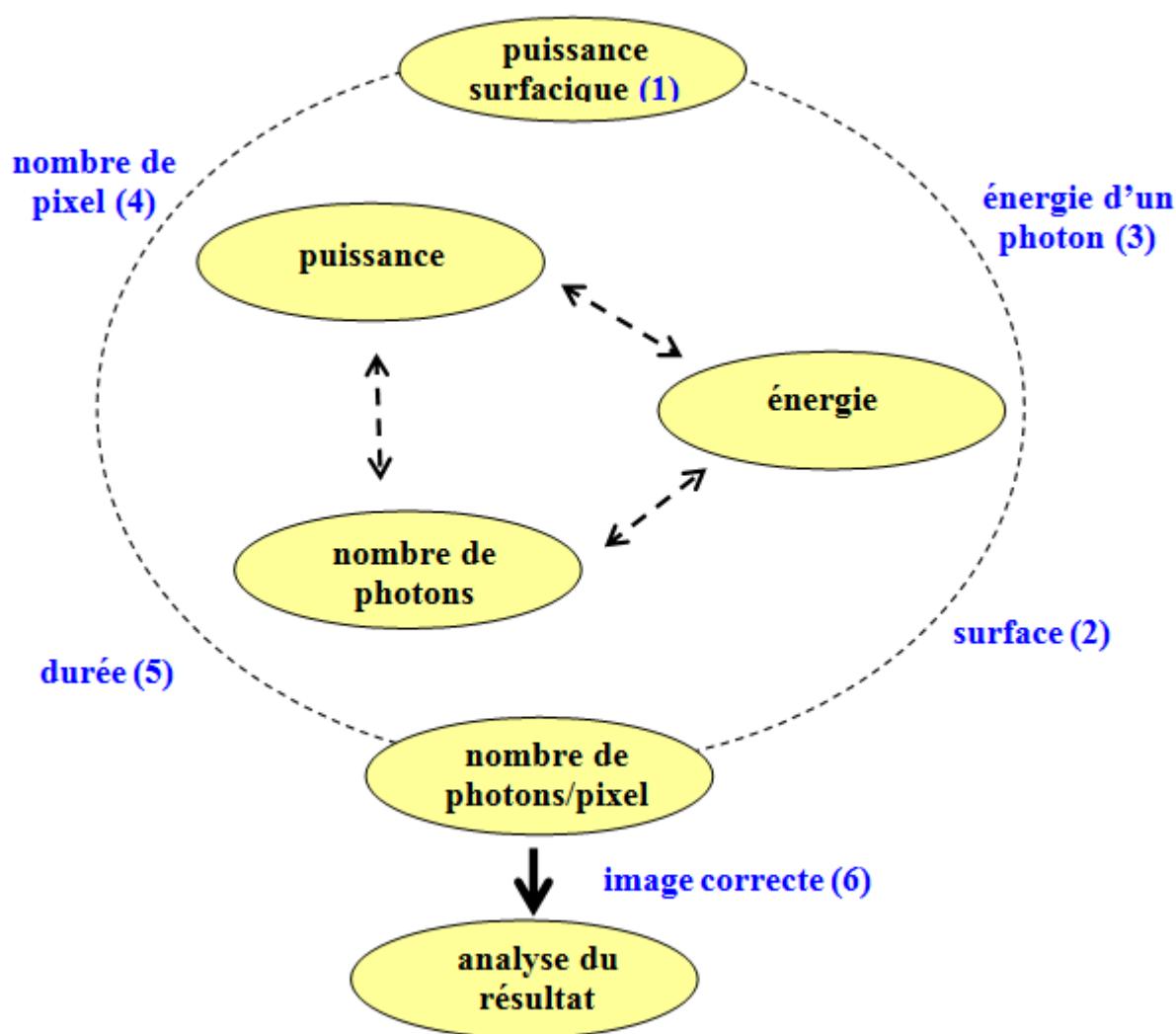
# Résolution de problème

## Combien de photons pour une photo ?

Évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite

### Schéma d'analyse des démarches

Le correcteur fonde son évaluation sur l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès par le candidat pour traiter l'exercice :



NB : Il convient de s'adapter car on ne peut pas lister toutes les démarches possibles.

### Les données clés :

- donnée 1 : la puissance surfacique moyenne disponible lors d'une prise de vue (texte 2).
- donnée 2 : la surface traversée par les photons qui parviennent au capteur CCD. A priori on prendra une surface de diamètre 2,7 cm car la définition de l'ouverture d'un appareil photographique n'est en général pas connue et n'est pas rappelée (documents 1 et 2).
- donnée 3 : énergie d'un photon typique du visible, cette donnée est absente, le candidat doit faire preuve d'initiative.
- donnée 4 : nombre de pixels atteints par la lumière (document 1 : le choix est fixé)
- donnée 5 : la durée de l'ouverture (document 1, là encore le candidat doit faire preuve d'initiative)
- donnée 6 : le nombre de photons par pixel permettant d'avoir une image correcte (texte 3)

NB : Les données 1 et 6 ne jouent pas le même rôle que les autres car ce sont des points de départ ou d'arrivée pratiquement imposés. On identifie ainsi une étape comme le passage d'une bulle à une autre. Une étape se réalise en utilisant une donnée de manière cohérente. Il faut s'adapter à l'analyse du candidat par exemple on peut imaginer une première étape où un candidat évalue un nombre de photons par unité de temps et de surface en utilisant la donnée 3 (une étape) ou bien un nombre de photon par unité de surface pour une durée cohérente (données 3 et 5), on considère alors qu'il a fait deux étapes en une.

**Attribution d'une note sur 5**

L'exercice est évalué globalement en fonction de l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

<b>Pas de résolution</b>	0 : aucun élément valorisable. 1 : peu d'indicateurs valorisables
<b>Résolution partielle</b>	2 : des indicateurs valorisables 3 : les indicateurs précédents + un début pertinent d'analyse du principe de résolution.
<b>Résolution satisfaisante</b>	4 : les indicateurs précédents + un schéma d'analyse pertinent du principe de résolution avec un début de mise en œuvre. 5 : les indicateurs précédents + une mise en œuvre crédible et/ou une analyse critique des résultats.

NB : Le doute doit bénéficier au candidat car on n'est pas dans un schéma habituel de résolution d'un exercice guidé. D'autre part, une résolution à 5 points n'est pas forcément parfaite mais toutes les étapes sont présentes et pertinentes ; par exemple, on accepte une faute numérique finale si elle est suivie d'une bonne analyse.

# La masse du diazote de l'atmosphère

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème sans aucune donnée (épreuve de chimie - CAPES 2013) - programme de première année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "confirmé"	3	2	1	3	2

## Cadre du programme officiel : première année

Notions et contenus	Capacités exigibles
Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre <ul style="list-style-type: none"> <li>– État d'équilibre d'un système soumis aux seules forces de pression.</li> <li>– Pression, température, volume, équation d'état.</li> <li>– Grandeur extensive, grandeur intensive.</li> <li>– Exemples du gaz parfait.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique.</li> <li>– Connaître quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température.</li> <li>– Connaître et utiliser l'équation d'état des gaz parfaits.</li> </ul>

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche (ces aides n'étaient pas disponibles lors de l'épreuve!).

Une fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences.

La dernière fiche propose des critères d'évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite.

Résolution de problème

# La masse du diazote de l'atmosphère

Enoncé

---

---

## niveau confirmé

---

Évaluer l'ordre de grandeur de la masse de diazote contenue dans l'atmosphère terrestre.

On expliquera les différentes étapes du calcul, les données choisies et les approximations faites.

(Remarque : cette question très ouverte fait appel à l'élaboration d'une démarche de résolution au cours de laquelle des données non fournies peuvent être utilisées ; ces dernières sont considérées comme devant faire partie de la culture générale scientifique attendue d'un futur enseignant).

# Résolution de problème

## La masse du diazote de l'atmosphère

### Exemple de résolution

#### Première approche : autour de la loi du gaz parfait.

Dans le cadre d'un sujet de chimie, il semble naturel, dans l'étude d'un gaz avec le but de déterminer la masse de l'un de ses constituants, de s'orienter vers la loi des gaz parfait. Nous verrons que cette méthode n'est pas du tout la « meilleure » au sens où elle nécessite la formulation de nombreuses hypothèses parfois difficiles à légitimer.

#### Schéma général :

On évalue la quantité de matière (exprimée en moles) de gaz à l'aide de la loi des gaz parfait :  $PV = nRT$ . Pour cela il nous faut formuler des hypothèses et proposer des valeurs numériques pour les différentes grandeurs physiques introduites. On utilisera ensuite la composition moyenne de l'air et on en déduira la masse totale de diazote.

#### Mise en œuvre :

- ▷ On assimile l'atmosphère à un volume de gaz isotherme (température  $T$ ), de volume  $V = SH$  où  $S$  représente la surface de la Terre et  $H$  la hauteur de l'atmosphère. La pression  $P$  est supposée uniforme.
- ▷ Ordres de grandeur : on suppose  $S = 4\pi R_T^2$  avec  $R_T = 6400$  km. On choisit pour  $H$  une hauteur de 20 km qui semble raisonnable compte tenu de raréfaction progressive de l'atmosphère avec une échelle typique de 10 km. La température est prise égale à 283 K (10° C) qui constitue une moyenne raisonnable de la température au sol et  $P_0 = 10^5$  Pa. On trouve ainsi environ  $n = 4,4 \times 10^{20}$  mol de gaz.
- ▷ La quantité de matière de  $N_2$  est  $0,8 \times n = 3,5 \times 10^{20}$  mol et sa masse  $M(N_2) \approx 10^{19}$  kg en prenant une masse molaire du diazote égale à 28 g/mol.

#### Commentaires :

On peut analyser l'ordre de grandeur, mais ce n'est pas si simple car on dispose de peu de référence en la matière... en tout cas c'est très inférieur à la masse de la Terre !

On peut identifier les « maillons faibles » de cette démarche : choix de  $H$ , valeur de la température, valeur de la pression... en réalité on sait qu'un modèle d'atmosphère isotherme induit une diminution de la pression suivant la loi du nivellation barométrique, le modèle isotherme étant lui-même fragile car la température diminue dans un premier temps avec l'altitude. Une mise en œuvre du modèle isotherme est possible mais n'apporte rien par rapport à la seconde méthode développée ci-dessous.

#### Seconde approche : autour de l'équilibre mécanique d'une colonne d'air.

Cette approche est davantage celle du physicien car elle se réfère à un équilibre mécanique, elle est sans doute moins naturelle dans le contexte d'un problème de chimie, mais plus fiable car les hypothèses sont moins nombreuses et plus facilement contrôlables.

#### Schéma général :

Il s'agit simplement de relier la pression au niveau du sol, au poids par unité de surface de la colonne d'air située à la verticale.

#### Mise en œuvre :

- ▷ La relation de base traduit l'équilibre de la colonne d'air de masse  $m$  de section  $s$  située au dessus d'un point  $M$  du sol :  $P_0 s = mg$ . On suppose ici que  $g$  est uniforme donc que la hauteur d'atmosphère est faible devant le rayon de la Terre. Ce qui est raisonnable ( $H = 100$  km  $\ll R_T = 6400$  km).

En extrapolant à la Terre dans sa totalité, ce qui est possible toujours en raison de l'inégalité précédente, on obtient sans difficultés :  $M = \frac{P_0 4\pi R_T^2}{g}$ .

- ▷ On évalue alors la masse de diazote  $M(N_2)$  en multipliant par la fraction massique du diazote  $w$  (voisine de 0,8 car  $N_2$  et  $O_2$  ont des masses molaires voisines). En prenant  $R_T = 6400$  km,  $P_0 = 10^5$  Pa et  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  et  $w = 0,8$ ; on trouve  $(N_2) = w \frac{P_0 4\pi R_T^2}{g} \approx 4 \times 10^{19}$  kg.

#### Commentaires :

▷ Les hypothèses sont plus limitées et davantage testables :  $g$  et  $P_0$  uniformes. Nulle hypothèse n'est faite sur la nature du gaz, sa température...

▷ On peut chiffrer la précision de cette évaluation à moins de 10 % car chaque hypothèse peut induire des variations n'excédant pas plus de quelques pourcents.

Résolution de problème  
**La masse du diazote de l'atmosphère**  
Aides à la résolution

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quelle est la valeur de la pression atmosphérique ?</li><li>– Quelle est la composition de l'air ?</li><li>– Quelle est sa température moyenne ?</li><li>– Quel est le rayon de la Terre ?</li><li>– Estimer un ordre de grandeur de la hauteur de l'atmosphère.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Utiliser la loi des gaz parfaits ou bien l'équilibre statique d'une tranche d'atmosphère.</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Mener les calculs à leur terme en faisant attention aux unités pour faire l'application numérique.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quels sont les « maillons faibles » de la démarche ?</li></ul>

**Résolution de problème**  
**La masse du diazote de l'atmosphère**

**Évaluation de l'activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences**

**Indicateurs de réussite**

Compétences	Indicateurs de réussite	Niveau de maîtrise	poids
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les grandeurs physiques pertinentes sont identifiées, un symbole leur sont attribué : <math>P_0, V, T, g\dots</math></li> <li>– Le domaine de la physique ou de la chimie dont relève cette problématique est identifié. (Ici l'approche peut-être assez différente).</li> </ul>		1
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les lois physiques qui seront utilisées (gaz parfait ou équilibre mécanique d'un système) sont énoncées.</li> <li>– Les étapes principales de la résolution sont identifiées.</li> <li>– Les hypothèses à formuler pour accéder à différents ordres de grandeur sont identifiées.</li> </ul>		1
Réaliser	<p>La difficulté réside essentiellement dans la donnée d'ordres de grandeur qui relèvent de la culture scientifique et à l'initiative dont on doit faire preuve concernant les prises de décision.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les grandeurs comme le volume du gaz, la pression, la température, l'uniformité de l'accélération de pesanteur... sont évaluées éventuellement.</li> <li>– Les ordres de grandeur (éventuellement utiles) : surface de la Terre, hauteur de l'atmosphère, composition de l'air, pression atmosphérique, masse molaire de <math>N_2</math>, température moyenne... sont donnés.</li> <li>– La démarche est menée jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée.</li> </ul>		1
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'étudiant s'est assuré qu'il a répondu à la question posée.</li> <li>– Les conséquences du résultat obtenu sont analysées en s'appuyant sur les connaissances et le « bon sens ».</li> <li>– Les approximations faites et les « maillons faibles » de la démarche sont identifiés.</li> </ul>		1
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>– Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>		1

### **Attribution d'une note à partir des compétences évaluées**

#### **Première méthode : évaluation par des lettres des niveaux de maîtrise**

Le correcteur apprécie, selon quatre niveaux (A, B, C, D), le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice :

- Niveau A : les indicateurs de réussite apparaissent dans leur (quasi) totalité.
- Niveau B : les indicateurs de réussite apparaissent partiellement.
- Niveau C : les indicateurs de réussite apparaissent de manière insuffisante.
- Niveau D : les indicateurs de réussite ne sont pas présents.

Pour cela, il s'appuie sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), en mettant autant de fois la lettre voulue que la compétence a de poids.

L'exercice est évalué en fonction des niveaux de maîtrise relevés, en portant un regard en deux étapes sur la grille et en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

- Première étape :
  - majorité de A et de B : note entre 3 et 5
  - majorité de C et de D : note entre 0 et 3
- Deuxième étape :
  - majorité de A : note entre 4 et 5 (majorité de A et aucun C ou D : 5)
  - majorité de B : note entre 2 et 4 (uniquement des B : 3)
  - majorité de C : note entre 1 et 3 (uniquement des C : 2)
  - majorité de D : note entre 0 et 2 (uniquement des D : 0; dès qu'il y a d'autres niveaux que le D : 1 ou 2)

#### **Seconde méthode : évaluation chiffrée des niveaux de maîtrise**

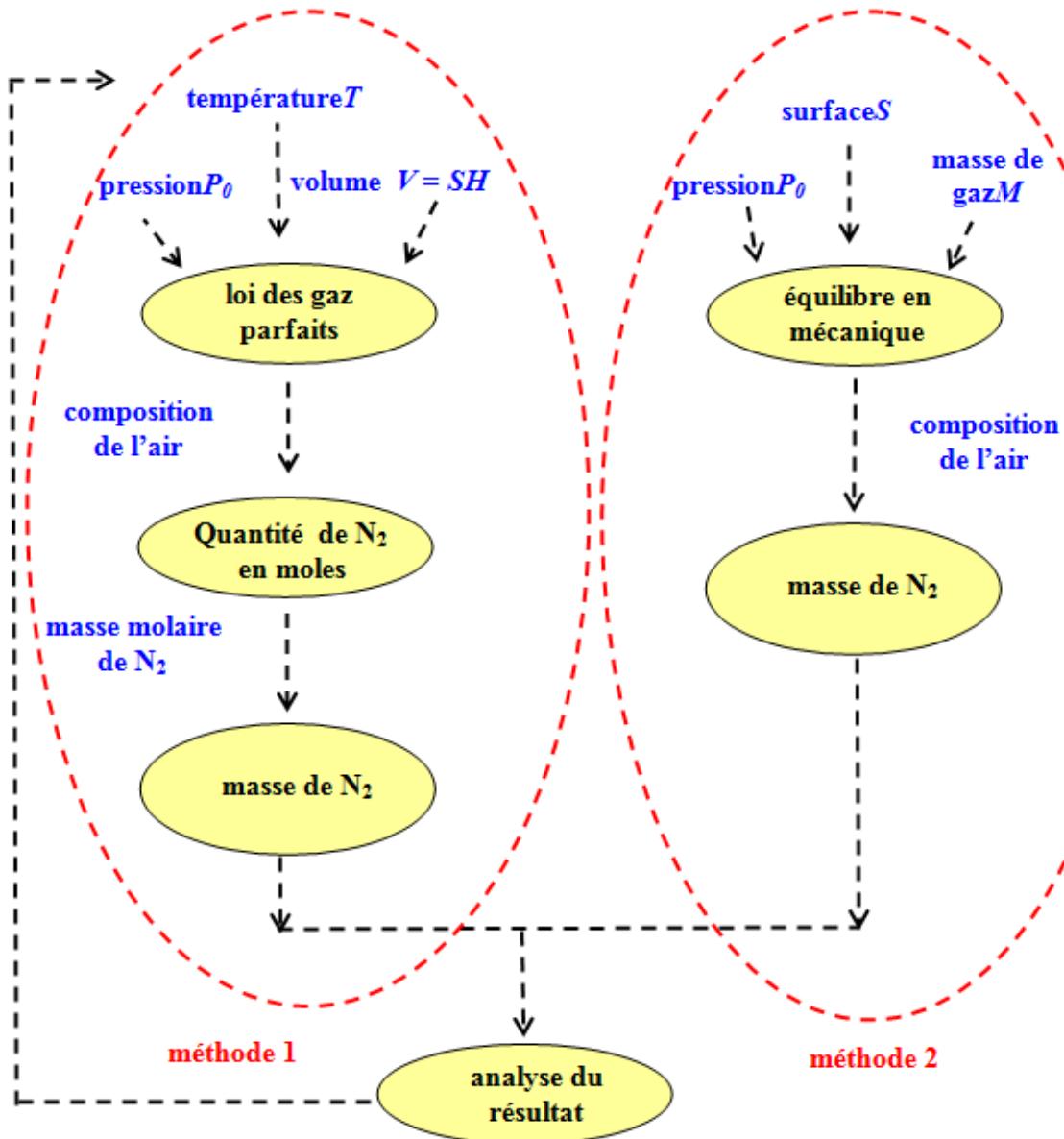
En s'appuyant sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), le correcteur apprécie le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice en mettant une note à la compétence entre :

- 0 (les indicateurs de réussite ne sont pas présents)
- et le poids attribué à la compétence (les indicateurs de réussite apparaissent dans leur quasi totalité).

Résolution de problème  
**La masse du diazote de l'atmosphère**  
 Évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite

**Schéma d'analyse des démarches**

Le correcteur fonde son évaluation sur l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès par le candidat pour traiter l'exercice :



NB : Il convient de s'adapter car on ne peut pas lister toutes les démarches possibles.

**Attribution d'une note sur 5**

L'exercice est évalué globalement en fonction de l'appréciation quantitative du nombre "d'étapes de résolution" abordées avec succès en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

<b>Pas de résolution</b>	0 : aucun élément valorisable. 1 : peu d'indicateurs valorisables
<b>Résolution partielle</b>	2 : des indicateurs valorisables 3 : les indicateurs précédents + un début pertinent d'analyse du principe de résolution.
<b>Résolution satisfaisante</b>	4 : les indicateurs précédents + un schéma d'analyse pertinent du principe de résolution avec un début de mise en œuvre. 5 : les indicateurs précédents + une mise en œuvre crédible et/ou une analyse critique des résultats.

NB : Le doute doit bénéficier au candidat car on n'est pas dans un schéma habituel de résolution d'un exercice guidé. D'autre part, une résolution à 5 points n'est pas forcément parfaite mais toutes les étapes sont présentes et pertinentes ; par exemple, on accepte une faute numérique finale si elle est suivie d'une bonne analyse.

# Le jet lev

## Présentation de cette résolution de problème :

Résolution de problème avec des données sur les systèmes ouverts (Olympiades internationales de physique) - programme de seconde année.

Difficulté de la version	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer
niveau "expert"	2	3	3	3	2

## Cadre du programme officiel : seconde année PC

Notions et contenus	Capacités exigibles
Actions de contact dans un fluide en mouvement – Forces de pression.  Bilans macroscopiques – Bilans de masse.  – Bilans de quantité de mouvement ou d'énergie cinétique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel à une entrée et une sortie.	– Utiliser la relation $\vec{dF} = -p \vec{dS}$ .  – Établir un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert et fixe ou sur un système fermé et mobile. – Utiliser un bilan de masse.  – Associer un système fermé à un système ouvert pour faire un bilan. – Utiliser la loi de la quantité de mouvement et la loi de l'énergie cinétique pour exploiter un bilan. – Exploiter la nullité (admise) de la puissance des forces intérieures dans un écoulement parfait et incompressible.

## Déroulement de l'activité :

L'étudiant reçoit l'énoncé (première fiche).

Des éléments de réponses sont donnés dans la seconde fiche pour le professeur.

Au cours de son raisonnement, en cas de blocage, l'étudiant peut faire appel à des aides, décrites dans la troisième fiche (ces aides n'étaient pas disponibles lors de l'épreuve!).

Une fiche donne des exemples d'indicateurs de réussite permettant à l'enseignant d'évaluer cette activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences.

La dernière fiche propose des critères d'évaluation de l'activité par une approche globale du niveau de réussite.

## Résolution de problème

# Le jet lev

### Enoncé

Un jetlev est un dispositif fixé au dos d'un pilote lui permettant de s'élever au-dessus d'un lac. Une poussée suffisante est permise grâce à l'expulsion d'eau à grande vitesse par deux tuyères orientées vers le bas et alimentées grâce à un tuyau flexible d'une dizaine de mètres de long. Afin de limiter le poids de l'engin, la pompe et le carburant sont disposés dans un bateau auxiliaire.



### niveau expert

Pour répondre aux questions qui suivent, il vous appartiendra de modéliser la situation physique et de la mettre en équation.

Il est attendu que :

- vous représentiez par un (ou plusieurs) schéma(s) la situation physique étudiée
- vous choisissez les notations que vous utilisez en attribuant un nom à chacune des grandeurs physiques que vous serez amené à introduire
- vous précisez les lois physiques que vous appliquez
- vous précisez, en le justifiant, les différentes hypothèses ou approximations que vous utilisez
- vous proposiez des ordres de grandeur réalistes des données physiques manquantes
- les éventuels calculs soient menés sous forme littérale, avec pour objectif final d'obtenir une valeur numérique

**Question n°1 :** Effectuer une analyse qualitative des phénomènes physiques permettant d'expliquer le vol stationnaire de l'utilisateur d'un jetlev.

**Question n°2 :** Quelle puissance doit fournir la pompe permettant au pilote de rester à une hauteur de quelques mètres au dessus de la surface de l'eau ? On pourra s'aider d'un bilan de quantité de mouvement et d'énergie entre deux instants successifs.

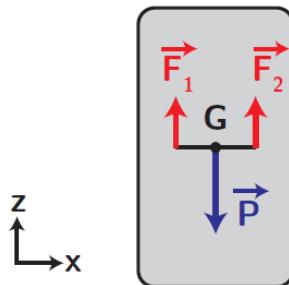
## Résolution de problème

# Le jet lev

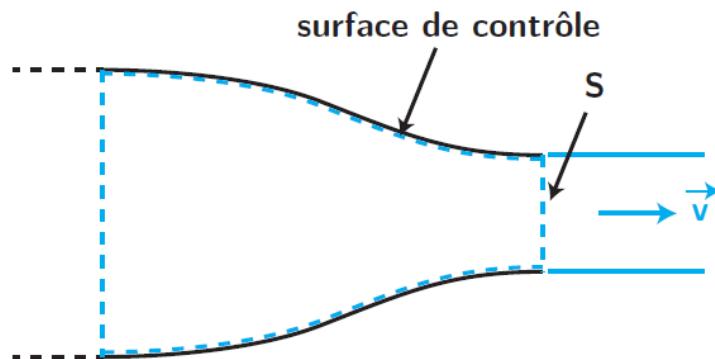
### Exemple de résolution

#### Correction donnée aux IPhO

- Pour simplifier, on cherche à déterminer la force de poussée permettant l'équilibre de l'utilisateur. On se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Par application du **principe fondamental de la statique** au système {utilisateur + dispositif} on a donc  $\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$  où  $\vec{P} = m_{tot}\vec{g}$  est la force de pesanteur,  $m_{tot}$  la masse du système et  $\vec{F}_i$  sont les deux forces liées à l'éjection d'eau en sortie des tuyères. Ces dernières doivent être de même intensité  $F_1 = F_2 = \frac{m_{tot}g}{2}$  après projection selon l'axe vertical; et positionnées de manière symétrique par rapport au centre de masse (même bras de levier), sinon il y a un mouvement de rotation.



- Calculons maintenant la norme de la force de poussée en sortie d'une des tuyères de section  $S = \pi \frac{D^2}{4}$  où  $D$  est le diamètre de la tuyère. On effectue pour cela un bilan de quantité de mouvement au système fermé constitué de l'extrémité de la tuyère contenant une certaine masse d'eau  $m_1$ , constante (débit supposé constant) délimité par une surface de contrôle comme schématisé ci-dessous.



L'ensemble étant immobile dans le référentiel terrestre, cherchons l'action de l'eau, supposée incompressible, lors d'un écoulement à vitesse constante  $\vec{v}$ , de débit massique  $D_m = \rho S v$ . On a donc :  $\delta \vec{p} = \vec{p}(t + \delta t) - \vec{p}(t) = (m_1 + \delta m)\vec{v} - m_1\vec{v} = \delta m\vec{v} = (D_m \delta t)\vec{v}$ . Ainsi  $D_m \vec{v} = \frac{\delta \vec{p}}{\delta t} = m_1 \vec{g}$  (il n'y a a priori pas d'autres forces s'exerçant sur le fluide, la résultante des forces de pression étant nulle), soit  $m_1 \vec{g} - D_m \vec{v} = \vec{0}$  constituant le PFS pour le système. On identifie  $-D_m \vec{v} = \rho S v^2 \vec{e}_z$  à la force de poussée subie par une des tuyères.

- On effectue maintenant un bilan d'énergie pour en déduire la puissance associée. On reprend le même système, et l'on utilise le **théorème de l'énergie cinétique** entre deux instants  $t$  et  $(t + \delta t)$ , en l'absence de pertes (viscosité négligée) :  $\frac{1}{2}(D_m \delta t)v^2 = \delta W = P \delta t$  dont on déduit la puissance associée à l'une des forces de poussée  $P = \frac{1}{2}D_m v^2 = \frac{1}{2}\rho S v^3$ .
- Il faut coupler les deux bilans : avec  $F_1 = F_2 = \frac{m_{tot}g}{2} = \rho S v^2$  on peut isoler la vitesse  $v = \sqrt{\frac{m_{tot}g}{2\rho S}}$ . La puissance associée aux deux tuyères est alors  $P_{tot} = 2P = \rho S v^3 = \rho S \left(\frac{m_{tot}g}{2\rho S}\right)^{3/2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(m_{tot}g)^3}{2\rho S}}$ .
- Il est temps d'évaluer numériquement la puissance. On considère un ordre de grandeur typique de la masse totale de  $m_{tot} = 200$  kg (une personne + son équipement); le diamètre est, d'après la photo, de l'ordre de  $\frac{1}{20}$  de la taille d'une personne, soit typiquement 5 cm, donc  $S \simeq 20 \text{ cm}^2 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ; la masse volumique de l'eau est de  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , et l'on prendra  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . On obtient alors  $P_{tot} \simeq 22 \text{ kW}$  soit l'équivalent d'un moteur de 30 chevaux (1 ch = 0,736 kW), cela paraît relativement cohérent, et compatible avec les brochures des produits commerciaux.

## Autre correction

### Analyse et modélisation

On travaille dans le référentiel  $\mathcal{R}$  terrestre, supposé galiléen.

On commence par schématiser la situation sur la figure 3(a). On prend O, origine de l'axe (Oz) vertical, au niveau de la surface du lac. Le pilote de masse  $m$  est en vol stationnaire à l'altitude  $H$ . D'un point de vue mécanique, il est donc **à l'équilibre** dans  $\mathcal{R}$ .

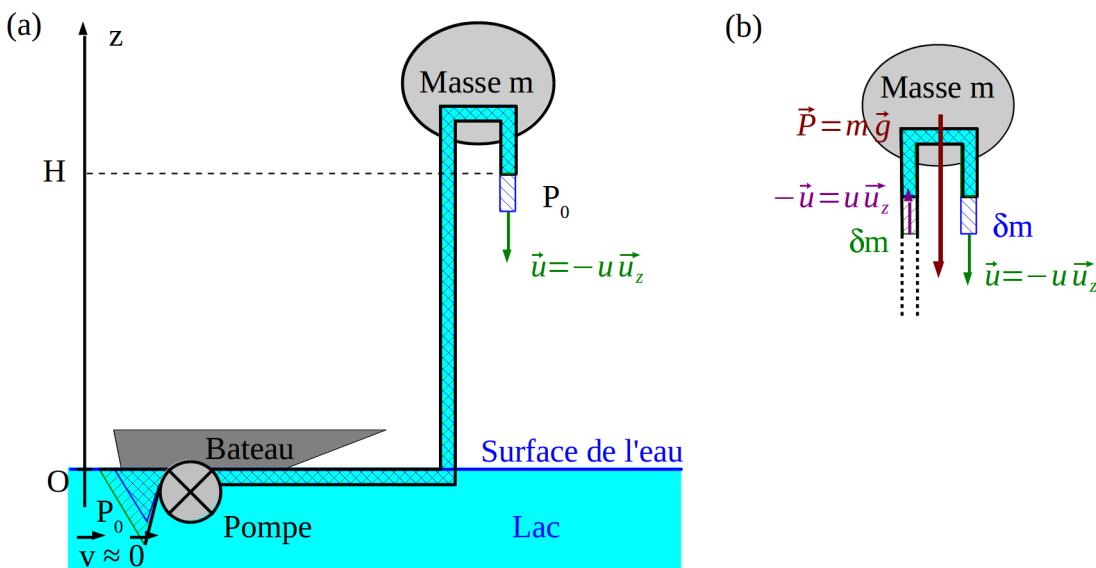


FIGURE 3 – (a) Ensemble de la situation – (b) Détail de l'écoulement au niveau du pilote de masse  $m$ .

On notera  $D_m$  le débit massique de l'écoulement dans le tuyau et  $\vec{u} = -u \vec{u}_z$  la vitesse d'éjection au niveau de la tuyère. La puissance de la pompe est notée  $P$ . L'écoulement est supposé **STATIONNAIRE**. Pour les bilans énergétiques de type Bernoulli, on supposera que le fluide est parfait et on négligera les pertes en charges dans le tuyau.

Si on note  $S$  la section du tuyau en sortie,  $\rho$  la masse volumique de l'eau, on a  $D_m = \rho S u$ .

Qualitativement, le pilote est maintenu en équilibre grâce à une force de poussée  $\vec{\Pi}$  qui s'oppose au poids. Dans un premier temps, on effectuera un bilan de quantité de mouvement, soit un raisonnement semblable à celui utilisé pour déterminer l'expression de la force de pression de radiation. Physiquement, on comprend qu'il faudra donc un débit  $D_m$  et une vitesse  $u$  suffisants pour s'opposer au poids.

Dans un deuxième temps, on exprimera que l'énergie fournie par la pompe est utilisée pour donner au fluide une énergie cinétique et une énergie potentielle suffisante. Ce dernier doit avoir une vitesse  $u$  au niveau de la tuyère de sortie située à l'altitude  $H$ .

### Résolution

#### Bilan de quantité de mouvement au niveau du pilote

On considère le système **fermé** schématisé sur la figure 3(b), constitué du pilote, d'un bout de tuyau et de l'eau située à l'intérieur à la date  $t$ . Entre  $t$  et  $t + dt$ , le fluide s'est déplacé de  $u dt$ . On note d'un indice 0 les grandeurs relatives à la partie commune au fluide à  $t$  et à  $t + dt$ . On note  $\delta m = D_m dt$  la masse des deux parties mésoscopiques distinctes à l'entrée et à la sortie.

Le système ainsi défini est soumis à son poids  $\vec{P} = m_0 \vec{g}$ ,  $m_0$  comprenant la masse du pilote mais aussi celle de son équipement, du tuyau (la partie dessinée sur la figure 3(b)) et de la partie du fluide contenue dedans.<sup>12</sup>

On pourrait être tenté d'oublier dans un premier temps l'action  $\vec{T} = -T \vec{u}_z$  de la base du tuyau sur la partie haute de ce dernier qui fait partie du système. Si on la prend néanmoins en compte, la résultante des forces s'écrit  $\vec{F} = -m_0 g \vec{u}_z - T \vec{u}_z$ .

On applique le théorème de la quantité de mouvement sous la forme :  $d\vec{p} = \vec{F} dt$

$$\text{avec : } \begin{cases} \vec{p}(t) &= \vec{p}_0 + \delta m(-\vec{u}) = \vec{p}_0 - D_m \vec{u} dt \\ \vec{p}(t + dt) &= \vec{p}_0 + \delta m(\vec{u}) = \vec{p}_0 + D_m \vec{u} dt \end{cases}$$

Donc  $d\vec{p} = 2D_m \vec{u} dt$ .

On retrouve une force de poussée analogue à celle d'une pression de radiation lors d'une réflexion, soit  $\vec{\Pi} = -2D_m \vec{u}$ , et la condition d'équilibre du pilote s'écrit :  $\vec{F} + \vec{\Pi} = \vec{0} \Leftrightarrow m_0 g + T = 2D_m u$  (1).

12. La force de pression sur le liquide à l'entrée du système, à la pression  $P_0$  (Bernoulli entre ce point et la sortie), elle s'annule avec la force de pression (à  $P_0$  également) exercée sur toute la superficie du reste du système.

La grandeur  $T$  étant indéterminée comme toute action de contact, un simple bilan de quantité de mouvement sur le système choisi ne permet pas de conclure ... sauf si on ose affirmer que l'effet de  $T$  consiste uniquement à "alourdir" le poids du pilote ...

#### Bilan de quantité de mouvement à l'ensemble

L'autre solution consiste à faire un bilan de quantité de mouvement sur le système fermé représenté sur la figure 3(a). Le système est constitué à  $t$  par le fluide situé entre l'entrée avant la pompe (où sa vitesse est quasiment nulle) et la sortie de la tuyère. On y ajoute la pompe, le tuyau, le pilote et son équipement. Entre  $t$  et  $t + dt$ , le fluide s'est déplacé de  $udt$  en sortie et on néglige la vitesse à l'entrée. On note d'un indice 0 les grandeurs relatives à la partie commune au fluide à  $t$  et à  $t + dt$ . On note  $\delta m = D_m dt$  la masse des deux parties mésoscopiques distinctes à l'entrée et à la sortie.

Le système ainsi défini est soumis à son poids  $\vec{P} = m\vec{g}$ ,  $m$  comprenant la masse du pilote, de son équipement, du tuyau et de la partie du fluide de la figure 3(b). Il faut y ajouter le poids du reste de la colonne de fluide :  $-\rho SHg\vec{u}_z$ .<sup>13 14</sup> La résultante des forces s'écrit donc  $\vec{F} = -mg\vec{u}_z - \rho SgH\vec{u}_z$ .

On applique le théorème de la quantité de mouvement sous la forme :  $d\vec{p} = \vec{F}dt$

$$\text{avec : } \begin{cases} \vec{p}(t) &= \vec{p}_0 + \delta m \times (\vec{0}) = \vec{p}_0 \\ \vec{p}(t + dt) &= \vec{p}_0 + \delta m(\vec{u}) = \vec{p}_0 - D_m u \vec{u}_z dt \end{cases}$$

Donc  $d\vec{p} = -D_m u \vec{u}_z dt$ .

On obtient donc l'égalité :  $D_m u = mg + \rho g SH$  (2)

*Remarque :* En faisant la différence des relations (2) et (1), on peut exprimer l'action de contact  $T$  dont il était question précédemment :  $T = (m - m_0)g + D_m u$ . Elle comprend effectivement un terme provenant du poids de la partie basse du tuyau  $(m - m_0)g$ , mais surtout le facteur  $D_m u$  qui est loin d'être négligeable puisque c'est ce terme qui, d'après (2), sera responsable de l'équilibre du pilote et de toute la colonne d'eau de hauteur  $H$ .

#### Puissance de la pompe

Sur la figure 3(a), on considère le système fermé constitué à  $t$  par le fluide situé entre l'entrée avant la pompe et la sortie de la tuyère. Entre  $t$  et  $t + dt$ , le fluide s'est déplacé de  $udt$ . On note d'un indice 0 les grandeurs relatives à la partie commune au fluide à  $t$  et à  $t + dt$ . On note  $\delta m = D_m dt$  la masse des deux parties mésoscopiques distinctes à l'entrée et à la sortie.

On applique sur ce fluide le théorème de l'énergie mécanique entre  $t$  et  $t + dt$ . On suppose le fluide parfait et incompressible. Les travaux des forces de pression à  $P_0$  à l'entrée comme à la sortie s'annulent. On a donc  $dE_m = Pdt$  où  $P$  est la puissance de la pompe. En négligeant l'énergie cinétique à l'entrée du tuyau, on a :

$$\begin{cases} E_m(t) &= E_0 + \frac{1}{2}\delta m \times (0)^2 + \delta m g \times 0 = E_0 \\ E_m(t + dt) &= E_0 + \frac{1}{2}\delta m u^2 + \delta m gH = E_0 + (\frac{1}{2}D_m u^2 + D_m gH)dt \end{cases}$$

Au passage, pour assurer la conservation du débit volumique entre l'entrée et la sortie de la pompe, la section de l'écoulement à l'entrée doit être bien plus grande qu'en sortie. On retrouve bien le raisonnement qualitatif du préliminaire dans l'expression de  $P$  :

$$P = \frac{1}{2}D_m u^2 + D_m gH \quad (3)$$

L'énergie  $\delta E = Pdt$  est utilisée pour amener la masse  $\delta m$  à l'altitude  $H$  avec la vitesse  $u$ , donc avec une énergie potentielle  $\delta m gH$  et cinétique  $\frac{1}{2}\delta m u^2$ .

#### Conclusion :

La relation (2) et l'expression  $D_m = \rho Su$  du débit permet d'exprimer la vitesse  $u$  nécessaire à l'équilibre du pilote :  $u = \sqrt{\frac{mg}{\rho S} + gH}$ .

Il ne reste qu'à reporter cette expression dans celle de la puissance de la pompe donnée par (3), soit :

$$P = D_m \left( \frac{u^2}{2} + gH \right) = \rho S u \left( \frac{u^2}{2} + gH \right)$$

$$\text{On obtient donc : } P = \rho S \sqrt{\frac{mg}{\rho S} + gH} \left( \frac{mg}{2\rho S} + \frac{3}{2}gH \right)$$

Concernant les valeurs numériques nécessaires, on prend  $m = 100$  kg avec l'équipement,  $g = 10$  m.s<sup>-2</sup>. Pour la hauteur  $H$ , la photo permet d'évaluer environ  $H = 5$  m. La photographie montre que le diamètre du tuyau est quasiment celui des jambes du pilotes : on choisit un diamètre de  $d = 10$  cm, ce qui conduit à une section  $S = \pi \frac{d^2}{4} = 78$  cm<sup>2</sup>.

13. On supposera que le poids de la pompe, accrochée au bateau, est compensé par la réaction de ce dernier. On supposera également que le poids du fluide de la partie horizontale du tuyau (immergée) est quant à lui compensé par la poussée d'Archimède.

14. D'autres bilans de quantité mouvement, appliqués à des sous-systèmes bien choisis, permettraient sans doute d'approfondir ces suppositions.

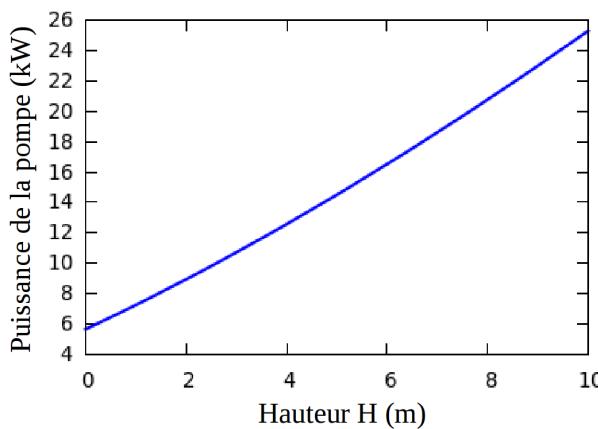


FIGURE 4 – Puissance de la pompe nécessaire en fonction de la hauteur du pilote

Avec les valeurs choisies, on obtient une puissance  $P = 14.5 \text{ kW}$ . On obtient au passage la valeur de la vitesse  $u = 13 \text{ m.s}^{-1}$ , soit environ 50 km/h, valeur qui peut sembler raisonnable et compatible avec le jet visible sur la photographie. Le débit massique est alors assez conséquent puisqu'il est de l'ordre de  $D_m = 100 \text{ kg/s}$ .

Pour être plus complet, on peut tracer (cf courbe de la figure 4) l'évolution de la puissance nécessaire en fonction de la hauteur  $H$  du pilote. On constate ainsi que l'effet de la hauteur  $H$  est loin d'être négligeable puisque l'on doit passer de 6 kW à près de 24 kW pour monter à une dizaine de mètres.

#### Pour aller plus loin :

*En s'appuyant sur la condition d'équilibre donnée par (2), on peut remarquer que l'on peut jouer indépendamment sur deux paramètres  $D_m$  et  $u$  pour assurer l'équilibre du pilote. On va donc voir s'il est possible, pour une hauteur  $H$  typique donnée, de choisir au mieux ce couple  $(D_m, u)$  pour minimiser la puissance nécessaire. Dans la suite, on fixe  $H = 5 \text{ m}$ .*

En utilisant dans la condition d'équilibre (2) l'expression  $D_m = \rho S u$  du débit, on obtient :

$$mg = D_m u - D_m \frac{gH}{u} \Leftrightarrow D_m = \frac{mg}{u - \frac{gH}{u}}$$

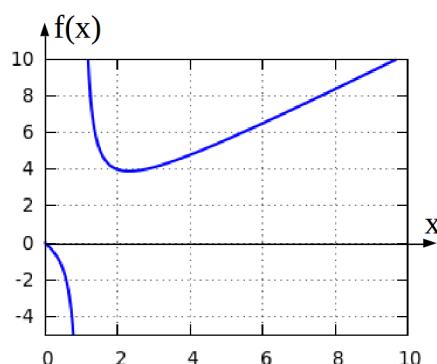
On introduit cette expression de  $D_m$  dans l'expression (3) de la puissance de la pompe, soit :

$$P = \frac{1}{2} D_m (u^2 + 2gH) = \frac{mg}{2} \times \frac{u^2 + 2gH}{u - \frac{gH}{u}} = \frac{mgu}{2} \times \frac{u^2 + 2gH}{u^2 - gH}.$$

En introduisant la vitesse caractéristique  $v_0 = \sqrt{gH}$ , dont la valeur numérique est de  $v_0 = 7.1 \text{ m/s}$ , et la vitesse réduite  $x = \frac{u}{v_0}$ , on obtient :

$$P = P_0 f(x) \quad \text{avec} \quad P_0 = \frac{mgv_0}{2} \quad \text{et} \quad f(x) = \frac{x^2 + 2}{x^2 - 1} x$$

La puissance caractéristique  $P_0$  a une valeur de  $P_0 = 3.5 \text{ kW}$ . C'est en passant l'ordre de grandeur que l'on obtiendrait si on se contentait d'un raisonnement par analyse dimensionnelle<sup>15</sup>.



Reste à choisir la valeur de  $x$  (donc de  $u$ ), qui est encore libre. C'est tout à fait normal puisqu'il n'y a qu'une contrainte  $D_m u = mg + \rho g S H$  sur deux paramètres  $D_m$  et  $u$ ! Le plus économique est de chercher à minimiser  $P$ .

15. On prendrait par contre comme masse  $m$  celle du pilote et celle de l'eau contenue dans toute la partie verticale du tuyau, ce qui conduirait à une valeur plus élevée (donc plus raisonnable)

La représentation graphique du facteur de forme  $f(x)$  est représenté ci-contre. Un calcul sans difficulté montre que la dérivée  $f'(x) = \frac{x^4 - 5x^2 - 2}{(x^2 - 1)^2}$  ne s'annule qu'une fois dans le domaine  $x > 0$  pour  $x_0 = \sqrt{\frac{5 + \sqrt{33}}{2}} \simeq 2.3$ , ce qui conduit à une valeur minimale de  $f(x_0) = \sqrt{\frac{5 + \sqrt{33}}{2}} \times \frac{9 + \sqrt{33}}{3 + \sqrt{33}} \simeq 3.9$ .

La vitesse optimale est donc de  $u_{opt} = x_0\sqrt{gH} = 2.3 \times v_0 = 16.4$  m/s, ce qui conduit à une puissance minimale de  $P_{min} = P_0f(x_0) = 13.8$  kW. Avec la valeur optimale de la vitesse, on peut calculer le débit massique associé, soit :  $D_m = \frac{mg}{u_{opt} - \frac{gH}{u_{opt}}} = 75$  kg/s. On peut enfin songer à déterminer le diamètre  $d$  du tuyau

nécessaire pour assurer un tel débit  $D_m$  avec une telle vitesse  $u_{opt}$ . La section du tuyau est de  $S = \frac{D_m}{\rho u_{opt}} = 46$  cm<sup>2</sup>, soit un diamètre de 7 à 8 cm.

On peut constater que l'ordre de grandeur du diamètre du tuyau obtenu ici est du même ordre de grandeur que celui qui nous a permis de conclure précédemment. Par ailleurs, on obtient des résultats semblables et une puissance légèrement supérieure à la puissance minimale trouvée, ce qui est d'une part rassurant et semblerait montrer que la géométrie des dispositifs commerciaux ont peut-être été optimisés.

Quant à la raison physique de l'existence de ce compromis sur la valeur de  $u$ , il est assez naturel :

- Pour une valeur de  $u$  trop faible, il faut un débit massique  $D_m$  énorme pour assurer la contrainte. Ainsi, le terme d'énergie potentielle dans  $P$  explose, car il faut amener une grosse quantité de matière à l'altitude  $H$ .
- Inversement, pour une valeur de  $u$  trop grande, le débit massique est très faible. Comme on met en  $\frac{1}{2}$ uvre une faible quantité de matière, le terme d'énergie potentielle est négligeable, mais il faut apporter une énorme énergie cinétique.

En comparaison à la photographie de l'énoncé et aux spécificités trouvées sur les sites des revendeurs de ce type de matériel (cf. tableau 3), on ne peut que valider l'ordre de grandeur des résultats obtenus.

TUYAU DE FLYIING	
Matériau	Pression-résistance et Wear résistant à Water Pipe
Dimension	(L) 20M (65'6") × 100mm (3") (diamètre)
Épaisseur	2 mm

TABLE 3 – Modèle FLT-JF1 de chez Jiujiang Flit Boating Co., Ltd.

**Résolution de problème**  
**Le jet lev**  
**Aides à la résolution**

S'approprier	<ul style="list-style-type: none"><li>– Faire un schéma.</li><li>– Quelles sont les grandeurs pertinentes ?</li><li>– Estimer numériquement ces grandeurs.</li></ul>
Analyser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Rappeler le théorème de la quantité de mouvement.</li><li>– Rappeler un théorème énergétique.</li><li>– Ces théorèmes s'appliquent-ils à un système ouvert ?</li></ul>
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"><li>– Faire le lien entre la masse du pilote et de l'équipement et la force de poussée.</li><li>– Faire un bilan de quantité de mouvement pour obtenir le lien entre la force de poussée et la vitesse.</li><li>– Faire un bilan énergétique pour obtenir le lien entre la puissance et la vitesse.</li><li>– Mener à bout les calculs.</li></ul>
Valider	<ul style="list-style-type: none"><li>– Comparer la valeur numérique avec des ordres de grandeurs connus.</li><li>– Quel est l'effet de la dissipation ?</li></ul>

# Résolution de problème

## Le jet lev

### Évaluation de l'activité par attribution de niveaux de maîtrise des compétences

#### Indicateurs de réussite

Compétences	Indicateurs de réussite	Niveau de maîtrise	poids
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un schéma bien annoté a été réalisé.</li> <li>- Une explication qualitative du phénomène physique a été conduite.</li> <li>- Les grandeurs pertinentes ont été introduites.</li> <li>- Ces grandeurs ont été correctement évaluées numériquement (via la photo ou le sens physique), avec une unité respectant le système international.</li> </ul>		2
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le principe fondamental de la statique/dynamique a été donné.</li> <li>- Un théorème énergétique a été rappelé (énergie cinétique, puissance cinétique, théorème de Bernoulli).</li> <li>- Pour chaque théorème appliqué, un système fermé a bien été explicité.</li> </ul>		2
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le lien entre la masse du pilote et de l'équipement et la force de poussée a été obtenu</li> <li>- Le bilan de quantité de mouvement a été correctement appliqué pour obtenir le lien entre la force de poussée et la vitesse</li> <li>- La relation entre puissance et vitesse a été obtenue.</li> <li>- Le calcul analytique entre la puissance et les paramètres connus est effectué.</li> <li>- Les applications numériques sont correctes.</li> </ul> <p>Éventuellement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'application d'un raisonnement en analyse dimensionnelle a été effectuée rigoureusement.</li> </ul>		3
Valider	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La discussion entre la variation des paramètres pertinents et la puissance à développer a été conduite.</li> <li>- La valeur numérique a été comparée avec des ordres de grandeurs connus.</li> <li>- Le résultat est critiqué par rapport au fait que la dissipation n'a pas été prise en compte : le résultat trouvé est une borne inférieure.</li> </ul>		1
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La communication est claire, cohérente avec un vocabulaire scientifique précis.</li> <li>- Les calculs sont effectués à partir de formules littérales, dans un langage mathématique correct.</li> </ul>		0

Dans cet exercice, du fait de la question posée évoquant des pistes possibles, la compétence "réaliser" est davantage sollicitée que "analyser" : sa contribution est donc la plus importante. La compétence "Communiquer" n'a pas été explicitement évaluée dans le tableau, étant jugée de manière sous-jacente.

### **Attribution d'une note à partir des compétences évaluées**

#### **Première méthode : évaluation par des lettres des niveaux de maîtrise**

Le correcteur apprécie, selon quatre niveaux (A, B, C, D), le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice :

- Niveau A : les indicateurs de réussite apparaissent dans leur (quasi) totalité.
- Niveau B : les indicateurs de réussite apparaissent partiellement.
- Niveau C : les indicateurs de réussite apparaissent de manière insuffisante.
- Niveau D : les indicateurs de réussite ne sont pas présents.

Pour cela, il s'appuie sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), en mettant autant de fois la lettre voulue que la compétence a de poids.

L'exercice est évalué en fonction des niveaux de maîtrise relevés, en portant un regard en deux étapes sur la grille et en utilisant les indications non exhaustives suivantes :

- Première étape :
  - majorité de A et de B : note entre 3 et 5
  - majorité de C et de D : note entre 0 et 3
- Deuxième étape :
  - majorité de A : note entre 4 et 5 (majorité de A et aucun C ou D : 5)
  - majorité de B : note entre 2 et 4 (uniquement des B : 3)
  - majorité de C : note entre 1 et 3 (uniquement des C : 2)
  - majorité de D : note entre 0 et 2 (uniquement des D : 0; dès qu'il y a d'autres niveaux que le D : 1 ou 2)

#### **Seconde méthode : évaluation chiffrée des niveaux de maîtrise**

En s'appuyant sur des indicateurs de réussite adaptés à la résolution (cf. plus haut), le correcteur apprécie le niveau de maîtrise des compétences mises en œuvre par le candidat pour traiter l'exercice en mettant une note à la compétence entre :

- 0 (les indicateurs de réussite ne sont pas présents)
- et le poids attribué à la compétence (les indicateurs de réussite apparaissent dans leur quasi totalité).

## Index

L'index est en deux parties :

- l'index par domaine,
- l'index par mot clefs.

Il permet d'avoir accès (en cliquant) à la page où est décrite la résolution de problème.

Le titre de la résolution de problème est suivi du niveau (première ou seconde année), ainsi que les versions présentées par niveau de difficulté :

- ★ pour le niveau "initiation",
- ★★ pour le niveau "confirmé",
- ★★★ pour le niveau "expert".

Est aussi indiqué le caractère expérimental le cas échéant.

## Index par domaine

Acoustique	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
Astronomie	
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
Chimie	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
Chimie organique	
la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	47
Cristallographie	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	114
Diagrammes $E - pH$	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
Électricité	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
Electromagnétisme	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> ) .....	145
Mécanique	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	94
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	217
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	77
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
le téléski (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
Mécanique des fluides	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
Ondes	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
Optique	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	150
le smartphone (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	168
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> ) .....	145
Oxydo-réduction	
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	66
Physique quantique	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
Combien de photons pour une photo ? (Capes 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	208
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
Solutions aqueuses	
l'étiquette d'un engras (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
l'acidité d'une boisson au cola (1 <sup>re</sup> année, 3 versions différentes, <i>expérimentale, informatique</i> ) .....	10
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34

Stéréochimie	
la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	47
Thermochimie	
la coquille d'oeuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	66
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
Thermodynamique	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
la carburation des aciers (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	61
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	217
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
Thermodynamique chimique	
la distillation industrielle (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	82

## Index par mot clef

accélération	
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★) . . . . .	77
accommodation	
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) . . . . .	150
le smartphone (1 <sup>re</sup> année, ★) . . . . .	168
acide	
la coquille d'oeuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) . . . . .	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	34
adaptation d'impédance	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) . . . . .	88
ampèremètre	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	129
analyse en ordre de grandeur	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) . . . . .	135
la carburation des aciers (2 <sup>nde</sup> année, ★) . . . . .	61
analyse vectorielle	
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) . . . . .	179
approximation acoustique	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) . . . . .	200
ARQS	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) . . . . .	21
association série ou parallèle	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	129
axe d'un polariseur	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	145
base	
la coquille d'oeuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) . . . . .	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	34
Bernoulli (relation de)	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) . . . . .	27
bilan d'énergie	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) . . . . .	135
bilan de masse	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) . . . . .	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) . . . . .	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) . . . . .	225
bilan de quantité de mouvement	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) . . . . .	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) . . . . .	225
bilan des forces	
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★) . . . . .	77
bilan macroscopique	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) . . . . .	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) . . . . .	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) . . . . .	225
bilans	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) . . . . .	27
bobine	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	129
capacimètre	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	129
caractéristique électrique	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) . . . . .	129
carbone asymétrique	
la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) . . . . .	47
centre d'inertie	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) . . . . .	94
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★) . . . . .	77
champ de pesanteur	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) . . . . .	27

le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★)	77
champ électrique	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★)	157
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★)	195
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> )	145
champ magnétique	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★)	195
changement d'état	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★)	135
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★)	189
charge électrique	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★)	21
chauffe-plat	
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★)	66
circuit électrique	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★)	21
coefficients de réflexion et de transmission	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★)	88
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★)	157
compacité	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★)	114
complexation	
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> )	34
condensateur	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
condition de précipitation	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i>	101
conditions aux limites	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★)	88
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★)	135
conditions initiales	
le téléski (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★)	173
conductimétrie	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i>	101
confinement quantique	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★)	42
conservation du flux	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★)	135
conservative (force) et force non conservative	
le téléski (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★)	173
constante d'acidité	
la coquille d'oeuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★)	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> )	34
constante thermodynamique d'équilibre	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i>	101
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> )	34
constantes d'équilibre	
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> )	34
convection	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★)	135
conventions récepteur et générateur	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★)	21
coordinence	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★)	114
corde vibrante	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★)	42
Coriolis (force de)	
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★)	184
Coulomb (lois du frottement de)	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★)	94

cristal	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	114
d'Alembert (équation de)	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
de Broglie	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
de Broglie (relation de)	
Combien de photons pour une photo ? (Capes 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	208
débit	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
débit de charge	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
décibel	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
densité volumique d'énergie acoustique	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
deuxième principe	
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
diagramme $E - pH$	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
diagramme de prédominance	
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
diagramme potentiel-pL	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
diagrammes binaires	
la distillation industrielle (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	82
diffraction	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	150
diffusion des particules	
la carburation des aciers (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	61
dipôle électrique	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
dismutation	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
dissolution	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
dosage	
l'acidité d'une boisson au cola (1 <sup>re</sup> année, 3 versions différentes, <i>expérimentale, informatique</i> ) .....	10
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
dualité onde-particule	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
dynamique	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
échographie	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
écoulement	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
Einstein-Planck (relation d')	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
élargisseur de faisceau	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140

énergie	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★).....	88
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★).....	173
énergie cinétique	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★).....	173
énergie mécanique	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★).....	173
énergie potentielle	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★).....	173
enthalpie de formation	
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	66
enthalpie libre de réaction	
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	66
équation d'état	
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
équations du mouvement	
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★).....	77
équilibre	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
équilibre chimique	
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
équivalence	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
extensivité	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★).....	135
faisceau lumineux	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
Fischer (representation de)	
la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	47
fluide	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★).....	88
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★).....	135
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
flux énergétique	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
flux thermique	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
force	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★).....	77
force d'inertie	
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	184
force d'inertie d'entrainement	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
freinage	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94
frottement	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94

le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★)	77
gaz	
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★)	189
gaz parfait	
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★)	217
GBF	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
glissement	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★★)	94
haut-parleur	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
Heisenberg (inégalité de)	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★)	42
impédance	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★)	88
impédance acoustique	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★)	200
impédance complexe	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
impédance équivalente	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
incidence normale	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★)	157
indicateur coloré	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i>	101
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★★, <i>expérimental</i> )	34
indices complexes	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★)	157
intensité acoustique	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★)	200
intensité du courant	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★★)	21
intensité du courant électrique	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
interaction	
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★)	77
interface	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★)	88
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★)	135
lame demi-onde	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> )	145
lame quart d'onde	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> )	145
Laplace (forces de)	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> )	129
laser	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★)	140
lentille mince	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★)	140
liaison covalente	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★)	114
liaison hydrogène	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★)	114
lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> )	145
liquide	
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★)	189
loi de la quantité de mouvement	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★★)	94
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★)	77
mécanisme	

la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	47
médiامutation	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
masse	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
masse volumique	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	114
médiامutation	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimetal</i> .....	101
microscope	
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★ , ★★, ★★★) .....	150
moment cinétique	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
moment d'inertie	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
mouvement	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	94
multimètre	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimetal</i> ) .....	129
Newton (relation de)	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
œil	
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★ , ★★, ★★★) .....	150
le smartphone (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	168
ohmmètre	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimetal</i> ) .....	129
onde acoustique	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
onde électromagnétique	
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
onde plane progressive harmonique	
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
onde plane progressive harmonique homogène	
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
ondes électromagnétiques	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimetal</i> ) .....	145
oscillateur	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimetal</i> ) .....	129
oscilloscope	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimetal</i> ) .....	129
ouverture angulaire	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
oxydation	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
particule quantique	
la boite à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
passivation	
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	66
pesanteur	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
pH-métrie	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimetal</i> .....	101
phase (transition de)	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
phénomènes quantiques	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	21
photons	

Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★).....	195
Planck	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
Planck-Einstein (relation de)	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
Combien de photons pour une photo ? (Capes 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	208
point matériel	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★).....	77
polarisation des ondes électromagnétiques	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> ) .....	145
potentiel	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
potentiométrie	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
Poynting (vecteur de)	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
le wifi (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	195
précipitation	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
premier principe de la thermodynamique	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★).....	135
le chauffe-plat (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★ , ★★★) .....	66
pression	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
pression de vapeur saturante	
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
principe des actions réciproques	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★ , ★★★).....	94
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★).....	77
produit de solubilité	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
profil gaussien	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
puissance	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>ère</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
le téléski (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
puissance acoustique	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
puits de potentiel	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
pulsation propre	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
quantification	
la boîte à électron (1 <sup>re</sup> et 2 <sup>nde</sup> années, ★★) .....	42
quantité de mouvement	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
le téléski (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
quotient réactionnel	
la coquille d'oeuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
réaction redox	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
Rayleigh (longueur de)	
le laser Lune (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	140
réaction acido-basique	

la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
réaction d'oxydoréduction	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
référentiel	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
référentiel galiléen	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	94
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
le coup-franc (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	77
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★) .....	225
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
référentiel non galiléen	
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★) .....	108
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
réflexion	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
réflexion vitreuse	
les lunettes 3D (2 <sup>nde</sup> année, ★, <i>expérimental</i> ) .....	145
régime sinusoïdal forcé	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
résistance électrique	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
résistance thermique	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
résolution	
le smartphone (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	168
résolution angulaire	
le microscope (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	150
le smartphone (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	168
résonance	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
rotation	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
le vaisseau spatial (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	184
solide	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	114
solubilité	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
solution aqueuse	
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
stabilité	
la composition des gongs (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★) .....	120
stéréoisomère	
la carboxylase (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	47
surpression	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
le cor des Alpes (BAC S 2014, ★) .....	200
système	
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	217
système fermé	
Enlever la nappe ... sans les assiettes (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★) .....	94
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27

la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★).....	225
système ouvert	
la baignoire (2 <sup>nde</sup> année, ★★) .....	27
la fusée à eau (2 <sup>nde</sup> année, ★★, ★★★).....	108
le jet lev (2 <sup>nde</sup> année, ★★★).....	225
température	
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
température	
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
tension	
Autonomie d'une lampe de vélo (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★).....	21
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
titrage	
l'étiquette d'un engrais (1 <sup>re</sup> année, ★), <i>expérimental</i> .....	101
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
tornade	
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
transformation chimique	
le BBT (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★, ★★★, <i>expérimental</i> ) .....	34
transformation totale	
la coquille d'œuf (2 <sup>nde</sup> année, ★, ★★) .....	55
transmission	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
l'objectif photographique (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	157
travail	
l'iceberg (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	135
le télésiège (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	173
ultrasons	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
van der Waals (interactions de)	
le glaçon qui coule (1 <sup>re</sup> année, ★) .....	114
vapeur	
un verre d'eau dans un réfrigérateur (1 <sup>re</sup> année, ★★) .....	189
vecteur tourbillon	
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
vitesse	
l'échographie (2 <sup>de</sup> année, ★★) .....	88
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179
vitesse angulaire	
l'œuf dur en rotation (1 <sup>re</sup> année, ★, ★★★) .....	162
voltmètre	
le haut parleur (1 <sup>re</sup> année, ★★, <i>expérimental</i> ) .....	129
volume	
la masse du diazote de l'atmosphère (CAPES 2013) (1 <sup>re</sup> année, ★★).....	217
vortex	
la tornade (2 <sup>nde</sup> année, ★) .....	179

**Membres du GRIESP<sup>16</sup>**

BARON	Christine	professeure
BLOQUEL	Carole	professeure
COPPENS	Nicolas	professeur
GANIVET	Pauline	professeure
GIROUX	Bruno	professeur
GYR	Marc	professeur
HOURT	Michel	professeur
LE RILLE	Alain	professeur
MASSOTTE	Muriel	professeure
MOUTET	Laurent	professeur
MONTANGERAND	Michel	professeur
SCHLOSSER	Nicolas	professeur
MOMBELLI	Bruno	IA-IPR
VIGNERON	Michel	IA-IPR
ZITOUNI	Manuelle	professeure

sous le pilotage du groupe de physique-chimie de l'inspection générale de l'éducation nationale.

**Remerciements**

Merci aux différents contributeurs : Delphine Arcizet, Catherine Auzely-Lexa, Julien Barthès, Stéphane Bouhours, Nathalie Bresson, Hélène Briand, Isabelle Bruant, Guillaume Champion, David Chelers, Cyriaque Cholet, Xavier Cointault, Marielle Colomb Emmanuel Combès, Vincent Delaubert, Luc Dettwiller, André Dieber, André Domps, Alexandre Embert, Sébastien Gruat, AJ Guichet, Ludivine Héliot, J. Herbaux, Nelly Iceta, Charles Jounet, Frédéric Lahitete Simon Laurette, Céline Lefebvre, Florent Métairie, Valérie Monturret, Tom Morel, Fabrice Piron, Aude Plaszczynski, Guillaume Reydelet, Jérôme Ropert, JP Simond, Eric Teyssier, Nadine Trabujo, Emmanuel Van Brackel.

Et un merci tout particulier à François Vandenbrouck et Thomas Zabulon.

---

16. Groupe de Recherche et d'Innovation pour l'Enseignement des Sciences Physiques