

De la chimie et de la physique autour des cinq sens

Grâce à ses sens, l'homme perçoit le monde qui l'entoure : les organes sensoriels fournissent des informations sur l'environnement. Ainsi, par exemple, il est possible d'échapper à certaines situations à risques en détectant une odeur de fumée, un bruit d'explosion ou le goût amer de certaines baies toxiques... La recherche scientifique a permis de quantifier ces « sensations » et de les analyser pour comprendre les phénomènes qui en sont responsables.

Ce sujet propose, à travers cinq parties totalement indépendantes, d'illustrer l'apport de la physique et la chimie dans la compréhension de ces mécanismes.

A. La vue

B. Le goût

C. Le toucher

D. L'odorat

E. L'ouïe

Des données et des documents nécessaires à la résolution sont regroupés dans les annexes.

Il sera tenu compte dans la notation de la présentation, du soin accordé à la justification concise et rigoureuse des réponses, en particulier pour les questions « ouvertes », ainsi que de la maîtrise de la langue française.

Pour les réponses aux questions, le candidat indiquera uniquement le numéro de la question (indiqué en italique dans l'énoncé, de 1 à 72) sans préciser le paragraphe (A.I...).

A. La vue

La perception visuelle du monde qui nous entoure n'est pas uniquement due à l'œil, présenté comme organe de la vision, elle est rendue possible grâce à l'activité d'une importante partie du cerveau. L'œil capte les rayons lumineux qui viennent de l'environnement et les transforme, au niveau de la rétine, en impulsions nerveuses qui vont se propager jusqu'au cerveau.

La rétine est constituée de deux types de photorécepteurs, les cônes et les bâtonnets, plus fortement concentrés dans une zone appelée fovéa, qui permet une vision très fine à l'endroit où est dirigé le regard.

À la sortie de la rétine, il n'existe plus de scène visuelle à proprement parler, les informations visuelles sont transmises sous forme d'influx électrique de l'œil au cerveau et c'est au niveau cérébral que la scène va être reconstruite en fonction des différentes informations portant sur la couleur, la forme, le mouvement, la localisation spatiale que les aires cérébrales vont analyser.

Dans le cerveau, les aires cérébrales visuelles représentent près d'un tiers du volume et sont chacune spécialisées dans un type de traitement particulier, du plus perceptif au plus cognitif, précisant de mieux en mieux la scène visuelle observée, jusqu'à aboutir à une représentation visuelle complète qui a du sens pour l'observateur. Ce que nous voyons est donc une construction de notre cerveau et non une stricte photographie du monde extérieur que nos yeux auraient prise.

Cette partie est consacrée à quelques aspects de la vision en trois dimensions (3D).

A.I. L'œil et la vision des objets

Caractéristiques et schéma d'un œil représenté figure 1.

Cristallin au repos : épaisseur : $e = 4,0$ mm ; indice le long de l'axe oculaire : $n_c = 1,420$; rayon de courbure de la face antérieure $R_1 = 10,0$ mm ; rayon de courbure de la face postérieure $R_2 = -6,0$ mm

Distance entre le centre optique du cristallin et la rétine : $d = 17,0$ mm

Indice de l'humeur aqueuse et de l'humeur vitrée : $n_h = 1,336$

Vergence (fixe) de la cornée : $V_{cor} = 42 \delta$

Persistance rétinienne : $\Delta t_{rét} = 50$ ms

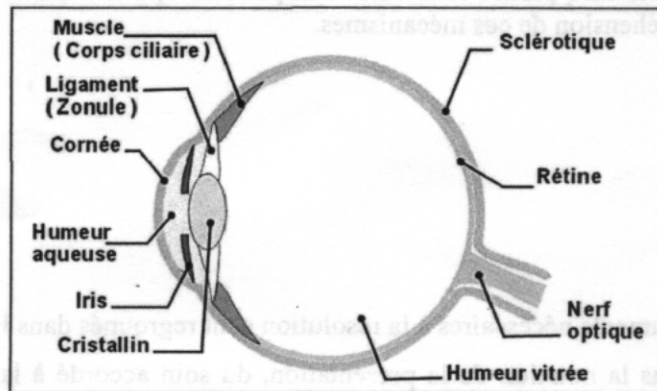


Figure 1

1. Expliquer, comme vous le feriez à un élève de Première S, qu'un œil normal permet à la fois la vision des objets proches et lointains. Cette explication (environ dix lignes) devra au moins utiliser les mots cristallin, iris et rétine et pourra s'appuyer sur un ou des schémas.

Le cristallin peut être modélisé soit par une lentille épaisse soit par une lentille mince.

Dans le cas où il est modélisé par une lentille épaisse, la vergence V_{cr} du cristallin s'exprime :

$$V_{cr} = (n_c - n_h) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{e \cdot (n_c - n_h)^2}{n_c \cdot R_1 \cdot R_2}$$

où R_1 et R_2 sont respectivement les rayons de courbure des faces antérieure et postérieure du cristallin, n_c l'indice du cristallin, e son épaisseur, n_h l'indice des humeurs aqueuse et vitrée.

2. Dans le cadre de ce modèle (lentille épaisse), calculer la vergence du cristallin au repos.
3. En déduire que modéliser le cristallin par une lentille mince (comme cela est fait en classe de Première S) peut se justifier.
4. Déterminer la vergence du système cornée-cristallin en considérant les deux systèmes (cornée et cristallin) comme des lentilles minces accolées.
5. Cet œil au repos voit-il net un objet situé à l'infini ?

A.II. Polarisation de la lumière

6. Définir les différents types de lumière polarisée et les illustrer par des schémas.
7. Proposer une expérience permettant de montrer si une lumière est polarisée ou non et indiquer les observations faites selon le type de polarisation.
8. Indiquer deux méthodes d'obtention de lumière polarisée à partir de lumière naturelle.

A.III. Les films polarisants

Les films polarisants utilisés actuellement sont constitués d'une matrice polymère transparente dans laquelle sont insérées des particules conductrices en forme de bâtonnet. L'ensemble est étiré de façon à aligner les chaînes de polymère et les particules conductrices selon une direction privilégiée.

En 1852, un chercheur (William B. Herapath) découvre par hasard que les cristaux d'iodoquinine, obtenus par précipitation à partir d'une solution de quinine et d'eau iodée, possèdent des propriétés optiques intéressantes. Ils cristallisent sous forme d'aiguilles. Si deux de ces aiguilles sont superposées, on observe que l'intensité de la lumière transmise à travers cet empilement dépend de l'angle entre les axes des aiguilles ; cet empilement se comporte donc comme un ensemble polariseur-analyseur. On interprète l'anisotropie de ces cristaux par l'alignement d'ions triiodure I_3^- « conducteurs » entre les molécules de quinine.

9. Comment était obtenue la quinine utilisée par Herapath en 1852 ?

10. Proposer une formule de Lewis pour l'ion triiodure et justifier qu'elle soit compatible avec la forme de bâtonnet.

La substance reste une curiosité de laboratoire jusqu'en 1929, les cristaux obtenus étant trop petits pour être utilisés en optique. À cette date Edwin H. Land a l'idée de déposer les cristaux sur une feuille de nitrocellulose, substance étudiée entretemps pour ses propriétés explosives. Il obtient la « feuille J » qui possède les propriétés requises pour former un film polarisant.

En 1938, une amélioration est proposée, en remplaçant la nitrocellulose par l'alcool polyvinylique. Celui-ci est préparé à partir du polyacétate de vinyle par une succession de réactions. Le polyacétate de vinyle est lui-même obtenu par polymérisation de l'acétate de vinyle $H_2C=CH-O-CO-CH_3$. Une des premières réactions de polymérisation mise en œuvre est décrite ci-dessous¹ :

« L'acétate [de vinyle] est mis en flacons de verre de deux litres et exposé au soleil sur des étagères. Après quatre jours, la Mowilith (le polymère) est formée. La masse se dilate et les flacons cassent d'eux-mêmes. »

11. Quel type de polymérisation évoque ce protocole ? Représenter l'unité de répétition du polyacétate de vinyle.

Il faut ensuite obtenir l'alcool polyvinylique d'unité de répétition $-(CH_2-CHOH)-$ à partir du polyacétate de vinyle.

12. Proposer une méthode classique pour réaliser cette transformation. Écrire l'équation de la réaction ainsi mise en œuvre sur une unité de répétition du polyacétate de vinyle.

Le polyacétate de vinyle étant soluble dans les alcools, la méthode choisie en 1938 consiste à le faire réagir dans du méthanol en présence de méthanolate de sodium (Na^+ , H_3CO^-). C'est une réaction de transestérification, nommée ici alcoololyse.

13. Identifier le sous-produit obtenu lors de cette alcoololyse.

La transformation du polyacétate de vinyle en alcool polyvinylique peut être contrôlée de façon à ne modifier qu'une partie des groupes $-O-CO-CH_3$ afin de conférer au produit les propriétés physiques souhaitées (viscosité, solubilité...). On obtient alors un copolymère de l'acétate de vinyle et de l'alcool vinylique.

14. Nommer et illustrer les trois types de copolymères que l'on peut obtenir avec deux unités de répétition notées A et B. Quel type va-t-on obtenir ici ? Justifier la réponse.

15. Expliquer pourquoi l'alcool polyvinylique ne peut pas être obtenu par polymérisation de l'alcool vinylique.

¹ Rapport de la Société Chimique des Usines du Rhône, cité par Jean-Marie Michel dans *Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France*, sur le site de la Société Chimique de France.

A.IV. Utilisation des films polarisants pour le cinéma en relief

La vision en relief est liée au fait que les images captées sur les rétines de l'œil gauche et de l'œil droit sont très légèrement différentes. Ceci est dû au fait que les centres des deux cornées sont séparés de 6,5 cm en moyenne. Le cerveau se charge ensuite de recréer le relief.

Sur un écran de cinéma, pour recréer la vision en trois dimensions (3D), on fait défiler successivement une image pour l'œil gauche et une autre image, légèrement différente, pour l'œil droit. Plusieurs techniques sont utilisées actuellement dans le domaine de la 3D. Cette partie étudie une technique passive utilisant de la lumière polarisée dont le principe est décrit sur un site internet² :

« Principe de fonctionnement d'un projecteur numérique pour le cinéma en relief.

Dans un premier temps, le serveur envoie vers le projecteur deux signaux vidéo, chacun à une fréquence de 24 images par seconde, l'un servant à élaborer les images pour l'œil droit et l'autre les images pour l'œil gauche. Le projecteur se charge de diviser chaque image originelle en trois afin de faire se succéder à l'écran une image pour l'œil droit puis une pour l'œil gauche et ainsi de suite, comme le montre la figure 2 ; on parle ici de triple flash.

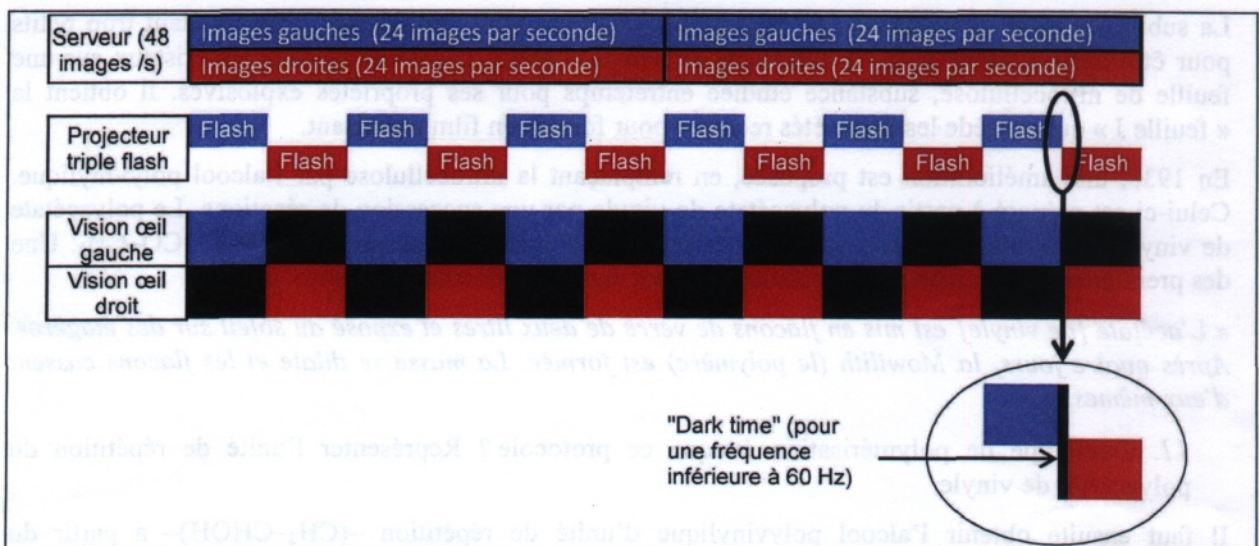


Figure 2

Ainsi, sur l'écran, chaque image subsiste pendant 7 ms.

Pour que chaque œil reçoive sélectivement l'image qui lui est destinée, il suffit de polariser différemment les images pour l'œil droit et pour l'œil gauche et de fournir aux spectateurs des lunettes dont les verres sont constitués de polariseurs possédant des propriétés différentes pour chaque œil.

Pour réaliser une polarisation circulaire droite et gauche des images, un filtre à cristal liquide (Z-screen) est placé devant le projecteur et est synchronisé avec ce dernier. Les polariseurs des lunettes sont, quant à eux, des polariseurs circulaires droit et gauche qui, par exemple, transmettent la polarisation circulaire droite et stoppent la polarisation circulaire gauche pour l'œil droit et inversement pour l'œil gauche.

On peut également travailler en polarisation rectiligne ».

16. Justifier le fait que le fonctionnement de ce projecteur amène chaque image à demeurer pendant 7 ms à l'écran.

17. Expliquer, éventuellement en vous appuyant sur un schéma, pourquoi le spectateur muni de ses lunettes voit effectivement le film en relief.

18. À la fin du texte précédent, il est indiqué qu'il est possible de « travailler en polarisation rectiligne ». Citer un défaut lié à l'utilisation de lumière polarisée rectilignement dans ce cas.

² D'après <http://www.volfoni.com/fr/technologies-3d/comment-ca-marche>

B. Le goût

Le goût est le sens par lequel on perçoit les saveurs à l'aide des papilles situées sur la langue. Le goût des aliments et leur perception sont un moteur puissant de notre comportement alimentaire, ce qui explique pourquoi les scientifiques et les industriels cherchent à comprendre les mécanismes du goût pour améliorer la qualité de nos aliments.

On reconnaît aujourd'hui cinq saveurs de base : acide, salé, amer, sucré et *umami*, « le cinquième goût ». Celui-ci est associé aux glutamates et a été découvert en 1908 par un chercheur japonais, Kikunae Ikeda.

Dans cette partie, on s'intéresse à quelques aspects des saveurs *umami* et sucrée.

B.I. Le goût *umami*

Les glutamates dérivent de l'acide glutamique dont le nom officiel est « acide 2-aminopentanedioïque ». On trouve dans les tables trois valeurs de pK_a pour les couples dérivant l'acide glutamique : $pK_{a1} = 2,16$, $pK_{a2} = 4,15$ et $pK_{a3} = 9,58$.

19. Sur un axe gradué en pH, représenter explicitement la forme acido-basique prédominante dérivée de l'acide glutamique dans les différents intervalles de pH. Justifier la réponse comme vous le feriez auprès d'un élève de Terminale S.

La cuisine asiatique fait grand usage du glutamate de sodium (GMS, glutamate monosodique, exhausteur de goût portant le code E 621) parfois suspecté de provoquer des troubles de la santé, notamment des migraines.

20. Dessiner la structure du GMS et justifier le fait que ce soit la forme acido-basique présente dans la cuisine asiatique.

On trouve l'extrait suivant sur un site internet couramment consulté par les élèves et les enseignants scientifiques³ :

« ... De nombreux aliments utilisés dans la cuisine occidentale sont riches en glutamate déshydrogénase (à ne pas confondre avec le glutamate monosodique, qui lui n'est pas naturel et fabriqué industriellement à partir de produit dont on ignore toute provenance) comme l'asperge verte (106 mg / 100 g), la coquille Saint-Jacques (140 mg / 100 g) et la tomate (246 mg / 100 g), ils ne déclenchent aucune migraine ou autre maladie car le glutamate déshydrogénase présent dans ces aliments est naturel. En revanche des études sérieuses ont démontré que le glutamate monosodique pouvait avoir un effet désastreux sur des souris... »

21. Repérer dans cet extrait deux idées susceptibles d'amorcer une discussion en classe et préciser à quelle conclusion vous souhaiteriez faire aboutir cette discussion. (10 lignes maximum pour l'ensemble de la question)

B.II. Le goût sucré

Pour sucrer les aliments, on peut utiliser le sucre blanc traditionnel, qui présente comme inconvénient de favoriser, entre autres, l'obésité et les caries dentaires.

22. Indiquer le nom scientifique de ce sucre.

Il est possible de remplacer le sucre blanc par des polyols moins caloriques et peu cariogènes. Le sucre de bouleau, ou xylitol (E 967) est présent naturellement dans certains aliments comme les framboises.

³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_glutamique (avril 2013) et <http://dictionnaire.sensagent.com/Acide%20glutamique/fr-fr/>

Il est obtenu industriellement par réduction du xylose, lui-même extrait de l'écorce de bouleau. Le xylose est un stéréoisomère de configuration du 2,3,4,5-tétrahydroxypentanal.

23. Représenter les formules semi-développées ou topologiques du xylose et du xylitol en indiquant les centres stéréogènes dans ces molécules.

24. La molécule de xylitol n'est pas chirale. Que peut-on en déduire sur les descripteurs stéréochimiques (configurations) de certains de ses centres stéréogènes ? Justifier.

Il existe des produits sucrants totalement synthétiques. L'aspartame (E 951), dont la structure est donnée figure 3, possède un pouvoir sucrant plus de cent fois supérieur à celui du sucre blanc. Cet édulcorant est hydrolysé dans l'estomac, on se propose d'étudier expérimentalement cette hydrolyse acide.

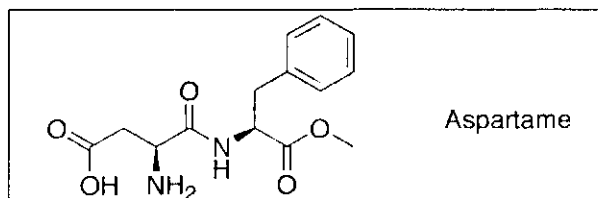


Figure 3

On trouve dans la littérature⁴ le protocole d'hydrolyse de l'aspartame suivant :

« Deux « sucrettes » d'aspartame Nutrasweet® sont broyées dans un mortier et solubilisées dans 25 mL d'acide chlorhydrique concentré (12 mol·L⁻¹). Le milieu est porté au reflux deux heures, puis refroidi dans un bain de glace. Environ 1 mL de la solution est prélevé et neutralisé par une solution saturée d'hydrogénocarbonate de sodium jusqu'à disparition du dégagement gazeux de dioxyde de carbone lors de l'addition. »

25. Dresser la liste exhaustive du matériel à demander aux techniciens de laboratoire pour mettre en œuvre le protocole de chauffage au reflux au lycée.

26. Proposer une méthode d'identification des produits obtenus et décrire succinctement les résultats attendus.

27. En quoi cette hydrolyse dans l'estomac présente-t-elle des dangers pour la santé ?

⁴ *Le Bup*, n°847, Octobre 2002, « L'aspartame, un édulcorant intense », par Prévost V., Langrand, C., Vidal, J.

C. Le toucher

Toute la surface de la peau est pourvue de récepteurs sensoriels et, avec 2 000 terminaisons nerveuses par millimètre carré, c'est l'extrémité des doigts qui est la plus sensible au toucher. Les sollicitations appliquées sur la peau sont transformées par divers « mécanorécepteurs » (corpuscules de Pacini, de Meissner) en signal électrique transmis au cerveau.

La peau contient de nombreux « thermorécepteurs », terminaisons nerveuses sensibles au froid ou au chaud qui rendent compte de la température cutanée.

Cette partie étudie un dispositif qui, dans un environnement très froid, permet de réchauffer les mains par contact : une chaufferette de poche.

Une chaufferette de poche est une pochette étanche en matière plastique contenant un liquide incolore visqueux, noté L et une lamelle métallique. Quand on plie la lamelle métallique, le liquide L se transforme en quelques secondes en un solide blanc, noté S . La température de la chaufferette augmente alors spontanément et rapidement pour atteindre environ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, valeur suffisante pour se réchauffer les mains. On peut ramener la chaufferette dans son état initial en l'immergeant pendant une durée suffisante dans l'eau bouillante, puis en la laissant refroidir sans toucher à la lamelle.

C.I. Fabrication d'une chaufferette

On peut trouver le mode opératoire de fabrication d'une chaufferette artisanale :

Ingrédients : 35 g de bicarbonate de soude, 0,50 L de vinaigre blanc à 8° (solution aqueuse d'acide acétique de fraction massique 0,08 et de densité environ égale à 1)

Mode opératoire : mélanger le vinaigre et le bicarbonate, et quand le mélange ne mousse plus ajouter 0,50 L d'eau chaude. Porter à ébullition et laisser évaporer jusqu'à ce qu'il reste environ 10 % du volume initial. Des cristaux blancs apparaissent : les filtrer, les enfermer dans une pochette : c'est la chaufferette.

On utilise ce mode opératoire pour tenter une première approche de la composition du liquide.

28. En utilisant les données utiles, écrire l'équation de la réaction mise en œuvre au moment du mélange des ingrédients.

29. Expliquer pourquoi le mélange « mousse ».

30. Évaluer le volume de gaz produit au cours du mélange. Préciser les initiatives que vous avez été amené à prendre pour obtenir ce résultat.

C.II. Composition d'une chaufferette

La chaufferette achetée dans le commerce porte l'indication : « contient de l'acétate de sodium, non toxique ».

Pour vérifier la présence d'acétate de sodium, on dissout une masse $m = 0,487\text{ g}$ de solide S dans l'eau et on réalise un titrage par de l'acide chlorhydrique de concentration molaire $1,00 \times 10^{-1}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Le titrage est suivi par pHmétrie. Le résultat de l'expérience est donné en figure 4.

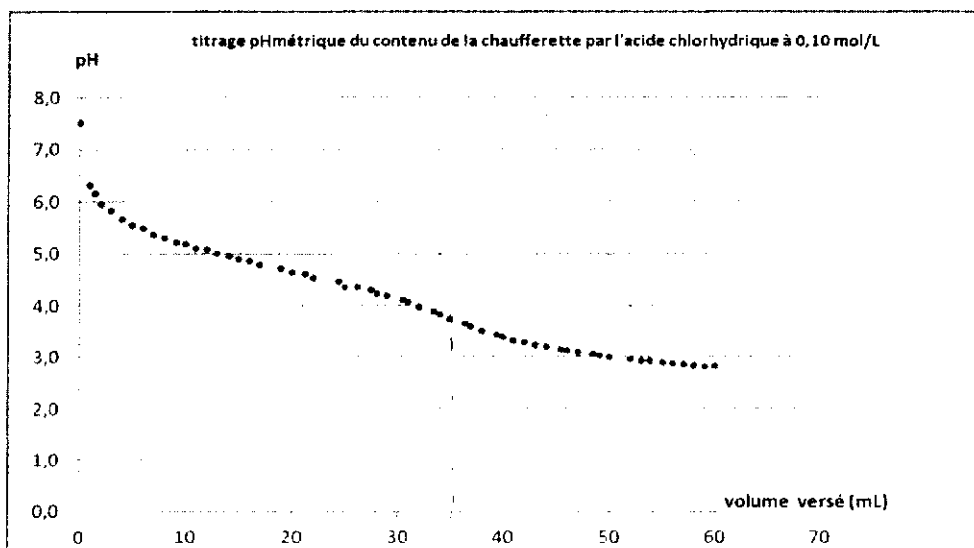


Figure 4

L'équivalence n'étant pas nette sur la courbe brute, on réalise un traitement numérique des mesures qui conduit à attribuer une valeur $v_{\text{eq}} = 35 \pm 1$ mL au volume d'acide versé à l'équivalence.

31. Montrer que l'allure de la courbe est cohérente avec l'indication de l'emballage.

32. Pour l'acétate de sodium, on trouve deux formules possibles dans les tables : l'acétate de sodium anhydre ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) et l'acétate de sodium trihydraté ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$). D'après le résultat du titrage, déterminer un encadrement de la masse molaire de « l'acétate de sodium » présent dans le solide S . En déduire la formule chimique de cette espèce.

33. Des tables indiquent pour cette forme de l'acétate de sodium une température de fusion de 55°C . Expliquer pourquoi on peut la conserver liquide à température ambiante et préciser le rôle de la lamelle métallique.

C.III. Aspect énergétique

On se propose maintenant de quantifier l'énergie libérée par la solidification du liquide L . Pour cela on met en œuvre trois méthodes : une détermination à partir de valeurs tabulées, et deux déterminations expérimentales, l'une à l'aide de mesures calorimétriques, l'autre à l'aide de mesures de températures de début de cristallisation de solutions de concentrations apportées variables en solide S .

❖ *Première méthode* : à partir des tables. On suppose que la fusion du solide forme une solution aqueuse ionique d'acétate de sodium.

34. Écrire l'équation de la réaction qui traduit cette transformation et, à partir des données, déterminer la valeur de l'enthalpie molaire de fusion du solide S . Commenter son signe.

Deuxième méthode : la chaufferette, préalablement refroidie à 0°C , est totalement recouverte de glace, dans un récipient (A) juste après avoir été activée. Dans un récipient identique (B) posé à côté, on place de la glace jusqu'à une hauteur identique. Deux heures plus tard, les deux récipients contiennent toujours de la glace, en présence de masses différentes d'eau liquide. On suppose l'équilibre thermique établi entre la chaufferette et l'eau. On élimine la glace restante et on mesure la masse d'eau liquide dans les deux récipients : on trouve $m_A = 306$ g dans le récipient A et $m_B = 214$ g dans le récipient B . Par ailleurs, une pesée de la chaufferette entière donne une masse $m_1 = 147$ g et celle de l'enveloppe et de la lame de métal nettoyées une masse $m_2 = 8$ g.

35. En détaillant soigneusement les étapes du raisonnement, déterminer la valeur de l'enthalpie molaire de fusion du solide S obtenue par cette expérience.

Troisième méthode : on prépare des mélanges de différentes compositions avec le solide S extrait de la chauffelette et de l'eau. Pour chaque mélange on détermine par le calcul la fraction molaire $x(\text{AcONa})$ d'acétate de sodium ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, noté AcONa). On porte chacun de ces mélanges à $80\text{ }^\circ\text{C}$ et on mesure la température θ_s d'apparition des premiers cristaux au cours du refroidissement. On obtient les résultats regroupés dans le tableau 1 :

$m(S) / \text{g}$	9,43	10,20	9,90	11,54	10,32	10,84
$m(\text{eau}) / \text{g}$	5,93	3,98	1,93	1,63	1,04	0,56
$x(\text{AcONa})$	0,11	0,14	0,18	0,20	0,21	0,23
θ_s	$35\text{ }^\circ\text{C}$	$41\text{ }^\circ\text{C}$	$50\text{ }^\circ\text{C}$	$52\text{ }^\circ\text{C}$	$53\text{ }^\circ\text{C}$	$54\text{ }^\circ\text{C}$

Tableau 1

36. En supposant que l'acétate de sodium ne forme pas d'autre hydrate que celui déjà signalé (question 32) et en utilisant (entre autres informations) les points expérimentaux du tableau 1, tracer l'allure du graphe donnant la température θ_s en fonction de la fraction molaire $x(\text{AcONa})$ en acétate de sodium pour $x(\text{AcONa})$ compris entre 0 et 0,30.

En supposant que le mélange obtenu par chauffage se comporte de façon idéale, on peut à partir des résultats expérimentaux déterminer la valeur de la constante K° de l'équilibre de fusion à différentes températures T (exprimées en Kelvin). Une régression linéaire de $\ln K^\circ$ en fonction de $1/T$ donne :

$$\ln K^\circ = a/T + b \quad \text{avec } a = -2,4 \times 10^3 \text{ K et } b = 2,5$$

37. Déterminer l'enthalpie molaire de fusion du solide S .

38. Comparer et discuter les résultats obtenus par les trois approches.

D. L'odorat

Bien que l'être humain ne soit pas l'espèce présentant les meilleures performances olfactives, le nez humain est un détecteur de molécules odorantes plus sensible que la plupart des capteurs physico-chimiques : par exemple, les deux énantiomères de la pirrolidino[1,2-e]-4H-2,4-diméthyl-1,3,5-dithiazine peuvent être détectés à une concentration de l'ordre de 10^{-18} g par litre d'eau.⁵ Les récepteurs, situés dans l'épithélium olfactif qui occupe une surface d'environ 2 cm^2 dans la partie supérieure de la cavité nasale, interagissent avec les molécules odorantes, nécessairement volatiles, présentes dans l'air inhalé.

On se propose ici d'étudier quelques étapes de la synthèse d'une espèce odorante : le bourbonène, sesquiterpène naturellement présent dans les huiles essentielles de géranium bourbon et de menthe poivrée.

Lorsque des mécanismes sont demandés, les molécules peuvent être représentées de façon abrégée mais tous les atomes, doublets et liaisons intervenant dans le mécanisme doivent être explicités dans chaque étape.

D.I. Étape n°1

Cette étape est représentée figure 5, il s'agit de la formation acido-catalysée d'une imine **A**, débutant par l'activation électrophile du groupe carbonyle (a_1), suivie de l'addition nucléophile de l'amine (a_2) puis d'une déshydratation acido-catalysée du produit obtenu (a_3). Les événements (a_1) et (a_2) sont analogues à ceux que l'on observe au cours d'une héli-acétalisation, et l'événement (a_3) est analogue à la déshydratation d'un alcool en milieu acide.

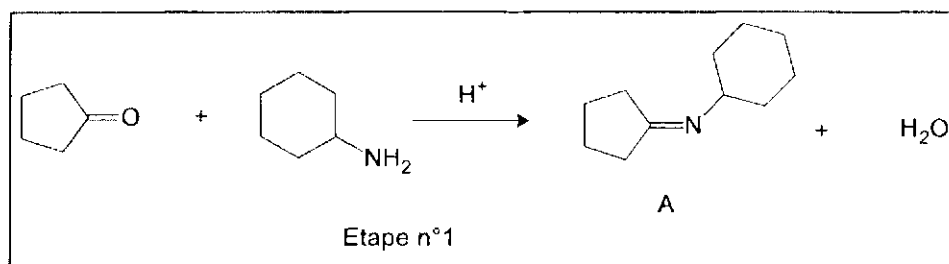


Figure 5

39. Écrire le mécanisme de la réaction de la propanone avec le méthanol en milieu acide, conduisant à l'héli-acétal correspondant.

40. Écrire le mécanisme de la déshydratation du 2,3-diméthylbutan-2-ol en milieu acide, en justifiant le produit majoritairement obtenu.

41. Proposer un mécanisme pour la formation de **A** et interpréter le fait, observé expérimentalement, que la vitesse de cette réaction est faible en milieu basique mais aussi en milieu très acide.

D.II. Étape n°2

Les atomes d'hydrogène portés par les atomes de carbone en α du groupe caractéristique de l'imine **A** présentent une certaine acidité. Ce phénomène est exploité ici pour créer une nouvelle liaison C-C. Le produit **A1** ainsi obtenu est ensuite hydrolysé selon une réaction inverse de l'étape n°1 pour conduire à la cétone **B**, comme indiqué figure 6.

⁵ *L'Actualité chimique*, n°289, Août-septembre 2005, « De la molécule à l'odeur », par Meierhenrich, U.J., Golebiowski, J., Fernandez, X., Cabrol-Bass, D.

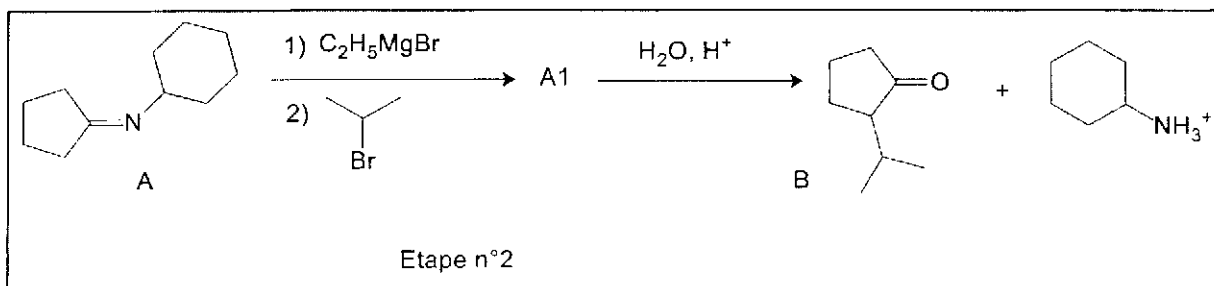


Figure 6

42. Écrire la formule de la base conjuguée de **A** et, par analogie avec une situation connue, justifier l'acidité de **A**.
43. Quel est le rôle joué ici par l'organomagnésien ? Écrire l'équation de la réaction correspondante.
44. Nommer le type de réaction mise en jeu quand on introduit le 2-bromopropane et représenter la formule du produit **A1** de cette réaction.
45. Expliquer pourquoi l'action successive du bromure d'éthylmagnésium puis du 2-bromopropane sur la cyclopentanone n'aurait pas conduit au produit désiré.

D.III. Étape n°3

Comme indiqué figure 7, l'anion nucléophile obtenu par réaction de **B** avec le méthanolate de sodium réagit sur le méthanoate d'éthyle.

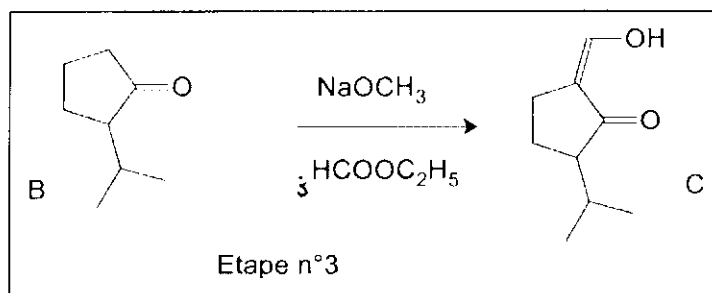


Figure 7

46. Connaissant le produit final **C**, indiquer les produits de la réaction entre le méthanolate de sodium et **B**.
47. Identifier le nouveau groupe caractéristique présent dans **C**.
48. Représenter l'isomère **C'** de **C** en équilibre avec lui. Proposer une explication à la prédominance de **C**.

D.IV. Étape n°4

Le produit **C** est traité par le tétrahydroaluminat (aluminohydrure) de lithium dans l'éther éthylique anhydre : on obtient **D** après hydrolyse (figure 8). Le spectre infrarouge (IR) de **C** comporte, entre autres, des bandes à $3\ 500\text{ cm}^{-1}$ (bande large), $1\ 735\text{ cm}^{-1}$, $1\ 670\text{ cm}^{-1}$ et $1\ 605\text{ cm}^{-1}$; celui de **D** comporte entre autres des bandes à $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ (bande large), $1\ 662\text{ cm}^{-1}$, et 895 cm^{-1} . Le spectre de RMN ^1H de **C** comporte, entre autres, un multiplet intégrant pour 1H à 7,33 ppm et celui de **D** comporte, entre autres, deux multiplets intégrant chacun pour 1H à 4,95 et 5,11 ppm.

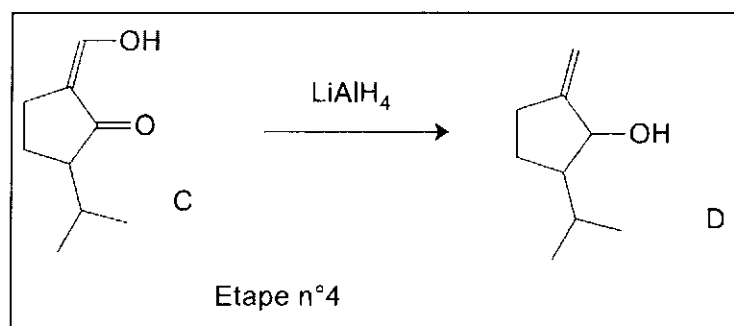


Figure 8

49. Montrer que le passage de **C** à **D** est une réduction. Est-ce cohérent avec l'utilisation de le tétrahydroaluminat de lithium ? Justifier le choix du solvant.

50. Utiliser les informations fournies pour confirmer que **C** a bien été transformé en **D** au cours de cette étape. Justifier que le spectre de RMN de **D** présente deux signaux distincts à environ 5 ppm.

D.V. Étapes n°5, n°6 et n°7

Deux étapes non étudiées ici conduisent à **E**, réactif de l'étape n°7 décrite figure 9.

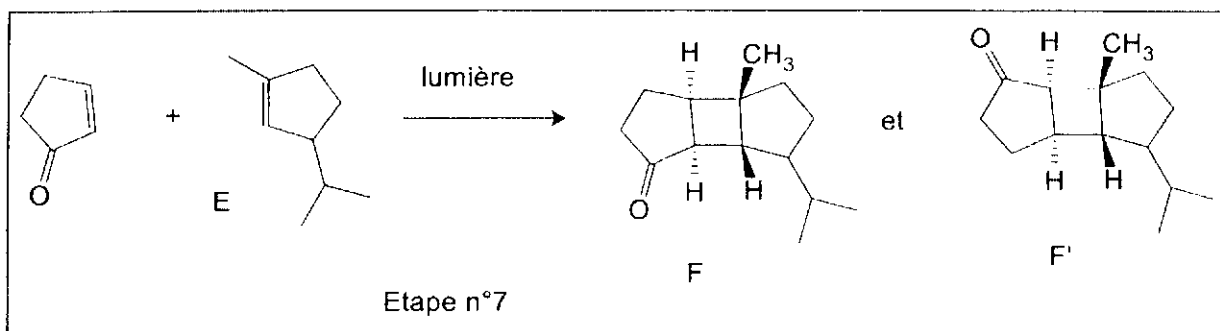


Figure 9

Le spectre de RMN ^1H de **E** comporte entre autres les trois signaux suivants : un multiplet intégrant pour 1H à 5,21 ppm ; un doublet intégrant pour 6H à 1,77 ppm ; un singulet intégrant pour 3H à 1,63 ppm.

51. Attribuer les signaux décrits de ce spectre aux noyaux d'hydrogène correspondants, en justifiant vos choix.

L'étape n°7 est l'étape clé de la synthèse qui conduit à la formation d'un cycle à quatre atomes de carbone. Il s'agit d'une cycloaddition photochimique entre **E** et la cyclopent-2-énone. Comme la cycloaddition de Diels-Alder, cette réaction peut être interprétée par le recouvrement des systèmes π des deux réactifs.

52. La réaction de Diels-Alder est une cycloaddition « 4+2 » thermique entre un diène et un philodène (ou diénophile). Justifier l'appellation « 4+2 » et écrire à l'aide des formules topologiques l'équation de la réaction entre l'éthène et le buta-1,3-diène.

53. Sur des réactifs substitués, on met en évidence la stéréosélectivité « supra-supra » de la réaction. Illustrer cette stéréosélectivité sur un exemple bien choisi.

54. En utilisant les données en annexe 4 sur les coefficients des orbitales atomiques $2p_z$ des atomes de carbone dans les orbitales moléculaires π du buta-1,3-diène et de l'éthène calculées par la méthode de Hückel simple, montrer que cette stéréosélectivité supra-supra est compatible avec un bon recouvrement des systèmes π des réactifs.

Dans le cas d'une cycloaddition photochimique comme celle qui se produit dans l'étape 7, les orbitales moléculaires π qui contrôlent la réaction sont les BV (basses vacantes) des deux réactifs. On donne en annexe 4 les coefficients des orbitales atomiques $2p_z$ des atomes concernés par la cycloaddition dans la BV de chaque réactif.

55. Montrer que ces résultats sont compatibles avec l'addition supra-supra observée et prévoir, de **F** et **F'**, lequel est obtenu majoritairement sous contrôle orbitalaire.

D.VI. Étape n°8

Cette étape, décrite figure 10, consiste à passer de l'isomère **F**, préalablement séparé de **F'**, au bourbonène. Pour réaliser cette opération, on utilise un ylure de phosphore.

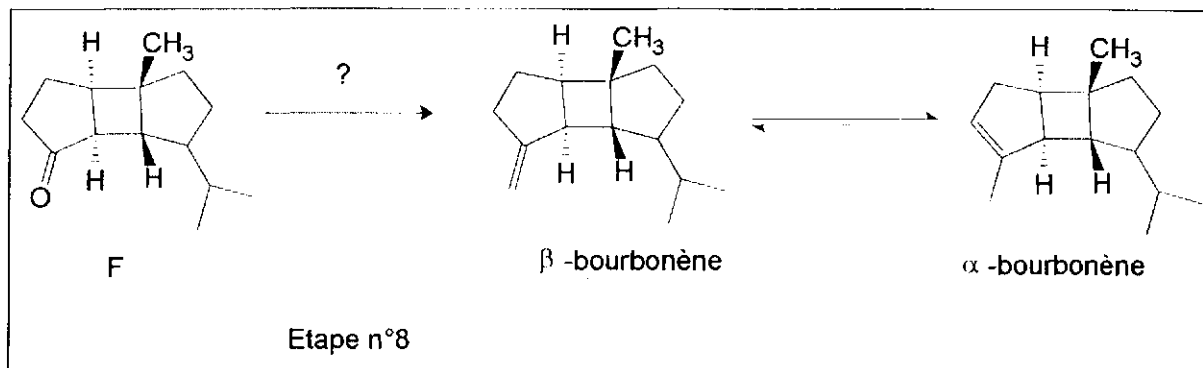


Figure 10

56. Nommer la réaction mise en jeu. Indiquer la structure de l'ylure de phosphore utilisé dans ce cas précis et la façon de le préparer à partir de produits courants du commerce.

57. Le β -bourbonène obtenu s'isomérise en milieu acide en α -bourbonène. Proposer un mécanisme pour cette réaction et commenter le fait que le mélange à l'équilibre contienne majoritairement l'isomère α .

E. L'ouïe

L'oreille, siège de l'ouïe, transforme un stimulus mécanique en un signal électrique, notamment grâce aux « cellules ciliées » de la cochlée, organe de l'oreille interne. Le nerf auditif transmet ce signal électrique au cerveau qui interprète les différentes caractéristiques du son parvenu à l'oreille : intensité, hauteur tonale, timbre...

Dans cette partie, on étudie d'une part des procédés de synthèse de mousses métalliques utilisées comme isolants phoniques puis l'intérêt de ce type de matériaux pour optimiser l'acoustique d'une salle (limitation de la réverbération).

E.I. Obtention d'une mousse métallique pour l'isolation sonore

Les propriétés des mousses métalliques (faible masse volumique et grande capacité à absorber l'énergie, notamment acoustique) en font des matériaux de choix pour l'isolation sonore. D'une façon générale, on distingue les mousses à cellules fermées où les alvéoles sont isolées les unes des autres par des cloisons, et les mousses à cellules ouvertes où les alvéoles communiquent entre elles. La cohésion de l'ensemble est assurée par des filets de matière, ou piliers. On étudie ici plusieurs procédés de fabrication de ces mousses.

On définit la porosité d'une mousse comme le quotient du volume de la phase gazeuse enfermée dans les bulles par le volume total de la mousse.

$$P = \frac{V_{\text{gaz}}}{V_{\text{mousse}}}$$

E.I.1. Procédé n°1 : soufflage de gaz dans le métal liquide

Il s'agit de créer des bulles comme on pourrait le faire en soufflant dans une eau additionnée de savon ou de détergent. Quand les bulles grossissent à l'intérieur d'une solution aqueuse, on peut obtenir une mousse « humide » à bulles sphériques, ou une mousse « sèche » à bulles polyédriques. On observe que pour des bulles de volume uniforme, la transition a lieu pour une porosité égale à 74 %. On cherche à interpréter cette valeur limite de la porosité.

58. En comparant l'empilement de bulles sphériques à un empilement de sphères dures, indiquer à quelle situation correspond la porosité de 74 %.

59. Parmi les structures métalliques cubique centrée, cubique à faces centrées, hexagonale compacte, indiquer laquelle ou lesquelles présente(nt) une situation analogue à une porosité de 74 % et en déduire le nombre de bulles en contact avec une bulle donnée.

La grande dispersion statistique des valeurs des volumes des bulles et l'inhomogénéité de leur répartition dans les mousses formées par cette méthode les rend difficilement utilisables et a conduit à rechercher d'autres techniques.

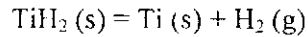
E.I.2. Procédé n°2 : décomposition d'un porogène dans le métal liquide

Dans cette technique, le gaz est créé par décomposition d'un solide (le « porogène ») à une température proche de la température de fusion du métal. Des particules de porogène de dimension contrôlée sont réparties régulièrement dans une poudre de métal et l'ensemble est compressé en un bloc solide : le barreau. Un porogène fréquemment utilisé est l'hydrure de titane TiH_2 . Ce composé cristallise avec une structure analogue à la fluorine (ou fluorure de calcium) CaF_2 : les cations se situent sur les positions caractéristiques d'un système cubique à faces centrées et les anions occupent tous les interstices tétraédriques.

60. Représenter la maille conventionnelle de l'hydrure de titane.

61. À partir des données utiles, déterminer le rayon de l'ion hydrure dans cette structure.

On suppose que la réaction de décomposition de l'hydruure de titane s'écrit :



Pour obtenir une mousse d'aluminium, il faut que la température de libération du gaz soit supérieure à la température de fusion du métal.

62. À l'aide des données thermodynamiques utiles et dans l'hypothèse où l'enthalpie de réaction et l'entropie de réaction sont indépendantes de la température (approximation dite d'Ellingham), déterminer la température de décomposition de $\text{TiH}_2 (\text{s})$ sous une pression partielle de dihydrogène $p(\text{H}_2) = 1,0$ bar. Commenter.

On souhaite que le dihydrogène soit libéré à $700\text{ }^\circ\text{C}$. Pour cela, au cours de son chauffage, on soumet le barreau à une pression de dihydrogène et on diminue cette pression quand la température adéquate est obtenue.

63. Déterminer la pression de dihydrogène à soumettre au barreau au moment de son chauffage pour que les bulles n'apparaissent pas en dessous de $700\text{ }^\circ\text{C}$.

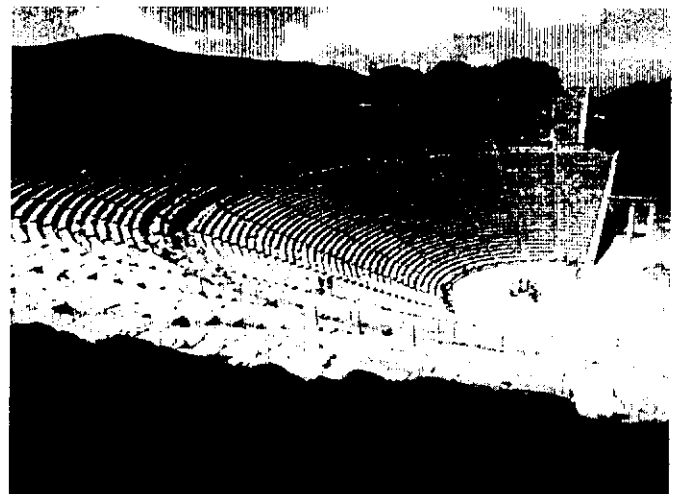
64. La composition usuelle du barreau est de $5,0\text{ g}$ de TiH_2 par kilogramme d'aluminium. La solidification de la mousse a lieu à $660\text{ }^\circ\text{C}$ sous 1 bar. Dans ces conditions le volume molaire du dihydrogène est $78\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$. Déterminer la porosité de la mousse obtenue.

E.II. Acoustique d'une salle

Depuis l'Antiquité les hommes se préoccupent de la qualité acoustique des lieux de spectacle. Ainsi, le théâtre antique d'Épidaure (ci-contre) présente une qualité acoustique telle qu'un acteur sur la scène peut être entendu à une distance de près de 60 m .

Si un des premiers traité d'architecture, *De architectura*, dû à Vitruve, remonte au 1er siècle avant J.C., pendant des siècles, l'acoustique des bâtiments est demeurée empirique, les connaissances et les savoir-faire fondés sur l'expérience et non sur une théorie physique.

Ce n'est qu'en 1900 que fut publié par Wallace Clement Sabine (1868 – 1919) un article scientifique sur l'acoustique s'appuyant sur la propagation des ondes et définissant le temps de réverbération comme une caractéristique déterminante des salles de spectacle qui sont désormais pour la plupart des lieux fermés (à l'exception des stades).

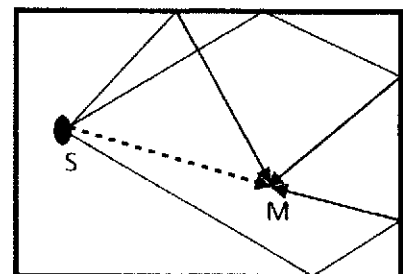


Théâtre antique d'Épidaure (d'après wikipedia)

Avec le développement des techniques numériques, on est aujourd'hui capable de prédéterminer les caractéristiques acoustiques d'un local lors de sa conception et d'effectuer ainsi toutes les corrections architecturales avant la construction.

On se propose d'étudier quelques éléments d'acoustique élémentaire de locaux fermés, salles de spectacle ou salles de classe. Des définitions d'acoustique sont fournies dans l'annexe 5.

Dans une salle de classe, les parois réfléchissent partiellement les ondes sonores. L'énergie incidente sur une paroi est en partie renvoyée vers la salle, en partie transmise de l'autre côté de la paroi et en partie absorbée. On distingue l'isolation d'une salle, qui limite l'énergie transmise, de sa correction qui donne certaines caractéristiques à l'énergie renvoyée par les parois dans la salle.



L'énergie acoustique reçue par un point M de la salle provient de la source S (énergie directe) et de l'énergie réverbérée par les parois. L'énergie réverbérée est celle d'un champ sonore, nommé champ diffus, présent dans toute la salle.

On suppose que l'isolation permet de négliger l'énergie transmise par les parois devant l'énergie absorbée et réverbérée.

E.II.1. Étude de la réverbération d'une salle

On note p_s la puissance de la source sonore ; p_{abs} la puissance absorbée par les parois ; E l'énergie volumique sonore de la salle due au champ diffus (énergie de réverbération) ; V le volume de la salle.

65. Établir, pour une durée dt , un bilan énergétique de la salle.

L'énergie absorbée par une paroi dépend du matériau qui la constitue. On définit le coefficient d'absorption α d'un matériau comme le rapport de la puissance absorbée par une paroi sur la puissance du champ incident sur celle-ci :

$$\alpha = \frac{\text{puissance absorbée}}{\text{puissance du champ incident}}$$

En régime stationnaire, l'expérience montre que la puissance reçue en un point d'une salle, suffisamment éloigné de la source, est pratiquement indépendante de la position de ce point. Tout se passe donc comme si la puissance reçue en un point était égale à la puissance réverbérée (« hypothèse de Sabine »). Cette hypothèse n'est valable que pour les salles à forte réverbération et donc constituées de parois à faible absorption.

66. Montrer que, dans l'hypothèse de Sabine, pour une paroi de surface S , absorbant une puissance moyenne $\langle p_{abs} \rangle$, l'intensité sonore moyenne réverbérée, I_r , peut s'écrire :

$$I_r = \frac{\langle P_{abs} \rangle}{\alpha S}$$

Le produit $\alpha S = A$ se nomme absorption de la salle ou surface équivalente d'absorption.

Le tableau 2 de l'annexe 5 donne les valeurs des coefficients d'absorption de quelques matériaux.

Caractéristiques de la salle de classe étudiée :

- Dimensions : $9,0 \text{ m} \times 7,0 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$;
- Murs constitués de trois cloisons en plaques de plâtre et, sur une longueur, d'une façade en béton lisse et peint, vitrée sur 40 % de sa surface ;
- Plafond et sol en « béton revêtu ».

67. Estimer le coefficient d'absorption moyen $\langle \alpha \rangle$ de la salle de classe pour une fréquence de 250 Hz, sachant que l'absorption d'une salle est la somme des absorptions des surfaces la constituant.

68. Calculer, en régime stationnaire (ou permanent), le niveau sonore L_r réverbéré dans la salle de classe avec une source de puissance sonore moyenne constante $\langle p_s \rangle = 1,50 \text{ } \mu\text{W}$.

69. Comparer l'intensité sonore réverbérée et celle reçue directement depuis la source supposée omnidirectionnelle pour un point M situé à une distance $d = 4 \text{ m}$ de la source. Commenter le résultat en regard de l'hypothèse de Sabine.

E.II.2. Optimisation du temps de réverbération

Lors de l'extinction de la source sonore l'intensité acoustique ne s'annule pas instantanément ; les ondes réverbérées sont amorties et s'éteignent progressivement. L'enregistrement avec un sonomètre du niveau sonore de la classe est représenté en figure 11 sur une durée de 1,1 s (dans la première partie de la courbe, la source est encore en fonctionnement).

Le temps de réverbération d'une salle, noté T_R , est la durée nécessaire à une décroissance du niveau sonore de 60 dB, après extinction de la source.

70. Déterminer T_R de la salle de classe à partir de l'enregistrement représenté sur la figure 11.

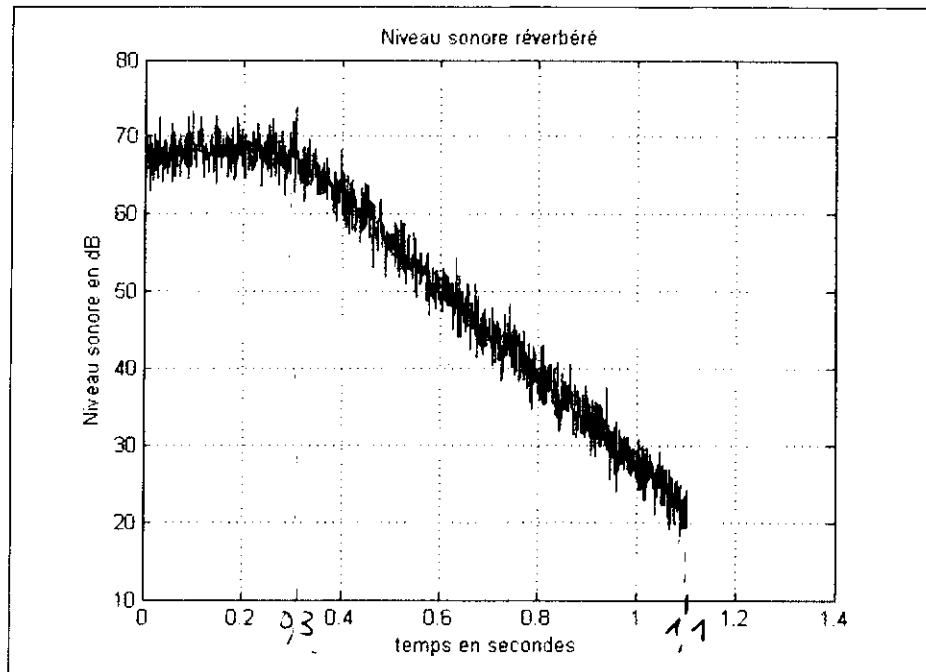


Figure 11

Le temps de réverbération dépend du volume et de la surface d'absorption d'une salle. La relation empirique suivante est souvent utilisée :

$$T_R = \frac{\beta \times V}{A}$$

en notant V le volume de la salle et A son absorption, avec $\beta = 0,16 \text{ m}^{-1}$.

Pour un bon confort acoustique dans une salle de classe, on estime que le temps de réverbération doit être compris entre 0,5 s et 0,6 s.

71. Sur quelles parois de la pièce faudrait-il intervenir et en utilisant quel type de matériau ?

72. Certaines salles, souvent anciennes, sont pourvues d'un faux plafond. Quel en est l'intérêt pour le confort acoustique ?

Annexes

Annexe 1 – Constantes

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Annexe 2 – Données physicochimiques

Les espèces sont classées par ordre alphabétique, les grandeurs thermodynamiques sont données à 25 °C.

Acétate (éthanoate)

Acétate de sodium anhydre : $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$

$$M = 82,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Acétate de sodium trihydraté : $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

$$M = 136,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_f H^\circ = -1\,602 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Ion acétate en solution aqueuse $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^- \text{ (aq)}$

$$\Delta_f H^\circ = -486 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Acide acétique (éthanoïque)

Acide acétique H_3CCOOH

$$M = 60,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

pK_a du couple $\text{H}_3\text{CCOOH} / \text{H}_3\text{CCOO}^-$: 4,8

Aluminium

Élément Al : $M = 27,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Métal Al (s) :

Masse volumique $2,70 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Température de fusion : 660 °C

Bicarbonate de soude

C'est l'hydrogénocarbonate de sodium : NaHCO_3

$$M = 84,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

pK_a des couples : $\text{CO}_2 \text{ (aq)} / \text{HCO}_3^- \text{ (aq)}$: 6,4 ; $\text{HCO}_3^- \text{ (aq)} / \text{CO}_3^{2-} \text{ (aq)}$: 10,3

Eau

$$M = 18,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Eau liquide H_2O (liq)

$$\Delta_f H^\circ = -286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Eau solide, glace H_2O (s)

$$\text{Enthalpie de fusion de la glace : } 333 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, 6,00 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Hydrogène

Élément **H** : $M = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Dihydrogène H_2 (g) :

$$S^\circ = 130,7 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Sodium

Ion sodium en solution aqueuse Na^+ (aq) :

$$\Delta_f H^\circ = -240 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Titane

Élément **Ti** : $M = 47,9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Métal **Ti** (s) :

Température de fusion : 1 668 °C

$$S^\circ = 30,7 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Hydruure de titane TiH_2 (s) :

$$M = 49,9 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Masse volumique : $3,76 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$$\Delta_f H^\circ : -120 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$S^\circ : 29,7 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Ion Ti^{2+} :

Rayon ionique : 94 pm

Annexe 3 – Données spectroscopiques

Fréquences de vibration de liaisons en spectroscopie infra-rouge :

Élongation O–H lié par liaison H intramoléculaire : 3 450 à 3 600 cm^{-1} (bande large)

Élongation O–H lié par liaison H intermoléculaire : 3 200 à 3 400 cm^{-1} (bande large)

Élongation C=O : 1 680 à 1 750 cm^{-1}

Élongation C=C : 1 580 à 1 680 cm^{-1}

Déformation $\text{RR}'\text{C}=\text{CH}_2$: vers 890 cm^{-1}

Déformation $\text{RR}'\text{C}=\text{CHR}''$: 790 à 840 cm^{-1}

Déplacement chimique en résonance magnétique du proton (RMN ^1H) :

C=C–H : de 4,5 à 7,5 ppm

Annexe 4 – Données orbitales

Coefficients des orbitales atomiques dans les orbitales moléculaires π obtenues par la méthode de Hückel simple (HO = orbitale « haute occupée », BV = orbitale « basse vacante »), l'axe z est perpendiculaire au plan formé par les atomes C engagés dans le système π .

1. Buta-1,3-diène et éthène



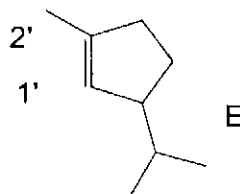
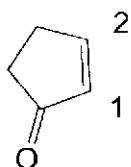
Buta-1,3-diène

	Énergie	Coefficient de l'OA $2p_z$ de l'atome n°1	Coefficient de l'OA $2p_z$ de l'atome n°4
HO	$\alpha + 0,62 \beta$	0,60	- 0,60
BV	$\alpha - 0,62 \beta$	0,60	0,60

Éthène

	Énergie	Coefficient de l'OA $2p_z$ de l'atome n°1'	Coefficient de l'OA $2p_z$ de l'atome n°2'
HO	$\alpha + \beta$	0,71	0,71
BV	$\alpha - \beta$	0,71	- 0,71

2. Molécules du problème



Cyclopent-2-énone	Atome 1	Atome 2
Coefficient de l'OA $2p_z$ dans la BV	0,20	- 0,66

Molécule E	Atome 1'	Atome 2'
Coefficient de l'OA $2p_z$ dans la BV	- 0,66	0,71

Annexe 5 – Éléments d'acoustique dans l'air

Une onde sonore plane se propageant selon une direction (Ox) est constituée d'un champ de pression acoustique qui se superpose à la pression atmosphérique et d'un champ de vitesse particulaire (ou vibratoire). L'onde sonore est longitudinale.

On appelle intensité sonore – ou intensité acoustique – la puissance moyenne par unité de surface d'une onde sonore à travers cette surface.

Le niveau sonore L exprimé en dB, est défini par $L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$ avec $I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Coefficients d'absorption de quelques matériaux.

Matériaux	Nature et composition	Fréquence					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Draperie	coton contre mur	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,44
Tissus	posé sur mousse de 5 ou 10mm (décoratif)	0,13	0,16	0,17	0,24	0,44	0,53
Rideaux	velours épais, double plis	0,50	0,50	0,70	0,90	0,90	0,92
Rideaux	coton	0,10	0,20	0,40	0,50	0,65	0,60
Panneaux Lin	en diaphragme (50mm du mur)	0,70	0,80	0,05	0,40	0,35	0,30
Contreplaqué	$e = 6 \text{ mm}$ (à 50 mm du mur)	0,60	0,40	0,35	0,12	0,08	0,080
Contreplaqué	poli et verni, $e = 8 \text{ mm}$ à 200 mm du mur	0,04	0,15	0,080	0,050	0,030	0,030
Panneaux fibres	perfora. borgne, $e = 12 \text{ mm}$, vide d'air	0,48	0,41	0,57	0,96	0,89	0,59
Panneaux fibres	perfora. borgne, $e = 12 \text{ mm}$, collé paroi	0,12	0,21	0,59	0,74	0,82	0,74
Laine minérale	$\rho = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $e = 50 \text{ mm}$	0,27	0,62	0,88	0,93	0,81	0,76
Pierres	poli	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Plâtre	plâtre lissé	0,020	0,020	0,030	0,04	0,050	0,07
3 x Plaque plâtre	$e = 10 \text{ mm} + 40 \text{ mm}$ laine min. à 0,10 m mur	0,30	0,20	0,10	0,10	0,050	0,10
Brique perforée	1500 trous/m ² + 9 mm laine minérale	0,090	0,71	0,74	0,58	0,37	0,29
Béton	brut décoffrage et non peint	0,020	0,020	0,020	0,030	0,04	0,040
Béton	très lisse et peint (verniss, laque)	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020
2 x Béton	revêtu	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20
Vitre		0,030	0,030	0,030	0,020	0,020	0,020

Tableau 2