

SESSION 2026



**CAPES
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP
(BAC + 3)**

SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE

SECONDE ÉPREUVE D'ADMISSIBILITÉ

L'épreuve consiste à répondre d'une façon argumentée à un questionnement construit autour d'une problématique précisée dans le sujet, en s'appuyant sur un corpus de documents. Les questions abordées relèvent principalement du programme de la discipline majeure ; une minorité d'entre elles relèvent du programme de la discipline mineure.

L'épreuve vise à évaluer l'aptitude du candidat à mobiliser des savoirs disciplinaires en exploitant des documents de nature diverse (résultats expérimentaux, graphiques, textes issus de la littérature scientifique ou de vulgarisation, pouvant relever de la culture scientifique ou de l'histoire des sciences).

Durée : 3 heures

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.
L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

Tournez la page S.V.P.

A

PRÉAMBULE

Si lors de votre inscription, vous avez choisi la majeure chimie :

- vous devez obligatoirement traiter le sujet allant de la page 2/29 à la page 13/29 ;
- le traitement de ce sujet nécessite de compléter des documents réponses dans **l'annexe à rendre avec la copie page 29** ;
- aucun point ne sera attribué pour des réponses relatives à l'énoncé de la majeure physique.

Si lors de votre inscription, vous avez choisi la majeure physique :

- vous devez obligatoirement traiter le sujet allant de la page 14/29 à la page 28/29 ;
- aucun point ne sera attribué pour des réponses relatives à l'énoncé de la majeure chimie.

Consigne :

- Votre copie devra reprendre le titre de la partie traitée du sujet (exemple : « MAJEURE CHIMIE »).

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPES de l'enseignement public :**

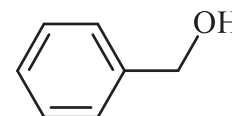
Concours	Section/option	Epreuve	Matière
LBE	1500F	102	4062

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
LBF	1500F	102	4062

MAJEURE CHIMIE**(à traiter uniquement par les candidats ayant choisi
la discipline majeure chimie à l'inscription)****L'alcool benzylique**

L'alcool benzylique, représenté ci-contre, est un alcool aromatique utilisé comme solvant dans de nombreux secteurs comme l'industrie pharmaceutique, la cosmétique et la parfumerie, ainsi que dans les peintures et les vêtements.



Ce sujet vise à apporter un éclairage scientifique sur la problématique de la maîtrise de la préparation et de l'utilisation d'une telle molécule qui nécessite, particulièrement dans le contexte industriel, la prise en compte de multiples dimensions (sécuritaire, environnementale, économique, logistique, etc.). Il comporte deux parties :

- la partie A fournit des données et un corpus de documents de natures diverses ;
- la partie B contient l'ensemble des questions à traiter en s'appuyant notamment sur les éléments de la partie A. Elle est subdivisée en quatre sous-parties indépendantes qui abordent successivement la synthèse industrielle de l'alcool benzylique à partir du toluène, la préparation de l'acide benzoïque, l'utilisation de l'alcool benzylique comme réactif protecteur dans la synthèse de l'aspartame et l'étude d'un oligomère de l'alcool benzylique dans le tétrachlorométhane.

A. Données et corpus de documents**Données**

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- Constante de Faraday : $F = 96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Conversion entre degrés Celsius et kelvins : $T(\text{K}) = 273,15 + \theta(^{\circ}\text{C})$.
- Données relatives à quelques liquides (sous une pression de 1 bar) :

Espèce	Masse molaire	Masse volumique à 20 °C	Température d'ébullition
Eau	$18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$0,998 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$	100 °C
Chlorure de benzyle	$127 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$1,100 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$	179 °C
Alcool benzylique	$108 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$1,045 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$	205 °C
Éther dibenzylique	$198 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$1,049 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$	298 °C

- Masses molaires de quelques solides :
 - permanganate de potassium : $M(\text{KMnO}_4) = 158 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 - carbonate de sodium : $M(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 106 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 - acide benzoïque : $M(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = 122 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- Données thermodynamiques :
 - capacité thermique massique à pression constante de l'eau liquide :

$$c_{p,m}(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} ;$$
 - enthalpie standard de vaporisation de l'eau à 100 °C :

$$\Delta_{\text{vap}}H^\circ(\text{H}_2\text{O}) = 40,6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}.$$
- Propriétés acido-basiques à 25 °C :
 - $\text{pK}_{\text{a}1}(\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}/\text{HCO}_3^-) = 6,4$ et $\text{pK}_{\text{a}2}(\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}) = 10,3$;
 - $\text{pK}_{\text{a}}(\text{PhCOOH}/\text{PhCOO}^-) = 4,2$;
 - $\text{pK}_{\text{a}}(\text{RCOOH}/\text{RCOO}^-)$: environ 4 ;
 - $\text{pK}_{\text{a}}(\text{RNH}_3^+/\text{RNH}_2)$: environ 10 ;
 - $\text{pK}_{\text{e}} = 14$.

Document 1 – Préparation de l'alcool benzylique par hydrolyse du chlorure de benzyle

La voie industrielle la plus courante pour produire l'alcool benzylique est l'hydrolyse du chlorure de benzyle selon la réaction (1) :



Ellington *et al.*¹ (1986) ont étudié la cinétique de cette réaction à partir d'une solution de chlorure de benzyle de concentration $c_0 = 1,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ dans l'eau à $\text{pH} = 7$ et à 53 °C. Les résultats de cette expérience sont rassemblés dans le **tableau 1**.

t / min	0	15	30	60	90	120
c/c_0	1	0,74	0,54	0,29	0,15	0,09

Tableau 1 – Variation du rapport de la concentration c du chlorure de benzyle à sa concentration initiale c_0 en fonction du temps.

L'influence de la température sur la cinétique de la réaction du chlorure de benzyle avec l'eau a également été étudiée par Ellington *et al.* en déterminant la constante de vitesse k à différentes températures. Les résultats de cette expérience sont rassemblés dans le **tableau 2**.

$\theta / ^\circ\text{C}$	28	36	45
k / min^{-1}	$1,1 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{-3}$

Tableau 2 – Effet de la température θ sur la constante de vitesse k .

H.-J. Buysch et ses collaborateurs² ont effectué l'hydrolyse du chlorure de benzyle à 100 °C en faisant varier les proportions d'eau et de chlorure de benzyle, ainsi que la durée de la transformation. Les résultats de ces expériences sont rassemblés dans le **tableau 3** (page suivante).

¹ Ellington J.J., Stancil F.E. & Payne W.D. (1986). Measurement of hydrolysis rate constants for evaluation of hazardous waste land disposal: Data on 32 chemicals. (N° 1). U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100C5BZ.txt>

² Buysch H.-J., Hoffmann E., Jansen U., Ooms P., Schenke B. & Ag B. (17 mars 1998). Process for the preparation of benzyl alcohol (U.S. Patent No. 5,728,897). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US5728897A>

	Expérience 1	Expérience 2	Expérience 3	Expérience 4
Masse initiale de $PhCH_2Cl$ / g	126,5	126,5	126,5	126,5
Masse initiale d'eau / g	720	900	900	1260
Durée de la transformation / min	120	120	180	120
Masse de $PhCH_2Cl$ converti / g	96,1	116,4	122,7	125,2
Masse de $PhCH_2OH$ formé / g	77,3	93,5	95,4	100,6
Masse de $PhCH_2OCH_2Ph$ formé / g	9,0	10,9	17,3	11,8

Tableau 3 – Influence des conditions expérimentales sur la préparation de l'alcool benzylique.

Document 2 – Principe de fonctionnement d'un réfractomètre d'Abbe

Le réfractomètre d'Abbe (**figure 1**) permet la mesure de l'indice de réfraction d'un milieu afin d'identifier une espèce chimique et de contrôler sa pureté. La fourchette de mesure d'un réfractomètre d'Abbe est comprise entre 1,300 et 1,700.

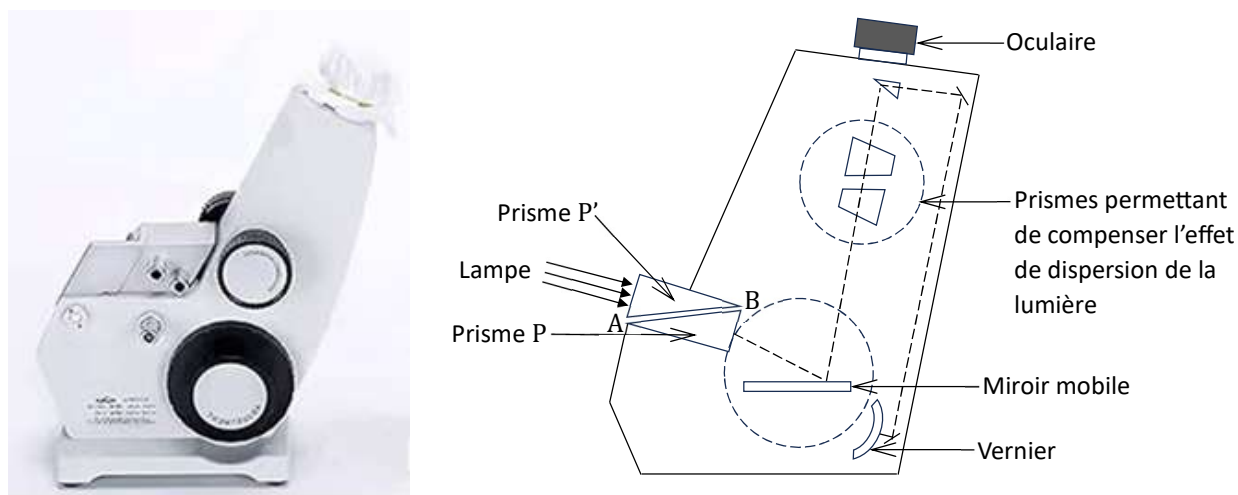


Figure 1 – Le réfractomètre d'Abbe : photographie (à gauche) et schéma (à droite).

Un réfractomètre d'Abbe est constitué de deux prismes P et P' en verre d'indice de réfraction n_p élevé entre lesquels est positionné un mince film d'une substance S d'indice de réfraction n_s inférieur à l'indice de réfraction n_p .

Le prisme P' est éclairé par une source lumineuse étendue. La face de ce prisme P' en contact avec la substance S étant dépolie, les rayons lumineux traversant la substance S arrivent sur la face AB du prisme P avec des angles incidents compris entre 0° et 90° (**figure 2**, page suivante).

Les rayons lumineux qui proviennent du milieu d'indice inconnu n_s sont déviés en traversant la face AB du prisme P. Puis, les rayons lumineux sont de nouveau déviés quand ils traversent la surface séparant le prisme P et l'air. Un système optique, constitué notamment d'une lunette et d'un oculaire, permet à l'observateur de visualiser la **figure 3** (page suivante) et de lire la valeur de l'indice de réfraction de la substance S à l'aide d'un vernier.

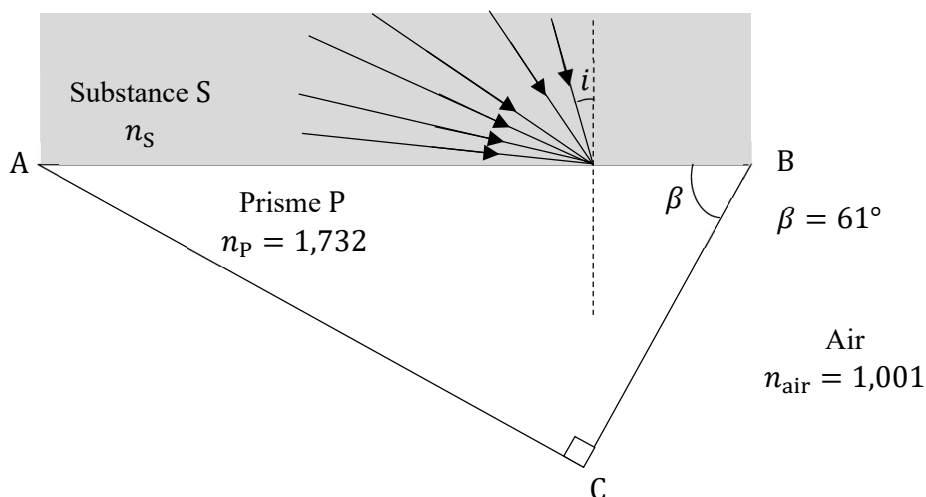


Figure 2 – Schéma du prisme P.

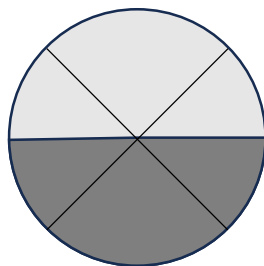


Figure 3 – Image à la sortie du réfractomètre.

Document 3 – Oxydation de l'alcool benzylique

• Protocole de l'oxydation de l'alcool benzylique

- Dans le ballon de 250 mL d'un montage à reflux, introduire 100 mL d'eau, 2,0 g de carbonate de sodium Na_2CO_3 , 5,0 g de permanganate de potassium KMnO_4 et 2,5 mL d'alcool benzylique.
- Agiter et chauffer à reflux pendant 30 minutes.
- Laisser refroidir et filtrer par gravitation.
- Recueillir le filtrat et ajouter environ 20 mL d'acide chlorhydrique concentré (environ $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).
- Essorer le précipité formé sur Büchner et le sécher.
- Recristalliser le solide, le sécher à l'étuve, puis mesurer sa température de fusion.
- À l'issue de cette synthèse, une masse de 2,13 g d'acide benzoïque est isolée.

• Diagrammes potentiel – pH

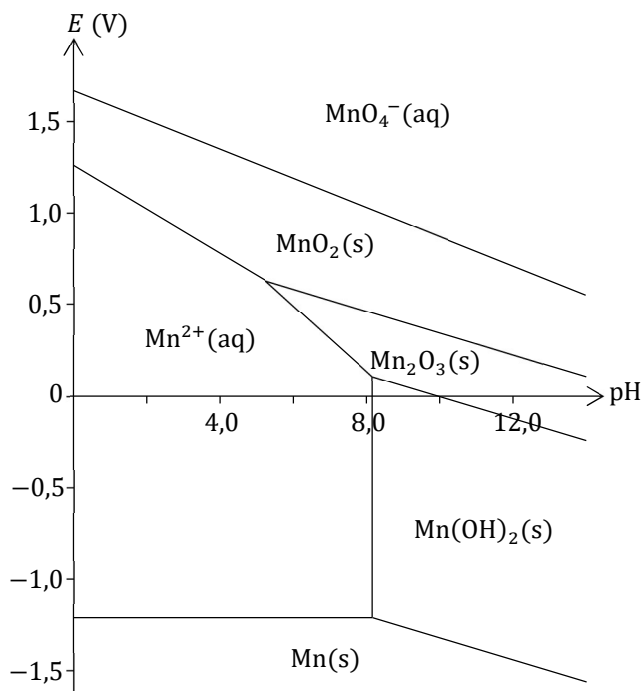


Figure 4 – Diagramme $E - pH$ du manganèse pour $C = 0,100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

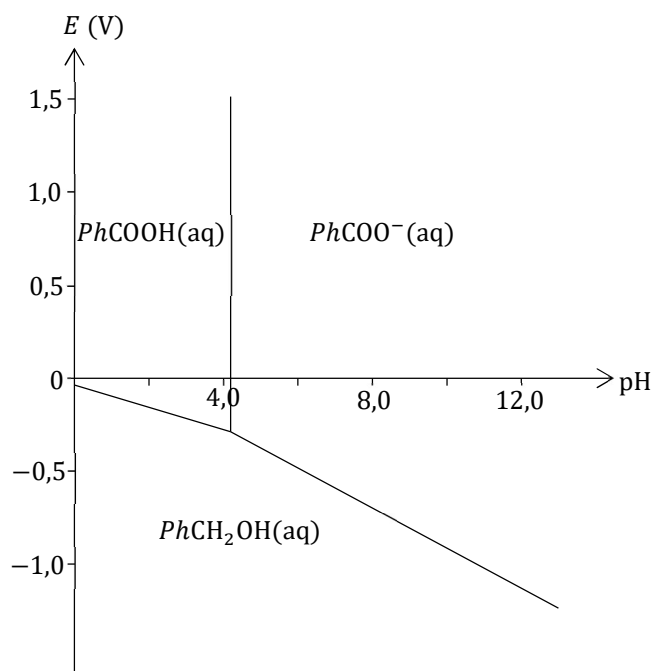


Figure 5 – Diagramme $E - pH$ de l'alcool benzylique pour $C = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Document 4 – Solubilités de l'acide benzoïque dans différents solvants

	Température d'ébullition	Densité	Précautions
Eau	100 °C	1	
Cyclohexane	81 °C	0,78	
Éthanol	79 °C	0,79	
Acétone	56 °C	0,78	

Tableau 4 – Propriétés de différents solvants.

	Eau	Cyclohexane	Éthanol	Acétone
Solubilité à 20 °C	3,4 g · L ⁻¹	13,5 g · L ⁻¹	55,9 g · L ⁻¹	54,2 g · L ⁻¹

Tableau 5 – Solubilité de l'acide benzoïque à 20 °C dans différents solvants.

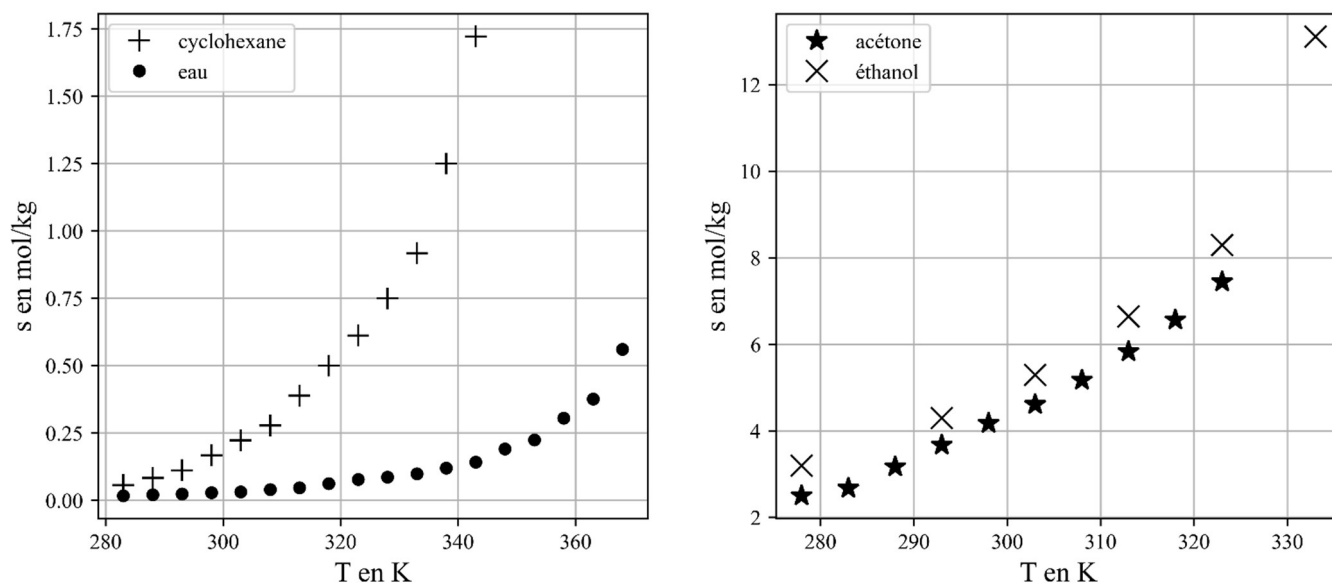


Figure 6 – Influence de la température sur la solubilité s de l'acide benzoïque dans différents solvants (en mol par kg de solvant)³.

Document 5 – Résistance chauffante d'un chauffe-ballon

Un chauffe-ballon (**figure 7**) est un dispositif de chauffage constitué d'une coque en matériau très résistant aux hautes températures tel que le polypropylène, d'un élément chauffant constitué d'une résistance permettant de convertir l'énergie électrique en énergie thermique et d'un système de régulation de température.

L'élément chauffant du chauffe-ballon est souvent constitué de fils d'un alliage de nickel et de chrome intégrés dans une enveloppe en fibre de verre ou en tissu. Lorsque le courant circule dans ces fils, ils chauffent et l'enveloppe répartit la chaleur uniformément sur la verrerie placée dans le chauffe-ballon.

Le **tableau 6** précise les spécifications pour un modèle de chauffe-ballon.



Figure 7 – Chauffe-ballon.

Plage de température	Jusqu'à 450 °C
Capacité	250 mL
Puissance	150 W
Alimentation	230 V

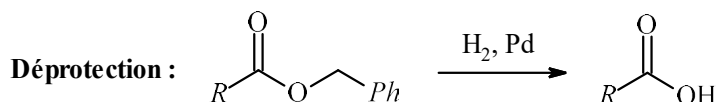
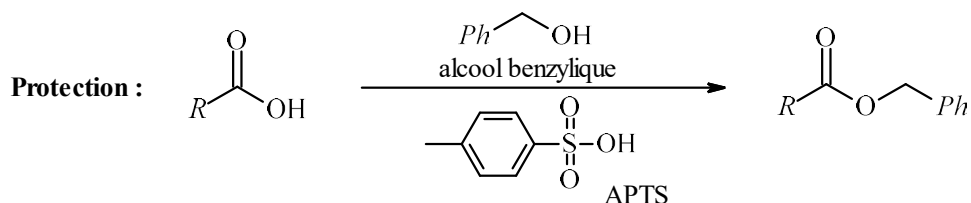
Tableau 6 – Spécifications d'un chauffe-ballon.

³ D'après Long B., Li J., Zhang R. & Wan L. (2010). Solubility of benzoic acid in acetone, 2-propanol, acetic acid and cyclohexane: Experimental measurement and thermodynamic modeling. *Fluid Phase Equilibria*, 297(1), 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2010.06.021> et Nordström F. L. & Rasmuson Å. C. (2006). Solubility and melting properties of salicylamide. *Journal Of Chemical & Engineering Data*, 51(5), 1775-1777. <https://doi.org/10.1021/jc060178m>

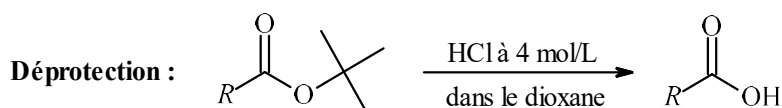
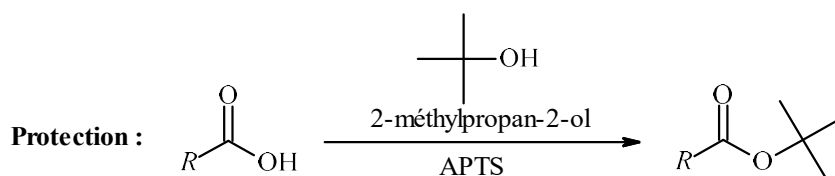
Document 6 – Méthodes de protection d'acides carboxyliques et d'amines

Protection du groupe carboxyle

- Conditions d'utilisation de l'alcool benzylique comme réactif protecteur

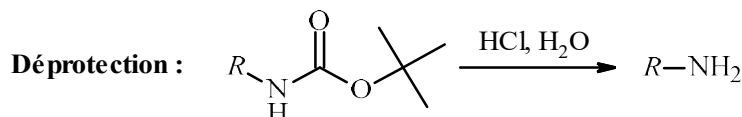
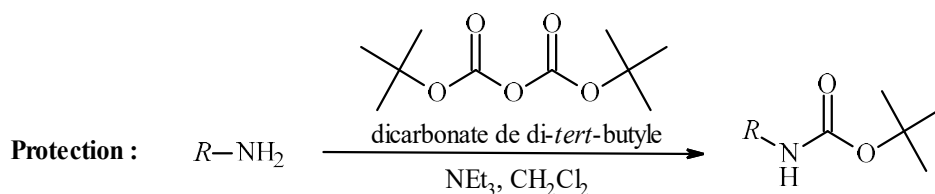


- Conditions d'utilisation du 2-méthylpropan-2-ol comme réactif protecteur

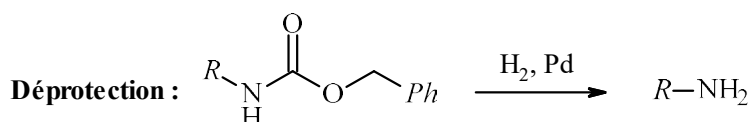
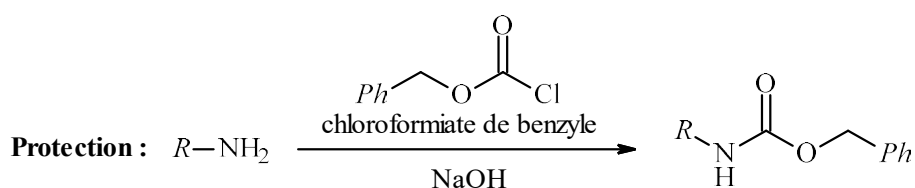


Protection du groupe amino

- Conditions d'utilisation du dicarbonate de di-*tert*-butyle comme réactif protecteur

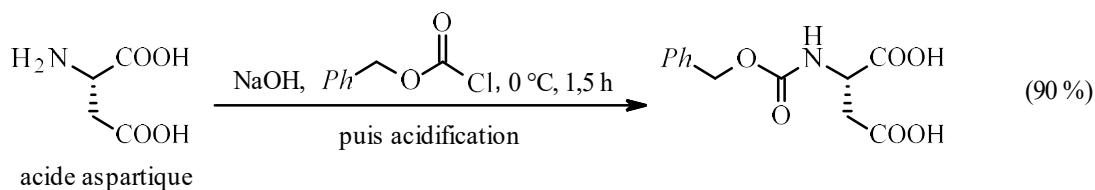


- Conditions d'utilisation du chloroformiate de benzyle comme réactif protecteur

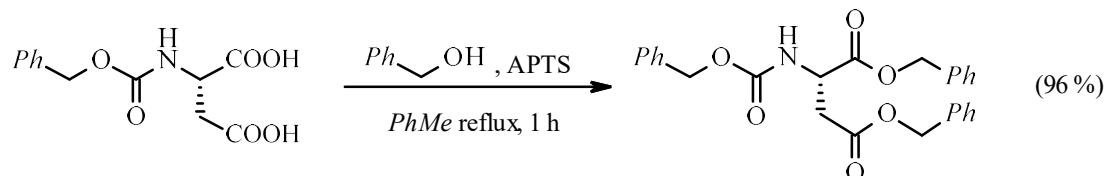


Document 7 – Synthèse de l'aspartame (Schlatter, 1965)

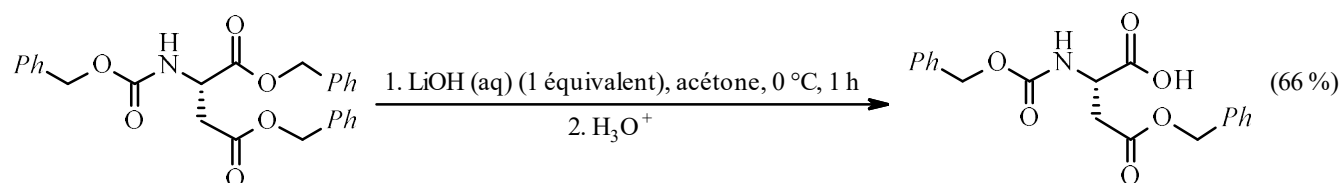
Étape 1 :



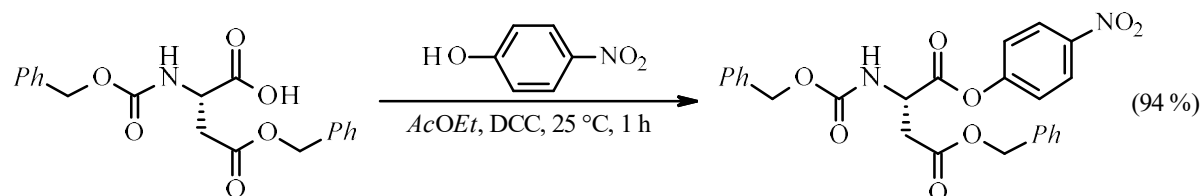
Étape 2 :



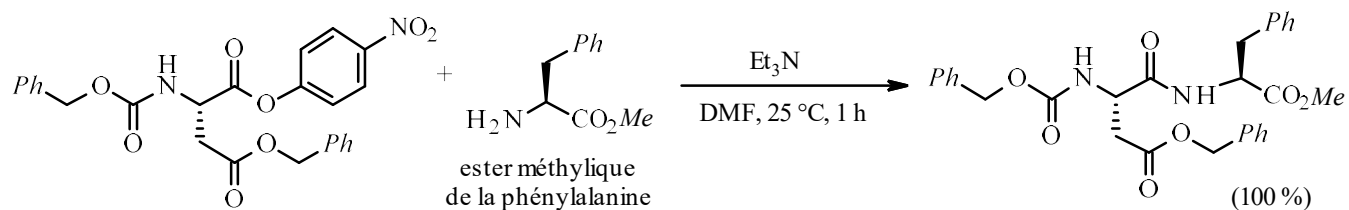
Étape 3 :



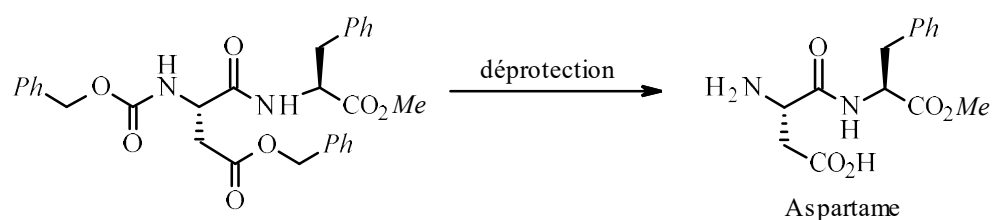
Étape 4 :



Étape 5 :

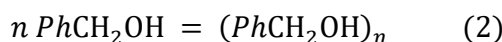


Étape 6 :



Document 8 – Données expérimentales sur le comportement de l'alcool benzylique en solution dans CCl_4

Lorsque l'alcool benzylique est dissous dans le tétrachlorométhane CCl_4 , il peut s'associer sous forme d'oligomère cyclique selon la réaction d'équation (2) :



Afin de déterminer le nombre n de molécules d'alcool benzylique présentes dans l'oligomère, six solutions ont été préparées en mélangeant les volumes d'alcool benzylique et de tétrachlorométhane indiqués dans le **tableau 7**.

Solution	1	2	3	4	5	6
Volume de PhCH_2OH pur en mL	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
Volume de CCl_4 pur en mL	100	100	100	100	100	100

Tableau 7 – Composition des solutions étudiées.

Pour chacune de ces six solutions, on mesure ensuite, à 30°C , A_{libre} , absorbance à 3620 cm^{-1} correspondant au maximum d'absorption de PhCH_2OH et A_{olig} , absorbance à 3340 cm^{-1} correspondant au maximum d'absorption de l'oligomère $(\text{PhCH}_2\text{OH})_n$. Ces mesures ont été effectuées en plaçant les solutions dans une cuve dont la longueur du trajet optique vaut $\ell = 1,00\text{ cm}$.

On considère que seule l'espèce PhCH_2OH absorbe à 3620 cm^{-1} et seule l'espèce $(\text{PhCH}_2\text{OH})_n$ absorbe à 3340 cm^{-1} . On note $\varepsilon_{\text{libre}} = 61\text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ le coefficient d'absorption molaire de PhCH_2OH à 3620 cm^{-1} et $\varepsilon_{\text{olig}} = 28\text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ celui de $(\text{PhCH}_2\text{OH})_n$ à 3340 cm^{-1} .

La **figure 8** fournit le tracé de $(A_{\text{olig}})^{1/n}$ en fonction de A_{libre} pour différentes valeurs de n .

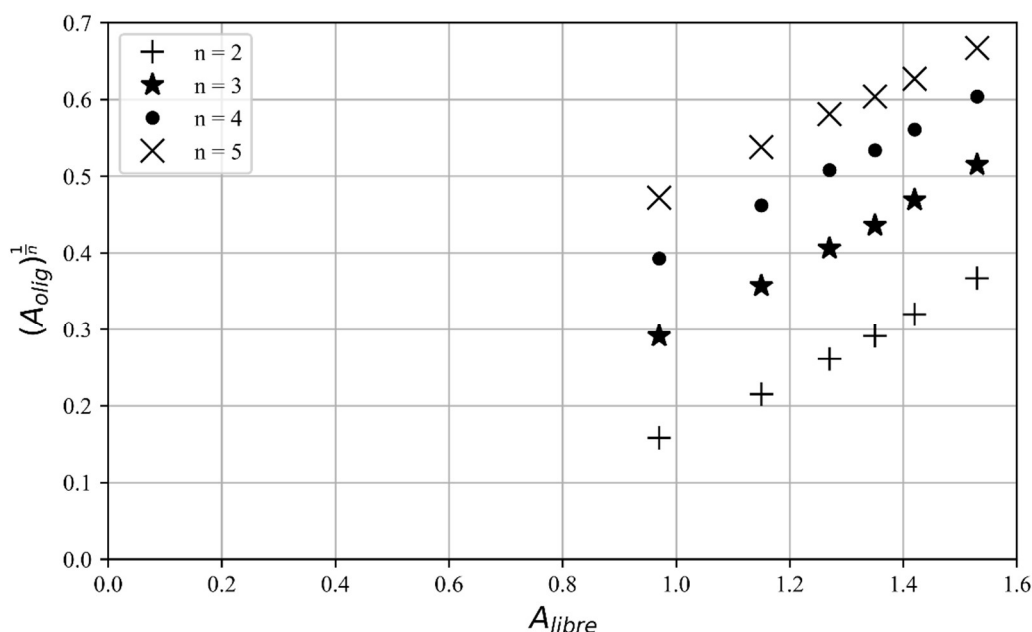


Figure 8 – $(A_{\text{olig}})^{1/n}$ en fonction de A_{libre} pour différentes valeurs du nombre n de molécules d'alcool benzylique présentes dans l'oligomère⁴.

⁴ D'après Frohlich H. (1993). Using infrared spectroscopy measurements to study intermolecular hydrogen bonding: calculating the degree of association, equilibrium constant, and bond energy for hydrogen bonding in benzyl alcohol and phenol. *Journal Of Chemical Education*, 70(1), A3. <https://doi.org/10.1021/ed070pa3>

B. Analyse et exploitation des documents

B.1. Préparation de l'alcool benzylique

Cette sous-partie s'appuie essentiellement les **documents 1 et 2**.

- Q1.** Montrer que les résultats expérimentaux du **tableau 1** sont en accord avec le fait que la réaction (1) entre le chlorure de benzyle et l'eau est d'ordre apparent 1.
- Q2.** Argumenter sur la possibilité de choisir entre les mécanismes S_N1 et S_N2 pour la réaction (1) entre le chlorure de benzyle et l'eau.
- Q3.** À l'aide des données du **tableau 2**, déterminer l'énergie d'activation de la réaction de d'hydrolyse du chlorure de benzyle en alcool benzylique.
- Q4.** Écrire une équation de réaction expliquant la formation de l'éther dibenzylique $PhCH_2OCH_2Ph$ lors des expériences effectuées par H.-J. Buysch et ses collaborateurs.
- Q5.** Identifier un ou plusieurs facteurs permettant de limiter la formation de l'éther dibenzylique $PhCH_2OCH_2Ph$ et proposer une explication.

La pureté de l'alcool benzylique recueilli à l'issue de sa synthèse est vérifiée en mesurant son indice de réfraction à l'aide d'un réfractomètre.

- Q6.** Compléter le **document réponse 1 dans l'annexe à rendre avec la copie page 29** en représentant la trajectoire dans le prisme P, puis dans l'air, d'un rayon incident arrivant sur la face AB du prisme P avec un angle i voisin de 45° par rapport à la normale à la face AB du prisme P.
- Q7.** Dans le cas d'un rayon incident arrivant sur la face AB du prisme P avec un angle $i = 90^\circ$ par rapport à la normale à la face AB du prisme P (incidence rasante), déterminer l'expression de l'angle de réfraction limite i_{lim1} du rayon réfracté dans le prisme en fonction de n_S et n_P . Calculer sa valeur dans le cas de l'alcool benzylique dont l'indice de réfraction vaut $n_S = 1,5384$.

Le rayon lumineux qui provient de la substance S et qui tombe sur le prisme P sous une incidence rasante ($i = 90^\circ$) émerge du prisme dans l'air en faisant un angle i_{lim2} par rapport à la normale à la face BC du prisme P.

- Q8.** Représenter, sur le **document réponse 2 dans l'annexe à rendre avec la copie page 29**, la trajectoire de ce rayon dans le prisme et dans l'air et montrer que :

$$n_S = n_P \times \sin \left(\beta + \arcsin \left(\frac{n_{air} \cdot \sin(i_{lim2})}{n_P} \right) \right).$$

- Q9.** Calculer la valeur d'angle limite i_{lim2} dans le cas de l'alcool benzylique et expliquer la présence d'une zone éclairée et d'une zone sombre observée dans le réfractomètre.

B.2. Conversion de l'alcool benzylique en acide benzoïque

Cette sous-partie s'appuie essentiellement sur les **documents 3, 4 et 5**.

- Q10.** Déterminer la valeur de la résistance de l'élément chauffant du chauffe-ballon utilisé pour effectuer l'oxydation de l'alcool benzylique en admettant que ses caractéristiques concordent avec les données fournies dans le **document 5**.

Q11. En supposant que 80 % de l'énergie fournie par la résistance chauffante du chauffe-ballon est transférée au milieu réactionnel (assimilé à 100 mL d'eau), estimer le temps nécessaire pour que le contenu du ballon initialement à 20 °C atteigne le reflux, c'est-à-dire pour que la première bulle de vapeur d'eau apparaisse.

Quand le reflux est établi, le milieu réactionnel continue à être chauffé à puissance constante pendant trente minutes.

Q12. Déterminer la masse d'eau vaporisée pendant la durée du chauffage à reflux et commenter la valeur obtenue.

Q13. Déterminer le pH d'une solution aqueuse de carbonate de sodium ($2 \text{Na}^+ ; \text{CO}_3^{2-}$) à $20 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ et en déduire le rôle du carbonate de sodium lors de l'oxydation de l'alcool benzylique par l'ion permanganate.

Q14. Justifier que l'oxydation de l'alcool benzylique par l'ion permanganate est thermodynamiquement favorisée et proposer deux équations de réaction pouvant modéliser cette transformation en tenant compte des conditions expérimentales.

Q15. En considérant les quantités initiales des réactifs, déterminer l'équation de la réaction modélisant l'oxydation de l'alcool benzylique par l'ion permanganate au cours de l'étape de reflux.

Q16. Expliciter le rôle de l'acide chlorhydrique et proposer une méthode expérimentale pour vérifier qu'il a été introduit en quantité suffisante.

Q17. Déterminer le rendement de la synthèse de l'acide benzoïque.

Q18. Discuter du choix du solvant pour effectuer la recristallisation de l'acide benzoïque formé.

B.3. Utilisation de l'alcool benzylique comme réactif protecteur

Cette sous-partie s'appuie essentiellement sur les **documents 6 et 7**.

L'aspartame est un dipeptide possédant un pouvoir édulcorant deux cents fois supérieur à celui du saccharose. La voie de synthèse de l'aspartame proposée par Schlatter en 1965 est décrite dans le **document 6** et utilise l'alcool benzylique comme réactif protecteur.

Q19. Mettre en évidence l'absence de sélectivité lors de la formation de l'aspartame par la réaction directe de l'acide aspartique et de l'ester méthylique de la phénylalanine en dessinant la représentation topologique des produits susceptibles d'être formés.

Q20. Justifier la nécessité de traiter l'acide aspartique par la soude lors de l'étape 1 de la synthèse de l'aspartame décrite dans le **document 7**.

Q21. Écrire le mécanisme réactionnel de la protection d'un groupe carboxyle de l'acide aspartique par l'alcool benzylique dans l'étape 2 et proposer des conditions expérimentales permettant de favoriser la formation du produit.

Q22. Commenter le choix des conditions expérimentales utilisées pour déprotéger sélectivement l'un des groupes carboxyle lors de l'étape 3 de la synthèse de l'aspartame.

Q23. Proposer des conditions expérimentales permettant d'obtenir l'aspartame lors de l'étape 6.

Q24. Justifier le choix de l'alcool benzylique comme réactif protecteur du groupe carboxyle plutôt que l'utilisation du 2-méthylpropan-2-ol.

B.4. Étude d'un oligomère de l'alcool benzylique

Cette sous-partie s'appuie essentiellement sur le **document 8**.

Q25. Établir la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre K_2° de (2) et les concentrations de $PhCH_2OH$ et $(PhCH_2OH)_n$ en solution dans CCl_4 à l'équilibre. En déduire la relation entre K_2° , ε_{libre} , ε_{olig} , A_{libre} , A_{olig} et la longueur ℓ du trajet optique.

Q26. Montrer que $(A_{olig})^{1/n}$ est une fonction linéaire de A_{libre} .

Q27. À partir des résultats du **document 8**, déterminer le nombre n de molécules d'alcool benzylique associées dans l'oligomère cyclique. Proposer un schéma de la structure de l'oligomère cyclique et indiquer la nature des interactions s'établissant entre les molécules d'alcool benzylique lors de sa formation.

Q28. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre $K_2^\circ(30\text{ °C})$ de (2) à 30 °C.

Des études similaires effectuées à 40 °C et 50 °C ont permis d'évaluer l'enthalpie standard de réaction de (2) : $\Delta_r H_2^\circ \approx 87\text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Q29. En déduire une estimation de l'énergie de la liaison entre deux unités alcool benzylique dans l'oligomère $(PhCH_2OH)_n$. Commenter.

MAJEURE PHYSIQUE

(à traiter uniquement par les candidats ayant choisi la discipline majeure physique à l'inscription)

Centrale solaire orbitale

Le sujet s'intéresse au dispositif de la centrale solaire orbitale – *Solar Power Satellite* (SPS) en anglais. À l'aide d'un satellite en orbite autour de la Terre, on peut *a priori* capturer de l'énergie provenant du Soleil, pour la transformer et l'envoyer sur Terre.

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) souhaite produire de l'énergie solaire depuis l'espace avec un tel dispositif et a eu le financement associé au projet approuvé en novembre 2022. Avec un objectif de lancement en 2025, l'ESA a débuté ses phases de test pour valider sa faisabilité et sa viabilité. *In fine*, la mission Solaris comprendrait le lancement d'un satellite équipé de panneaux solaires en orbite géostationnaire, à une altitude d'environ 36 000 kilomètres au-dessus de la Terre (**figure 1**). Le satellite serait capable de capter continûment l'énergie solaire, sans les interruptions causées par les conditions météorologiques de la surface terrestre. Avec une telle infrastructure à plusieurs satellites, l'ESA espère fournir de l'électricité spatiale à hauteur de 25 % des besoins de l'Europe.

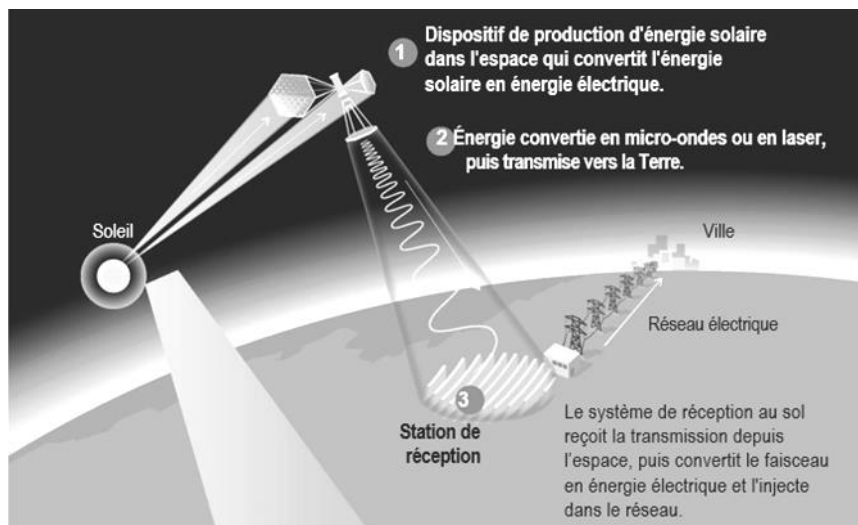


Figure 1 – Schéma de principe⁵.

Ce sujet vise à apporter un éclairage scientifique sur la problématique de la collecte et de l'acheminement de l'énergie solaire depuis l'espace jusqu'à la Terre. Il comporte deux parties :

- la partie A fournit des données et un corpus de documents de natures diverses ;
- la partie B contient l'ensemble des questions à traiter en s'appuyant notamment sur les éléments de la partie A. Elle est subdivisée en trois sous-parties largement indépendantes qui traitent successivement de l'orbite géostationnaire d'un satellite, de l'acheminement d'énergie électromagnétique sans fil et de la réception sur Terre.

⁵ L'énergie solaire spatiale. (2023). *ENGIE Recherche et innovation* [image inspirée par Jamie Brown. (2019). *The Sunday Morning Herald*].

<https://innovation.engie.com/fr/news/interviews/technologie-emergentes-durables/l-energie-solaire-spatiale/29021>

A. Données et corpus de documents

Données

- Constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Masse de la Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$.
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,38 \times 10^3 \text{ km}$.
- Permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Masses molaires (en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) :

$$\text{H} : 1 \quad ; \quad \text{C} : 12 \quad ; \quad \text{N} : 14 \quad ; \quad \text{O} : 16 .$$

- Rotationnel du champ de vecteur $\vec{a} = a_x \vec{e}_x + a_y \vec{e}_y + a_z \vec{e}_z$ dans le système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) de vecteurs unitaires associés $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$:

$$\text{rot } \vec{a} = \left(\frac{\partial a_z}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial z} \right) \vec{e}_x + \left(\frac{\partial a_x}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial x} \right) \vec{e}_y + \left(\frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y} \right) \vec{e}_z .$$

- En notant $\langle . \rangle_t$ la moyenne temporelle, $\langle \cos^2(2\pi f t + \varphi) \rangle_t = \frac{1}{2}$ si f et φ sont des grandeurs constantes.
- Évaluation de l'incertitude de mesure par une approche statistique (type A) :

Lorsque N mesures sont effectuées, la meilleure valeur à retenir pour la grandeur mesurée est la valeur moyenne des mesures effectuées, notée \bar{x} . L'estimation de l'incertitude nécessite alors un traitement statistique qui indique la dispersion des valeurs. L'incertitude-type de la moyenne des N mesures est l'écart-type sur la moyenne

$$u(\bar{x}) = \frac{u(x)}{\sqrt{N}}$$

où $u(x)$ est l'incertitude-type (ou écart-type σ_{exp}) de la série de valeurs qui se calcule à l'aide des fonctions statistiques d'une calculatrice ou d'un tableur.

- Comparaison à une valeur de référence :

On compare une valeur mesurée x_{exp} à une valeur de référence $x_{\text{réf}}$ en calculant l'écart normalisé (appelé aussi z-score) à l'aide du quotient

$$z = \frac{|x_{\text{exp}} - x_{\text{réf}}|}{u(x_{\text{exp}})}$$

où $u(x_{\text{exp}})$ est l'incertitude-type relative à la grandeur mesurée. Lorsque $z \leq 2$, on considère que le résultat de la mesure est compatible avec la valeur de référence.

Document 1 – Procédure de lancement⁶

Les satellites sont placés par le lanceur sur une orbite provisoire, parfois appelée *orbite de parking*, généralement circulaire. L'allumage d'un moteur incorporé à chaque satellite modifie l'orbite du satellite considéré et le place sur une orbite dite *de transfert*. Cette orbite est elliptique : son périégée est à l'altitude de l'orbite de parking et son apogée a pour altitude celle de l'*orbite finale* (supposée ici circulaire). Pour ce faire, il faut procéder en quatre étapes (**figure 2**) : allumage du moteur à l'instant où le satellite est à l'emplacement désiré pour le périégée de l'orbite de transfert, parcours inertiel sur l'orbite de transfert moteur éteint, renversement du satellite, réallumage du moteur à l'apogée de l'orbite pour circulariser celle-ci.

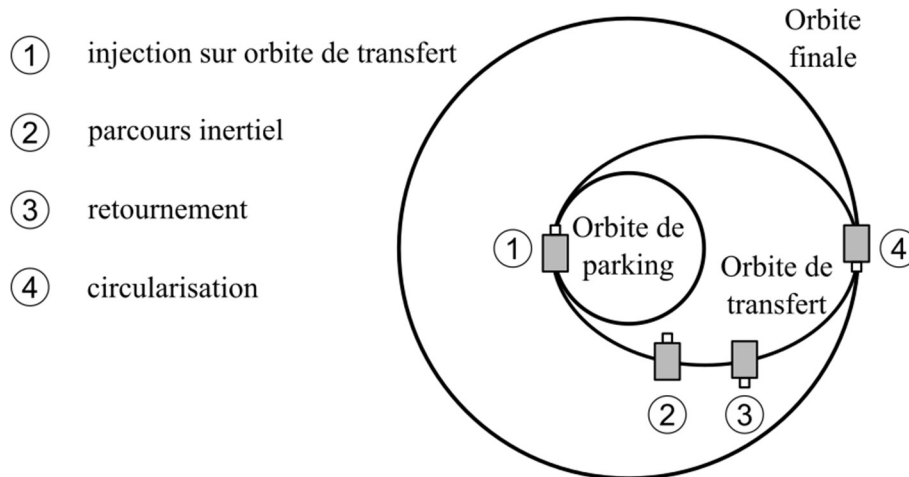


Figure 2 – Étapes d'une procédure de lancement : transfert, puis circularisation.

Le **tableau 1** fournit les accroissements de vitesse à communiquer au satellite dans l'hypothèse d'orbites coplanaires pour trois altitudes finales envisagées.

Altitude finale (km)	1 400	10 000	35 786
Altitude de l'orbite de parking (km)	200	200	200
Demi-grand axe de l'orbite de transfert (km)	7 178	11 478	24 371
Vitesse du satellite sur l'orbite de parking ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	7 784	7 784	7 784
Vitesse du satellite au périégée de l'orbite de transfert ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8 103	9 299	10 239
Vitesse du satellite à l'apogée de l'orbite de transfert ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	6 853	3 735	1 597
Vitesse du satellite sur l'orbite finale ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	7 159	4 933	3 075
Accroissement de vitesse pour l'injection sur l'orbite de transfert ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	319	1 514	2 455
Accroissement de vitesse pour l'injection sur l'orbite finale ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	306	1 199	1 477

Tableau 1 – Accroissements de vitesse (orbites coplanaires).

⁶ D'après Maral G. (1996). Systèmes de télécommunications par satellite. *Techniques de l'ingénieur*, 11-12. <https://doi.org/10.51257/a-v1-e7560>

Document 2 – Formule de Tsiolkovski⁷

Physicien russe autodidacte, né en 1857, Konstantin Tsiolkovski a joué un rôle incontesté de précurseur dans le domaine spatial. Dès 1898, il a notamment recommandé l'utilisation d'ergols liquides, l'hydrogène et l'oxygène, pour la propulsion des fusées. En 1903, dans un article intitulé « Exploration de l'espace au moyen d'engins à réaction », il explique comment la propulsion par réaction peut fonctionner dans le vide et communique l'expression permettant de calculer la vitesse atteinte par une fusée en fonction de la vitesse d'éjection des gaz.

La formule de Tsiolkovski, donne la variation de vitesse de l'astronef entre le début et la fin de la phase propulsée considérée :

$$\Delta v = g_0 I_{sp} \ln \left(\frac{m_i}{m_f} \right)$$

où

- $g_0 = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ est l'accélération due à la pesanteur ;
- I_{sp} est l'impulsion spécifique du système propulsif exprimée en secondes ;
- m_i est la masse totale de l'astronef au début de la phase propulsée (indice « i » pour initial) ;
- m_f est la masse totale de l'astronef à l'issue de la phase propulsée (indice « f » pour final).

Document 3 – Ergols UDMH-NTO⁸

En astronautique, on appelle *propergol liquide* tout système chimique composé d'un ou plusieurs ergols stockés à l'état liquide pour produire, par décomposition ou par combustion, un mélange gazeux dont la détente à travers une tuyère fournit une force de poussée. De tels propergols ne permettent pas d'atteindre des vitesses très élevées mais offrent une poussée suffisante pendant le temps nécessaire pour s'affranchir de la pesanteur et placer des charges utiles en orbite. Ils sont donc couramment utilisés pour fournir l'impulsion nécessaire au décollage des lanceurs et pour les manœuvrer dans l'espace.

Il existe de nombreuses combinaisons de propergols ayant fait leurs preuves et conduisant à toute une variété de propulsions répondant aux différents besoins. Pour placer un satellite en orbite géostationnaire, on utilise un propulseur réalisant la réaction entre la 1,1-diméthylhydrazine ($\text{H}_2\text{N}-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ notée UDMH) et le peroxyde d'azote (N_2O_4 noté NTO). Ce mélange est utilisé pour la propulsion des sondes spatiales car sa conservation est garantie sur de longues durées. L'impulsion spécifique de ce mélange est égale à 305 s.

⁷ D'après Bouchez M. (2010). Propulsion aérospatiale - Lois simplifiées pour le dimensionnement et exercices d'applications. *Techniques de l'ingénieur*, 3. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bm3003>

⁸ D'après articles du projet Wikimedia. (2025). Propergol liquide. https://fr.wikipedia.org/wiki/Propergol_liquide
Impulsion spécifique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Impulsion_spécifique

Document 4 – Transmission du rayonnement par l'atmosphère⁹

Pour caractériser la capacité de l'atmosphère à transmettre le rayonnement, on définit la *transmittance* comme le rapport entre l'intensité du rayonnement transmis par rapport à l'intensité du rayonnement incident. Elle permet de caractériser la perméabilité de l'atmosphère dans son ensemble à telle ou telle fréquence, mais est mal adaptée pour caractériser le phénomène d'absorption résultant d'une couche atmosphérique donnée.

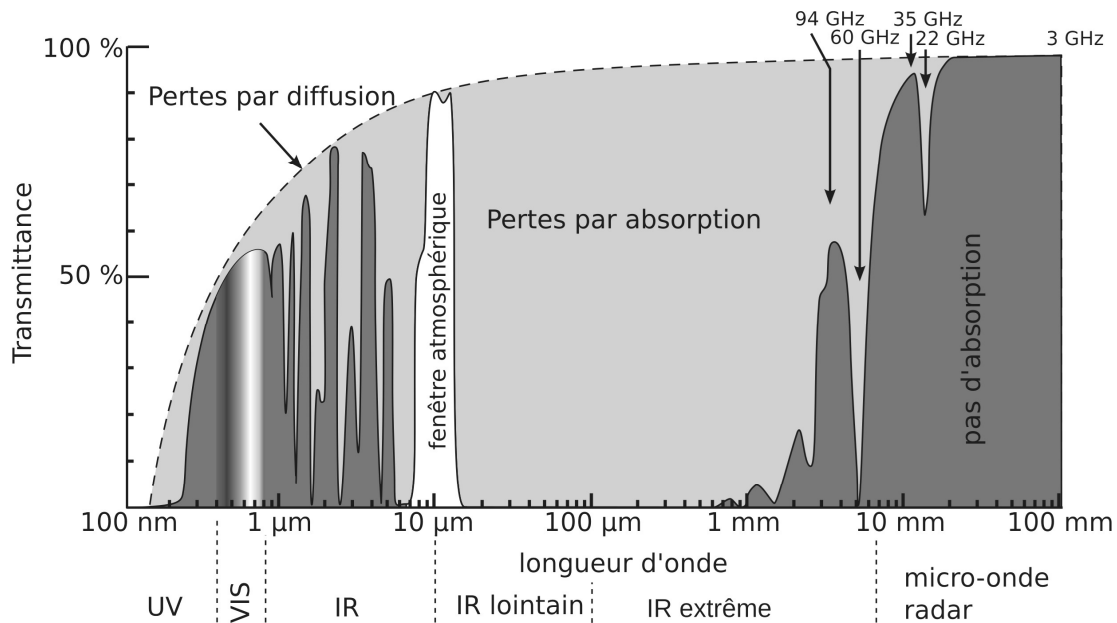


Figure 3 – Spectre de transmission de l'atmosphère¹⁰. Dans le visible, les pertes résultent principalement de la diffusion Rayleigh. Dans l'infrarouge (IR), elles proviennent de l'absorption.

Pour transmettre de l'énergie sur des distances mesurées en millimètres ou en centimètres, par exemple pour charger une brosse à dents électrique depuis sa base ou un véhicule électrique sur la chaussée, l'induction électromagnétique fonctionne parfaitement. Mais la transmission d'énergie sur de plus longues distances ne peut être réalisée efficacement qu'en convertissant l'électricité en faisceau laser ou micro-ondes.

Les principaux avantages et inconvénients de la méthode laser sont liés à sa courte longueur d'onde, qui serait d'environ un micromètre pour cette application. Ces faisceaux laser peuvent être transmis et reçus par des composants relativement petits : l'optique d'émission dans l'espace mesurerait environ un mètre pour une installation de 1 GW et la station de réception au sol mesurerait plusieurs centaines de mètres de long. Cependant, le laser à courte longueur d'onde serait souvent bloqué par l'atmosphère ; les molécules d'eau des nuages absorberaient ou diffuseraient le faisceau laser comme elles le feraient avec la lumière du Soleil.

Mais les micro-ondes, par exemple celles dont les longueurs d'onde sont comprises entre cinq et dix centimètres, ne présenteraient pas de tels problèmes de transmission. Les micro-ondes présentent également un avantage en termes d'efficacité pour un système d'énergie solaire spatial, où l'énergie doit être convertie deux fois : d'abord du courant continu en micro-ondes à bord du satellite, puis des

⁹ Texte d'après Sasaki S. (2014). It's always sunny in space. *IEEE Spectrum*, 51(5), 46-51.

<https://doi.org/10.1109/mspec.2014.6808461>

¹⁰ D'après article du projet Wikimedia. (2025). Absorption (optique). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Absorption_(optique))

micro-ondes en courant continu au sol. En laboratoire, les chercheurs ont atteint un rendement d'environ 80 % pour cette conversion d'énergie aux deux extrémités. Les fabricants d'électronique s'efforcent désormais d'atteindre de tels taux dans des composants disponibles sur le marché, tels que des amplificateurs de puissance à base de semi-conducteurs au nitrure de gallium, qui pourraient être utilisés dans les émetteurs micro-ondes.

Document 5 – Analyseur d'ozone¹¹

Le spectre d'absorption de la lumière par l'ozone montre que l'absorption est forte dans l'ultraviolet (**figure 4**). Le principe des analyseurs d'ozone consiste donc à prélever l'air en continu et à le faire traverser une cellule de mesure où il est soumis à un rayonnement monochromatique émis par une lampe à mercure (longueur d'onde 253,7 nm). Le rayonnement UV qui traverse la cellule d'absorption est mesuré à l'aide d'un détecteur, puis converti en un signal électrique corrélé à la concentration en ozone de l'air échantillonné.

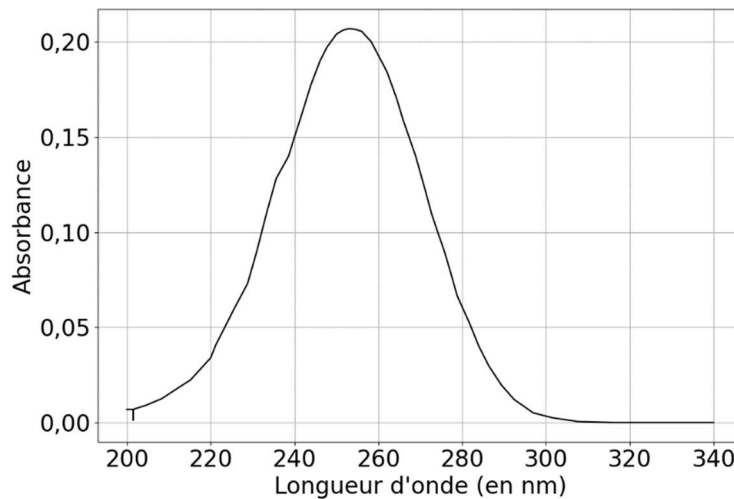


Figure 4 – Spectre d'absorption de l'ozone¹².

L'absorbance est définie par

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

où

- log est le logarithme en base 10 ;
- I est l'intensité de la radiation UV mesurée avec l'échantillon prélevé contenant l'ozone ;
- I_0 est l'intensité de la radiation UV mesurée en absence d'ozone, avec l'échantillon dit de « référence ».

L'absorption de la lumière par l'ozone suit la loi de Beer-Lambert. À partir de cette loi, la concentration en ozone dans l'échantillon peut être déduite de la mesure de l'intensité du rayonnement.

¹¹ Texte d'après Raventos C. (décembre 2003). Évaluation d'un analyseur d'ozone par absorption UV. *Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air. INERIS*. 9-10.

https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/Etude2.1_rapport_final_V1_Envitec_201203.pdf

¹² D'après Di Benedetto D. & Breuil P. (2023). Spectrophotométrie d'absorption dans l'ultraviolet et le visible. *Techniques de l'ingénieur*, 4. <https://doi.org/10.51257/a-v2-p2795>

La validation de cet analyseur d'ozone a été réalisée par des mesures d'étalonnage (**figure 5**) sur une cellule à flux gazeux de longueur $\ell = 800$ mm, avec différentes concentrations C d'ozone (exprimées en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

L'ajustement linéaire réalisé donne le résultat suivant :

$$A = p \times C \quad \text{avec} \quad p = 4,94 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mg}^{-1}.$$

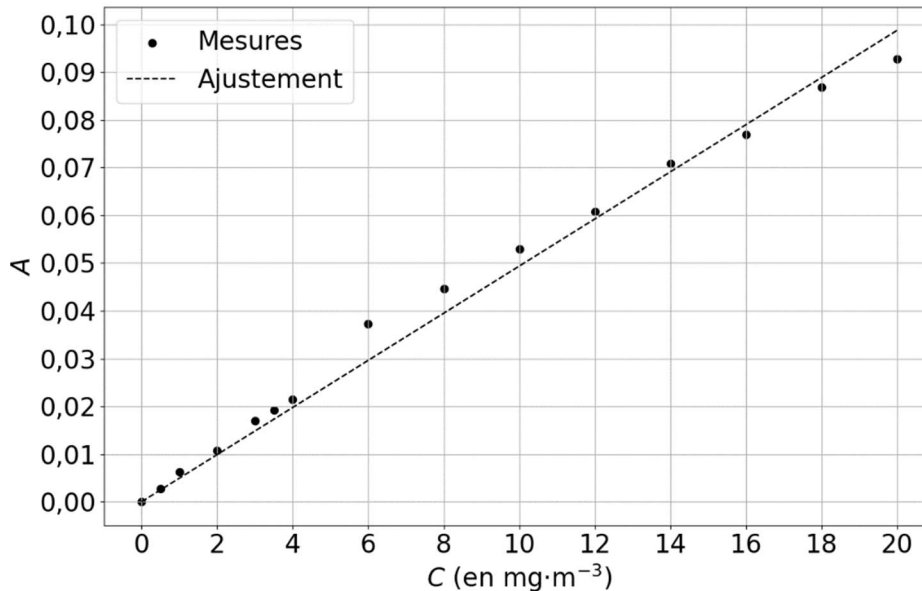


Figure 5 – Courbe d'étalonnage de l'analyseur d'ozone¹³.

Document 6 – Diffraction par une ouverture circulaire¹⁴

Présentation de l'expérience n° 1

Si un faisceau lumineux fournit un éclairage uniforme et traverse une ouverture circulaire, on observe un motif de diffraction formé d'une série d'anneaux lumineux concentriques entourant un point lumineux central (**figure 6(b)**, page suivante). La région brillante au centre est appelée *disque d'Airy* et contient environ 84 % de l'énergie incidente totale. Le disque d'Airy est lié au concept de résolution angulaire ou spatiale d'un système optique qui correspond à la capacité à distinguer les petits détails d'un objet, estimée par le critère de résolution de Rayleigh. Il est largement utilisé en astronomie, en photographie et en microscopie, par exemple. L'équation suivante montre que le diamètre d'un disque d'Airy est lié à la longueur d'onde de la source lumineuse :

$$D = \frac{2,44 \lambda L}{d}$$

où λ est la longueur d'onde de la source, d est le diamètre de l'ouverture circulaire et L est la distance entre l'ouverture et le plan d'observation.

¹³ D'après De Maria L., Rizzi G., Serragli P., Marini R. & Fialdini L. (2008). Optical sensor for ozone detection in medium voltage switchboard. *IEEE Sensors*, 1297-1300. <https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716682>

¹⁴ Texte d'après Rivera-Ortega U., & Pico-Gonzalez B. (2016). Wavelength estimation by using the Airy disk from a diffraction pattern with didactic purposes. *Physics Education*, 51(1), 015012. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/1/015012>

Le dispositif expérimental proposé est illustré à la **figure 6(a)**. On cherche à déterminer la longueur d'onde de la source en mesurant le diamètre D du disque d'Airy. L'objet diffractant est une ouverture circulaire de diamètre $d = 100 \mu\text{m}$. Ce dispositif est éclairé par un faisceau collimaté provenant d'une diode laser connectée à une source de tension. La **figure 6(b)** illustre les observations sur l'écran de visualisation situé à une distance $L = 41,0 \text{ cm}$. Une webcam Logitech-C920 a été utilisée pour stocker les images. La taille du disque d'Airy en pixels est ensuite convertie en unités spatiales réelles (cm). La **figure 6(c)** présente un exemple de mesure particulier réalisé avec un laser à diode verte, où le diamètre du disque d'Airy (repéré par la ligne en pointillés) mesure 161,8 pixels correspondant à $D = 0,522 \text{ cm}$.

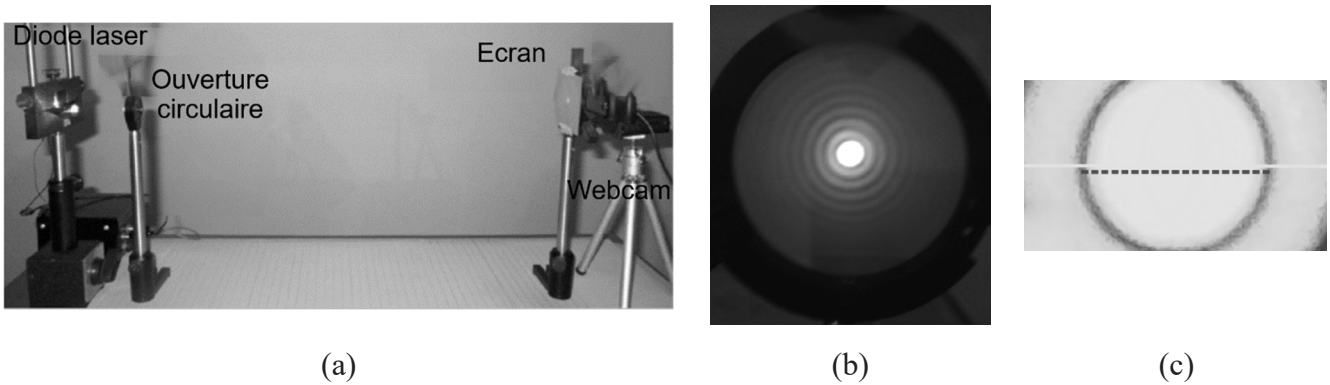


Figure 6 – (a) Dispositif expérimental, (b) motif de diffraction observé sur l'écran, (c) mesure du diamètre du disque d'Airy.

Présentation de l'expérience n° 2

Pour démontrer la viabilité de la méthode proposée, les longueurs d'onde d'un laser à diode rouge générique, dont la longueur d'onde nominale indiquée par le fabricant est de 640 nm, ont été obtenues pour une plage de $L = [25 \text{ cm} ; 95 \text{ cm}]$ par pas de 5 cm. Les résultats sont présentés dans le **tableau 2**.

Distance L (cm)	25	30	35	40	45	50	55	60
Diamètre D (cm)	0,382	0,458	0,534	0,611	0,688	0,759	0,831	0,924
Longueur d'onde estimée λ (nm)	626,22	625,68	625,29	626,02	626,59	622,13	619,20	631,14

Distance L (cm)	65	70	75	80	85	90	95
Diamètre D (cm)	0,985	1,070	1,159	1,236	1,304	1,392	1,464
Longueur d'onde estimée λ (nm)	621,05	626,46	633,33	633,19	628,73	633,87	631,57

Tableau 2 – Estimations de la longueur d'onde λ correspondant à une diode laser générique rouge (640 nm) à partir de mesures de distances L et de diamètres de disque d'Airy D .

Document 7 – Fonctionnement d'une antenne redresseuse¹⁵

Le terme rectenna composé de deux mots anglo-saxons « *rectifier* » et « *antenna* » est un dispositif non linéaire correspondant à la fois, comme son nom l'indique, à l'association d'une antenne de réception et d'un circuit de redressement qui se positionne au début du bloc récepteur dans un système de transmission d'énergie sans fils et de récupération d'énergie électromagnétique. Sa structure classique est schématisée par cinq blocs fonctionnels représentés sur la **figure 7**.

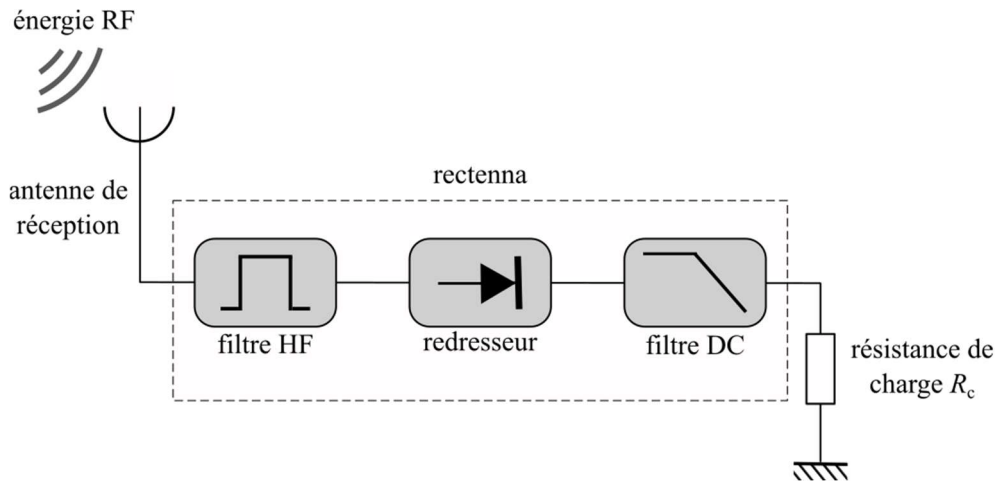


Figure 7 – Structure d'une rectenna.

Le principe de fonctionnement d'un tel système repose sur la captation des ondes électromagnétiques par une antenne de réception. Ces ondes seront converties par la suite en ondes électromagnétiques guidées et transmises au circuit de conversion radiofréquence (RF) - continu (DC) par l'intermédiaire d'un circuit d'adaptation. Ce dernier transforme ces ondes en tension électrique continue avec un rendement le plus grand possible. Ensuite, cette tension sera transmise à son tour à une résistance de charge qui représente l'impédance d'entrée du dispositif à alimenter.

Cependant, un redresseur classique génère non seulement de l'énergie DC mais aussi des harmoniques d'ordre supérieur dues à la non linéarité des composants constitutifs de ce dernier (les diodes en particulier). Ces harmoniques peuvent être réfléchies vers la résistance de charge ainsi que vers l'antenne de réception. Donc, l'insertion des filtres de part et d'autre du redresseur est indispensable pour supprimer ces harmoniques et améliorer les performances des circuits redresseurs. Dans une rectenna, il s'agit d'un filtre HF (passe-bande) et un autre DC (passe-bas).

Le filtre HF, étudié ici, est un circuit d'adaptation qui est dimensionné afin d'assurer l'adaptation des impédances à la fréquence sélectionnée et ne laisse passer que le signal à 2,45 GHz. Le filtre DC passe-bas (**figure 8**) est constitué d'une inductance L_1 et d'un condensateur C_1 . Le montage débite sur une résistance de charge $R_c = 5,0 \Omega$.

Le filtre DC de sortie atténue les harmoniques indésirables et ne laisse passer que la composante continue. Les valeurs optimales retenues sont $C_1 = 70 \text{ pF}$ et $L_1 = 10 \text{ nH}$. La **figure 9**, page suivante, montre la réponse en fréquence du filtre DC et de la résistance R_c .

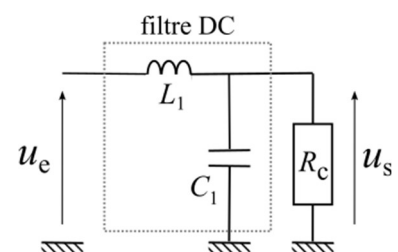


Figure 8 – Schéma électrique du filtre DC et de la résistance de charge.

¹⁵ D'après Bouchair D. (2020). Conception et optimisation des circuits d'adaptation d'un système rectenna. *Mémoire de master, Université de Jijel, Algérie.* <http://dspace.univjijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/5719>

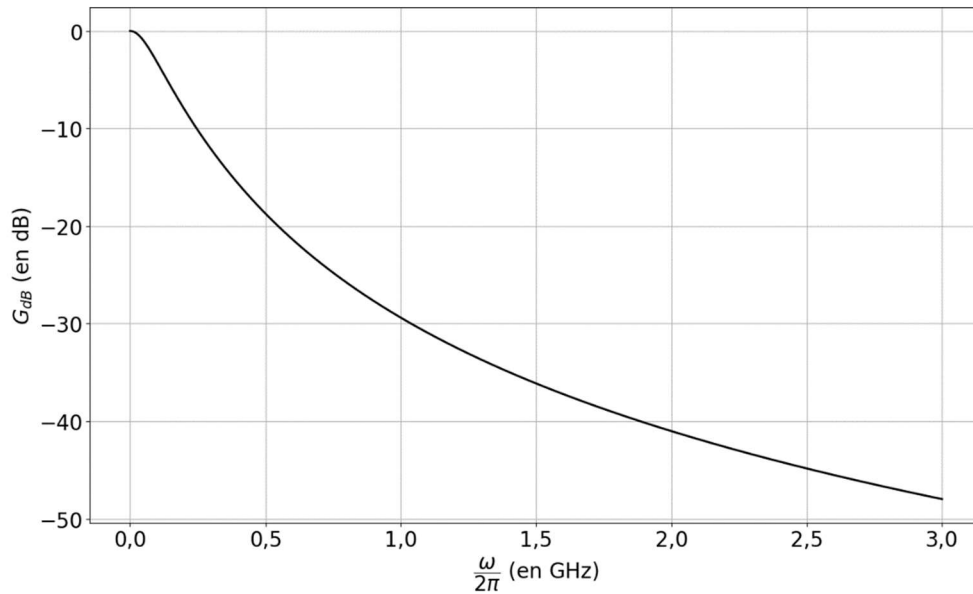


Figure 9 – Gain en décibels G_{dB} du filtre de sortie DC et de la résistance R_c en fonction de la fréquence $\frac{\omega}{2\pi}$.

Document 8 – Modélisation de la rectenna vis-à-vis de sa sortie¹⁶

Le modèle électrique du point de vue de la sortie de la rectenna est obtenu par le tracé expérimental des caractéristiques courant-tension en chargeant la rectenna avec différentes valeurs de charge et en relevant la tension de sortie ; les valeurs du courant de sortie sont ensuite calculées. Cette opération est réalisée sur une large plage de la puissance RF (radiofréquence) d'entrée. La **figure 10** présente les caractéristiques courant-tension ($I - U$) d'une rectenna monodiode série pour des valeurs de la puissance RF comprise entre -15 dBm et -5 dBm (le dBm est une unité logarithmique de mesure de puissance).

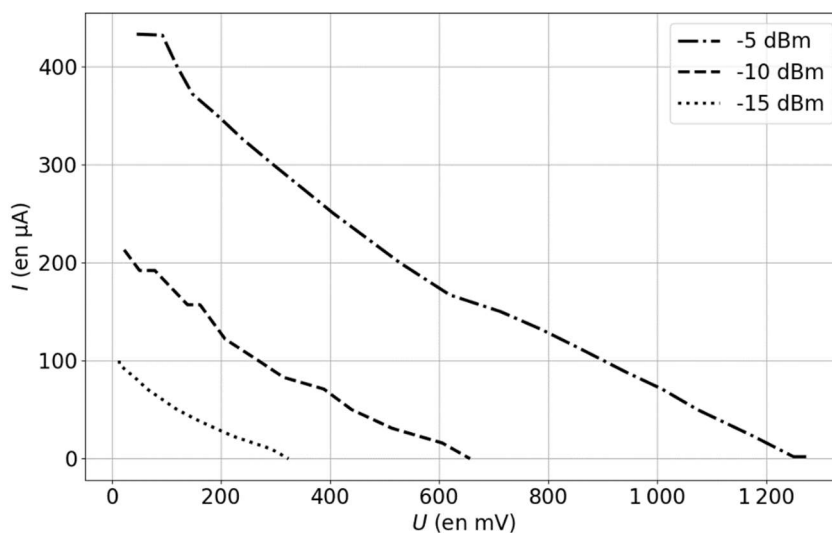


Figure 10 – Caractéristiques courant-tension pour plusieurs valeurs de la puissance RF.

¹⁶ D'après Adami S.-E. (2013). Optimisation de la récupération d'énergie dans les applications de rectenna. *Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon*. <https://theses.hal.science/tel-00967525v1>

On constate que ces caractéristiques sont quasiment des droites parallèles. Ceci nous suggère de proposer un modèle simple de la rectenna au niveau de la sortie basé sur une source de tension V_s en série avec une résistance interne R_s (**figure 11**). Le fait que les courbes soient parallèles prouve que cette résistance interne est relativement constante quelques soient les variations de la puissance RF d'entrée. D'un autre côté, la tension V_s est un paramètre dépendant du niveau de la puissance RF ; il correspond à la tension de sortie de la rectenna en circuit ouvert.

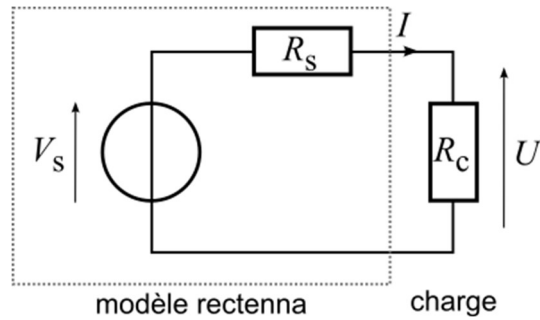


Figure 11 – Modélisation de la rectenna au vu de sa sortie.

À partir du modèle proposé dans la **figure 11**, on cherche à réaliser une adaptation d'impédance entre la source (la rectenna) et la charge. L'objectif est de faire fonctionner la source à son régime optimal permettant d'extraire le niveau de puissance maximale. Cela se fait en utilisant une résistance de charge de valeur égale à la résistance interne de la source.

B. Analyse et exploitation des documents

B.1. Satellite en orbite

Des réseaux de miroirs placés en orbite géostationnaire pourraient concentrer le rayonnement solaire vers un dispositif central à panneaux solaires.

B.1.a. Orbite géostationnaire

Cette sous-partie exploite les informations du **document 1**.

On s'intéresse à la trajectoire d'un satellite de masse m en orbite géostationnaire circulaire de rayon r_g autour de la Terre de masse M_T . Il est soumis uniquement à l'interaction gravitationnelle exercée par la Terre dans le référentiel géocentrique \mathcal{R} supposé galiléen.

- Q1.** Déterminer la vitesse du satellite v_g dans le référentiel \mathcal{R} en fonction de G , M_T et r_g .
- Q2.** En déduire le rayon de la trajectoire r_g en fonction de G , M_T et de la période T de révolution du satellite. Rappeler le nom de la loi obtenue.
- Q3.** En déduire l'altitude du satellite h_g en fonction de G , M_T , T et R_T . Faire l'application numérique.
- Q4.** Établir l'expression de l'énergie potentielle gravitationnelle du satellite en fonction de G , m , M_T et de sa distance r au centre de la Terre. On choisit une valeur nulle d'énergie potentielle lorsque r tend vers l'infini.

On admet que l'expression de l'énergie mécanique du satellite sur l'orbite de transfert elliptique s'écrit

$$\mathcal{E}_m = -\frac{GmM_T}{r_p + r_g}$$

où r_p est le rayon de l'orbite de parking et r_g le rayon de l'orbite finale géostationnaire.

- Q5.** Déterminer la vitesse v_a du satellite à l'apogée de sa trajectoire sur l'orbite de transfert elliptique en fonction de G , M_T , r_p et r_g . Faire l'application numérique.
- Q6.** En déduire la valeur numérique de la variation de vitesse $\Delta v = v_g - v_a$ à communiquer au satellite pour passer de l'orbite de transfert elliptique à l'orbite géostationnaire. Confirmer la valeur obtenue à l'aide du **document 1**.

B.1.b. Propulsion chimique

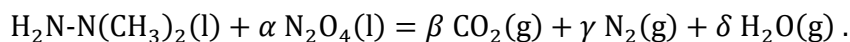
Cette sous-partie exploite les informations des **documents 2 et 3**.

On considère un satellite sur une orbite de transfert : 200 km au périégée et 36 000 km à l'apogée où aura lieu la circularisation de l'orbite en communiquant une impulsion au satellite. Pour cela, on utilise un propulseur hydrazine/péroxyde d'azote de 400 N, qui est le propulseur le plus classique. L'ensemble de l'opération fait qu'il y a presque un facteur 2 entre la masse qui a été satellisée par le lanceur et celle qui est vraiment utile.

On considère une situation où le satellite est sur l'orbite de transfert elliptique avec une masse initiale $m_i = 6,0 \times 10^3$ kg (carburant inclus). On utilise un propulseur UDMH-NTO pour lui communiquer la variation de vitesse Δv (calculée à la **question Q6** et confirmée par le **document 1**) entre son orbite de transfert elliptique et l'orbite finale géostationnaire.

Q7. À l'aide des **documents 2 et 3**, déterminer la masse totale de propergol m_{prop} nécessaire pour réaliser cette opération. Faire l'application numérique et commenter.

Q8. En expliquant la démarche suivie, déterminer les coefficients stœchiométriques α , β , γ et δ de la réaction suivante, entre UDMH et NTO :



Les deux réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. On suppose que la réaction est totale.

Q9. À l'aide d'un bilan de matière, exprimer les quantités de matière initiales des deux réactifs en fonction de la masse totale de propergol m_{prop} et de leurs masses molaires.

Q10. En déduire les masses initiales des deux réactifs. Faire l'application numérique.

B.2. Acheminer l'énergie sans fil

Récupérer l'énergie solaire dans l'espace est possible grâce au satellite placé en orbite. Toutefois, il reste un obstacle majeur : comment transférer à la Terre l'énergie collectée dans l'espace ? Seul un procédé sans contact et sans fil serait réaliste. La difficulté de la tâche est importante. Il faut diriger avec une grande précision vers les récepteurs le rayonnement qui véhicule l'énergie.

B.2.a. Propagation d'énergie sans fil

Le champ électrique \vec{E} d'une onde électromagnétique se propageant dans le vide vérifie l'équation

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

où $\Delta \vec{E}$ est le laplacien vectoriel de \vec{E} .

Q11. Rappeler le nom de cette équation, puis exprimer la célérité c de cette onde en fonction de ϵ_0 et μ_0 . Calculer sa valeur numérique.

On considère une onde électromagnétique plane progressive monochromatique, dont le champ électrique, exprimé en coordonnées cartésiennes, s'écrit $\vec{E} = E_0 \cos(2\pi ft - kz) \vec{e}_x$ où f est la fréquence de l'onde et k la norme de son vecteur d'onde.

Q12. Déterminer le champ magnétique \vec{B} de l'onde, puis exprimer le vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$.

On définit l'intensité I du rayonnement comme la valeur moyenne temporelle de la norme du vecteur de Poynting.

Q13. Déterminer l'expression de l'intensité I en fonction de E_0 , c et μ_0 .

Q14. À l'aide du **document 4**, en particulier de la **figure 3**, justifier quantitativement le choix d'un faisceau micro-ondes plutôt que d'un faisceau laser. Citer un inconvénient majeur de ce choix.

B.2.b. Absorption du rayonnement par l'ozone

Cette sous-partie exploite les informations du **document 5**.

Q15. Décrire, en quelques lignes, le principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre UV-visible.

Q16. Expliquer pourquoi on utilise une lampe à vapeur de mercure dans un analyseur d'ozone.

O'Keeffe *et al.*¹⁷ utilisent un capteur d'ozone à fibre optique où le faisceau lumineux traverse la cellule à gaz sur une longueur $\ell' = 5$ cm. Pour un échantillon d'ozone de concentration C' , ils mesurent les intensités du rayonnement UV à 254 nm suivantes :

$$I_0 = 372 \text{ u. a.} \quad \text{et} \quad I = 316 \text{ u. a.}$$

où u. a. désigne une unité arbitraire.

Q17. Calculer la valeur numérique de la concentration C' en ozone de cet échantillon en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

B.2.c. Diffraction

Les questions suivantes concernent les expériences présentées dans le **document 6**.

Q18. Décrire une expérience où le phénomène de diffraction est observable avec une onde mécanique.

Q19. Exploiter l'expérience n° 1 présentée sur la **figure 6** en déterminant la longueur d'onde du laser à diode verte.

On exploite l'expérience n° 2. À l'aide d'un tableur, on calcule la valeur moyenne et l'écart-type de la distribution statistique de la longueur d'onde estimée fournie dans le **tableau 2**, qui sont respectivement égaux à $\bar{\lambda} = 627,36$ nm et $\sigma_{\text{exp}}(\lambda) = 4,56$ nm.

Q20. Présenter le résultat de la mesure réalisée avec son incertitude-type. Comparer le résultat de cette mesure à la valeur de référence. Commenter.

À cause du phénomène de diffraction, le faisceau micro-ondes (fréquence $f = 5,8$ GHz) envoyé depuis le satellite est divergent. Pour éclairer une antenne réceptrice de 3 km placée sur Terre, la divergence du faisceau doit être de cent microradians.

Q21. En assimilant l'ensemble des antennes émettrices à un disque de diamètre total d' , exploiter ces informations pour quantifier l'ordre de grandeur de d' pour que ces conditions soient satisfaites. Commenter.

B.3. Antenne réceptrice : rectenna

Si le faisceau micro-ondes atteint le site de réception, alors le reste du processus est relativement simple. Des réseaux de rectennas peuvent convertir l'énergie micro-ondes en courant continu avec un rendement supérieur à 80 %. Le courant continu peut ensuite être converti en courant alternatif et injecté dans le réseau électrique terrestre.

B.3.a. Étude du filtre de sortie DC

Cette sous-partie exploite les informations du **document 7**.

On s'intéresse au filtre DC associé à la résistance de charge de la **figure 8**.

¹⁷ O'Keeffe S., Fitzpatrick C. & Lewis E. (2007). An optical fibre based ultra violet and visible absorption spectroscopy system for ozone concentration monitoring. *Sensors And Actuators B Chemical*, 125(2), 372-378.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.02.023>

- Q22.** À l'aide d'une étude asymptotique, montrer que ce filtre est bien un filtre passe-bas.
- Q23.** En utilisant les notations complexes d'unité imaginaire j , montrer que la fonction de transfert harmonique $\underline{H}(j\omega) = \frac{u_s}{u_e}$ s'écrit sous la forme

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{1}{1 + j 2\xi \frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

où on exprimera ω_0 et ξ en fonction de L_1 , C_1 et R_c . Calculer les valeurs numériques de ω_0 et ξ .

- Q24.** À l'aide de la **figure 9**, déterminer le gain du filtre à la fréquence 2,45 GHz. Conclure sur le bon fonctionnement de ce filtre.

B.3.b. Adaptation d'impédance

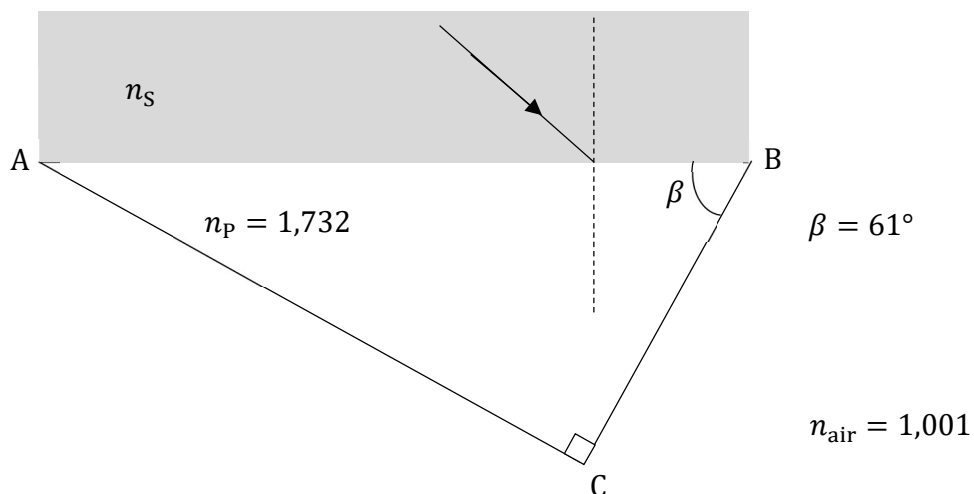
Cette sous-partie exploite les informations du **document 8**.

- Q25.** À l'aide de la **figure 10**, estimer la valeur de la résistance interne R_s de la rectenna.
- Q26.** Exprimer la puissance consommée \mathcal{P}_c par la résistance de charge en fonction de V_s , R_s et R_c .
- On considère que V_s et R_s sont fixées.
- Q27.** Montrer que la puissance \mathcal{P}_c est maximale lorsque la résistance de charge est égale à R_s , situation appelée *adaptation d'impédance*. Donner l'expression de la puissance maximale $\mathcal{P}_{c,\max}$ en fonction de V_s et R_s .
- Q28.** Définir et calculer le rendement de ce montage en fonction de R_c et R_s . Indiquer sa valeur dans la situation d'adaptation d'impédance. Commenter.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE
(uniquement pour les candidats ayant choisi
la discipline majeure chimie à l'inscription)

Document réponse 1 (section majeure chimie, question Q6)



Document réponse 2 (section majeure chimie, question Q8)

