

DE LA BETTERAVE SUCRIÈRE AUX CARBURANTS

Le sucre produit dans les feuilles de betteraves sucrières grâce à la photosynthèse s'accumule dans la racine sous forme de saccharose.

Le bioéthanol - éthanol issu de l'agriculture - peut notamment être obtenu par fermentation du sucre extrait des racines de betterave sucrière. Le bioéthanol peut être incorporé à l'essence utilisée par un grand nombre de moteurs de voiture.

Dans cet exercice, on s'intéresse au saccharose présent dans la betterave sucrière, à la production d'éthanol par fermentation du saccharose et à l'utilisation du bioéthanol dans les carburants



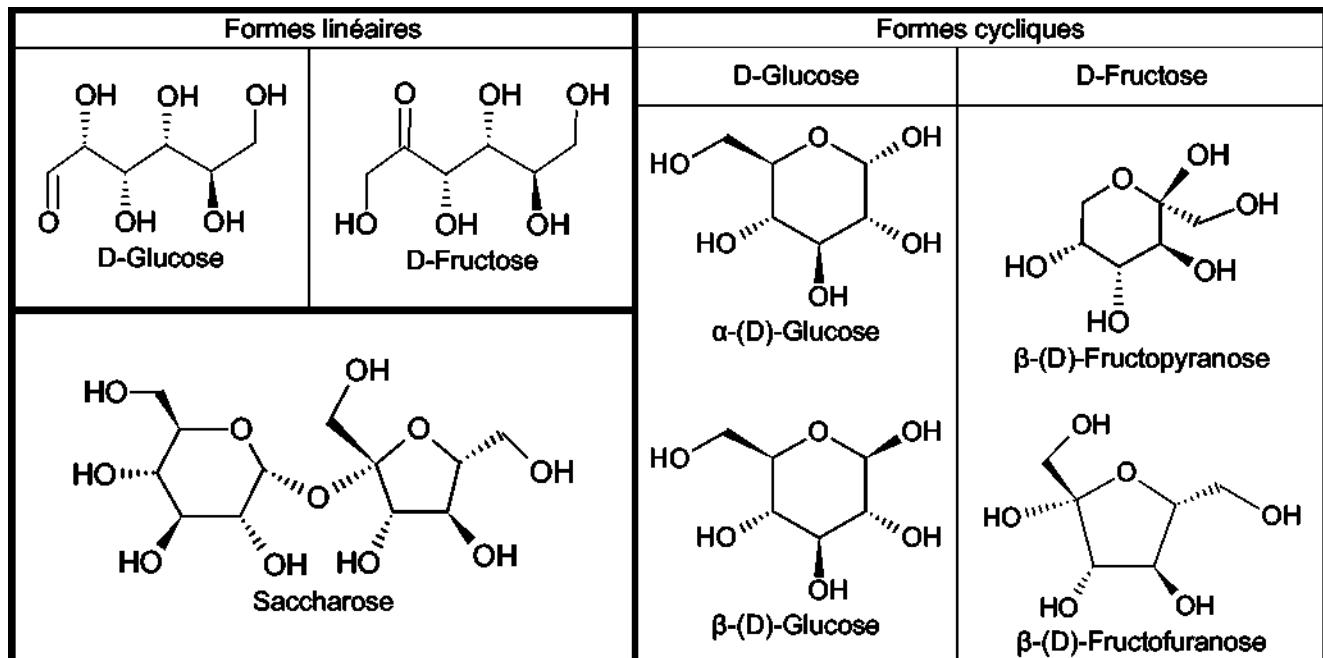
Betterave sucrière récoltée dans la région de la Beauce

Données :

- économie betteravière en France pour la récolte 2009 :
 - rendement de la culture de betterave sucrière : 74,8 tonnes par hectare ;
 - pourcentage massique moyen de saccharose dans la betterave : 19,5 % ;
- surface agricole française cultivée : environ 10 millions d'hectares ;
- masse volumique de l'éthanol : $\rho = 789 \times 10^3 \text{ g.m}^{-3}$;
- masses molaires moléculaires : $M(\text{éthanol}) = 46,0 \text{ g.mol}^{-1}$; $M(\text{saccharose}) = 342,0 \text{ g.mol}^{-1}$;
- électronégativités comparées χ de quelques éléments : $\chi(\text{O}) > \chi(\text{C})$, $\chi(\text{C})$ environ égale à $\chi(\text{H})$;
- données de spectroscopie infrarouge :

Liaison	O – H libre	O – H lié	N – H	C – H	C = O	C = C
Nombre d'onde σ (en cm^{-1})	3600 Bande fine	3200 - 3400 Bande large	3100-3500	2700-3100	1650-1750	1625-1685

- formules topologiques de quelques sucres :



1. Étude de la structure du saccharose

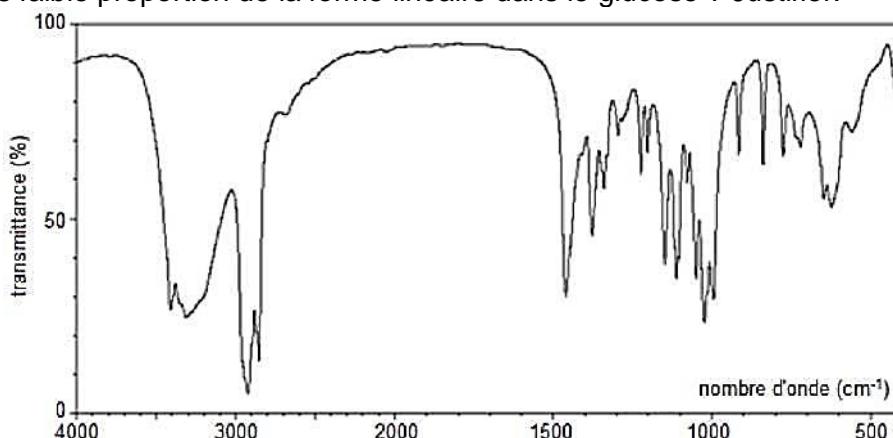
Le saccharose est formé à partir du D-Glucose et du D-Fructose.

1.1. Écrire la formule développée de la forme linéaire du D-Glucose, puis identifier par un astérisque les atomes de carbone asymétriques.

Par réaction entre deux de ses groupes caractéristiques, la forme linéaire du D-Glucose peut se transformer en l'une ou l'autre de ses formes cycliques lors d'une réaction de cyclisation. En solution aqueuse à 25°C, il s'établit un équilibre entre les différentes formes du glucose avec les proportions suivantes : 65 % de β -(D)-Glucose, 35 % de α -(D)-Glucose et environ 0,01 % de forme linéaire de D-Glucose. Le mécanisme de la cyclisation est proposé en ANNEXE, il peut conduire à l'un ou l'autre des stéréoisomères cycliques.

1.2. Dans un mécanisme réactionnel apparaissent usuellement des flèches courbes; que représentent-elles ? Compléter les trois étapes du mécanisme de cyclisation du D-Glucose figurant en ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE avec les flèches courbes nécessaires

1.3. Le spectre infrarouge obtenu par analyse d'un échantillon de glucose est fourni ci-dessous. Ce spectre confirme-t-il la très faible proportion de la forme linéaire dans le glucose ? Justifier.



Source : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology – <http://sdbs.db.aist.go.jp>

1.4. Les formes linéaires du D-Glucose et du D-Fructose sont-elles stéréoisomères ? Justifier.

1.5. À partir de quelles formes cycliques du D-Glucose et du D-Fructose le saccharose est-il formé ?

Le saccharose contenu dans 30 g de betterave sucrière est extrait avec de l'eau grâce à un montage à reflux. À la fin de l'extraction, on recueille une solution aqueuse S qui contient 5,8 g de saccharose.

1.6. L'eau est un solvant adapté à cette extraction. Proposer une explication à la grande solubilité du saccharose dans ce solvant.

On hydrolyse ensuite, en milieu acide, le saccharose contenu dans la solution S. L'hydrolyse peut être modélisée par une réaction d'équation :



On suppose que la transformation est totale, que l'eau est en excès et qu'initialement la betterave ne contenait ni glucose ni fructose.

1.7. Émettre une hypothèse sur le rôle de l'acide utilisé lors de cette hydrolyse et proposer une expérience simple permettant de la tester.

On a réalisé la chromatographie du saccharose, du D-Glucose et du D-fructose. Le chromatogramme obtenu est donné et schématisé en ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE. Tous les chromatogrammes

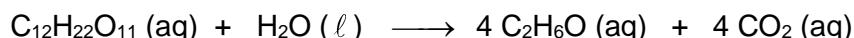
de l'ANNEXE sont supposés réalisés dans les mêmes conditions expérimentales que celui qui est photographié.

1.8. Représenter, sur l'ANNEXE à rendre avec la copie, l'allure du chromatogramme obtenu après élution et révélation, sachant que :

- le dépôt A est un échantillon du milieu réactionnel avant hydrolyse du saccharose ;
- le dépôt B est un échantillon du milieu réactionnel au cours de l'hydrolyse du saccharose ;
- le dépôt C est un échantillon du milieu réactionnel après hydrolyse complète du saccharose.

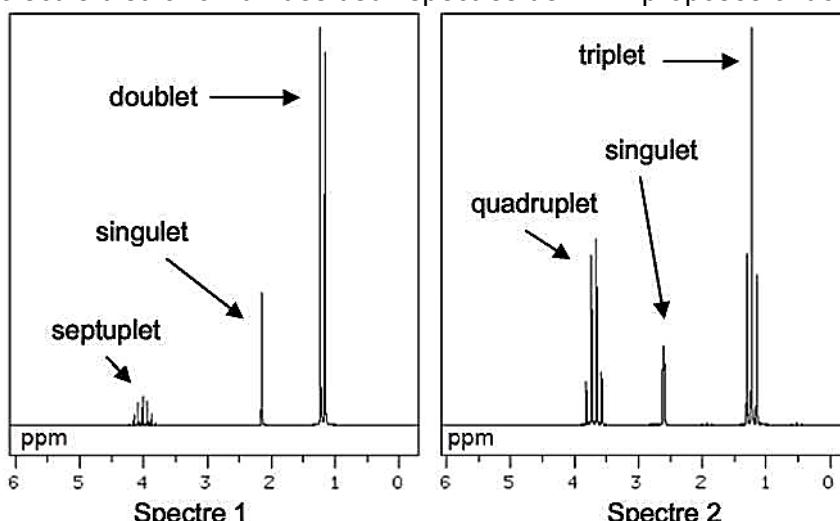
2. Du saccharose au bioéthanol

La fermentation alcoolique des jus sucrés sous l'action de micro-organismes est une source de production d'alcools. Dans le cas de la betterave sucrière, la solution de saccharose (jus sucré) extrait de la betterave fermentée pour produire de l'éthanol (bioéthanol) et du dioxyde de carbone selon la réaction supposée totale d'équation :



2.1. Écrire la formule semi-développée de l'éthanol.

2.2. Attribuer à la molécule d'éthanol l'un des deux spectres de RMN proposés ci-dessous. Justifier.



Source : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology – <http://sdbs.db.aist.go.jp>

2.3. Déterminer la masse d'éthanol obtenu par la fermentation du saccharose contenu dans une betterave sucrière de masse 1,25 kg.

3. Et si on roulait tous au biocarburant ?

L'objectif de cette partie est de déterminer la surface agricole à mettre en culture avec de la betterave sucrière pour que la France devienne autosuffisante en bioéthanol.

On fait l'hypothèse que la totalité du parc automobile utilise du carburant contenant du bioéthanol obtenu à partir du saccharose extrait de la betterave. Dans cette hypothèse, on estime que le volume de bioéthanol nécessaire au fonctionnement du parc automobile pendant un an est de l'ordre de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Montrer que la masse de betteraves sucrières qu'il faut pour produire ce volume de bioéthanol est de l'ordre de 2×10^7 tonnes. En déduire l'ordre de grandeur de la surface agricole nécessaire à cette production de betteraves sucrières. Comparer avec la surface agricole française cultivée de 2009.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

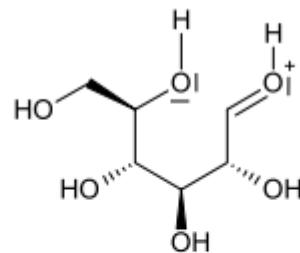
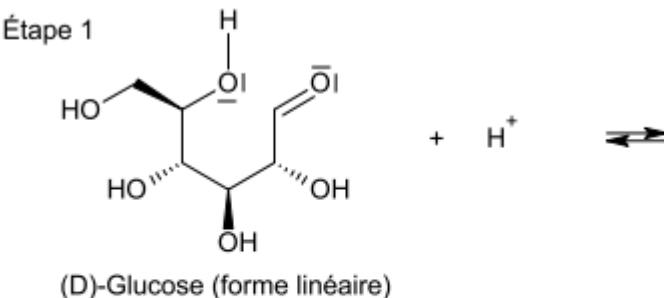
ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

ANNEXE DE L'EXERCICE II

Question 1.2.

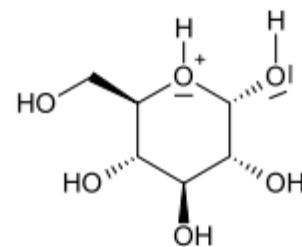
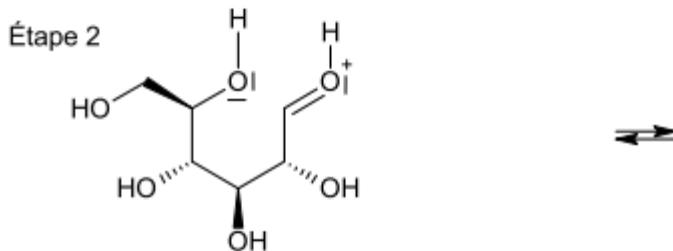
Mécanisme réactionnel de cyclisation du D-Glucose :

Étape 1

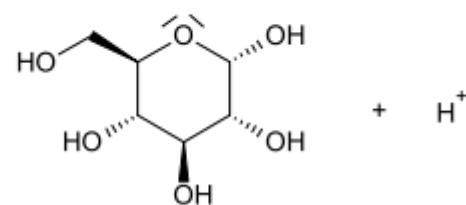
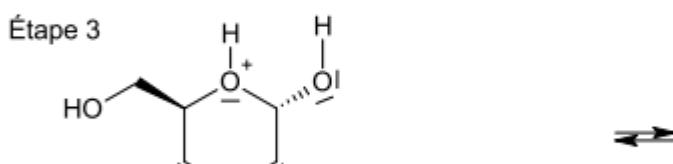


(D)-Glucose (forme linéaire)

Étape 2



Étape 3

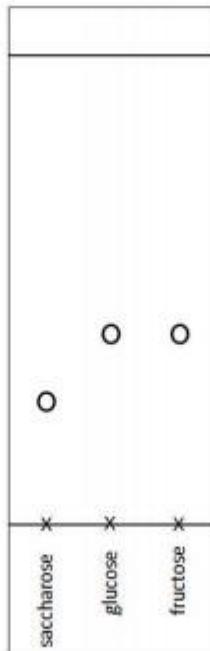


α -(D)-Glucose (forme cyclique)

Question 1.8.



Photographie du chromatogramme



Schématisation du chromatogramme

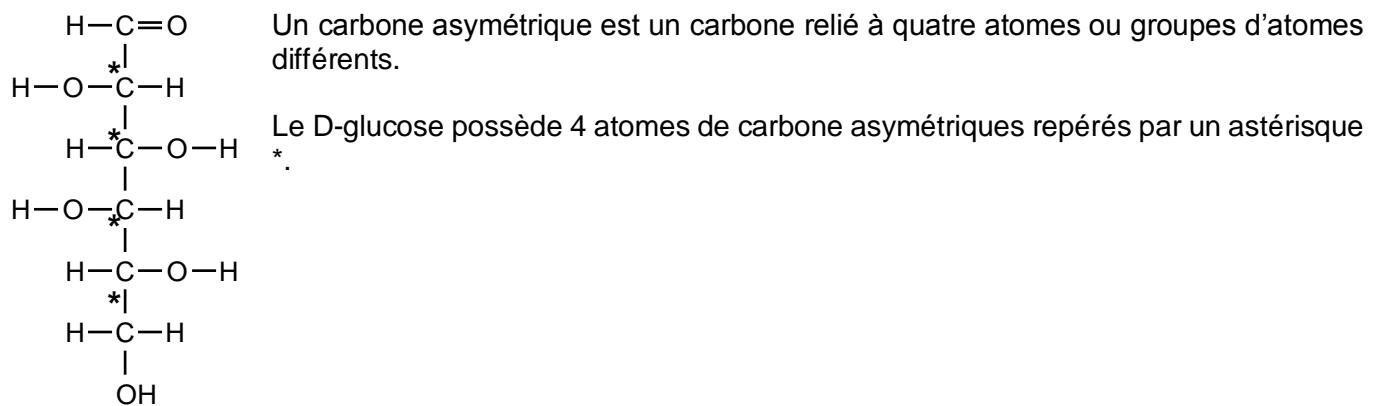


Schéma À COMPLÉTER

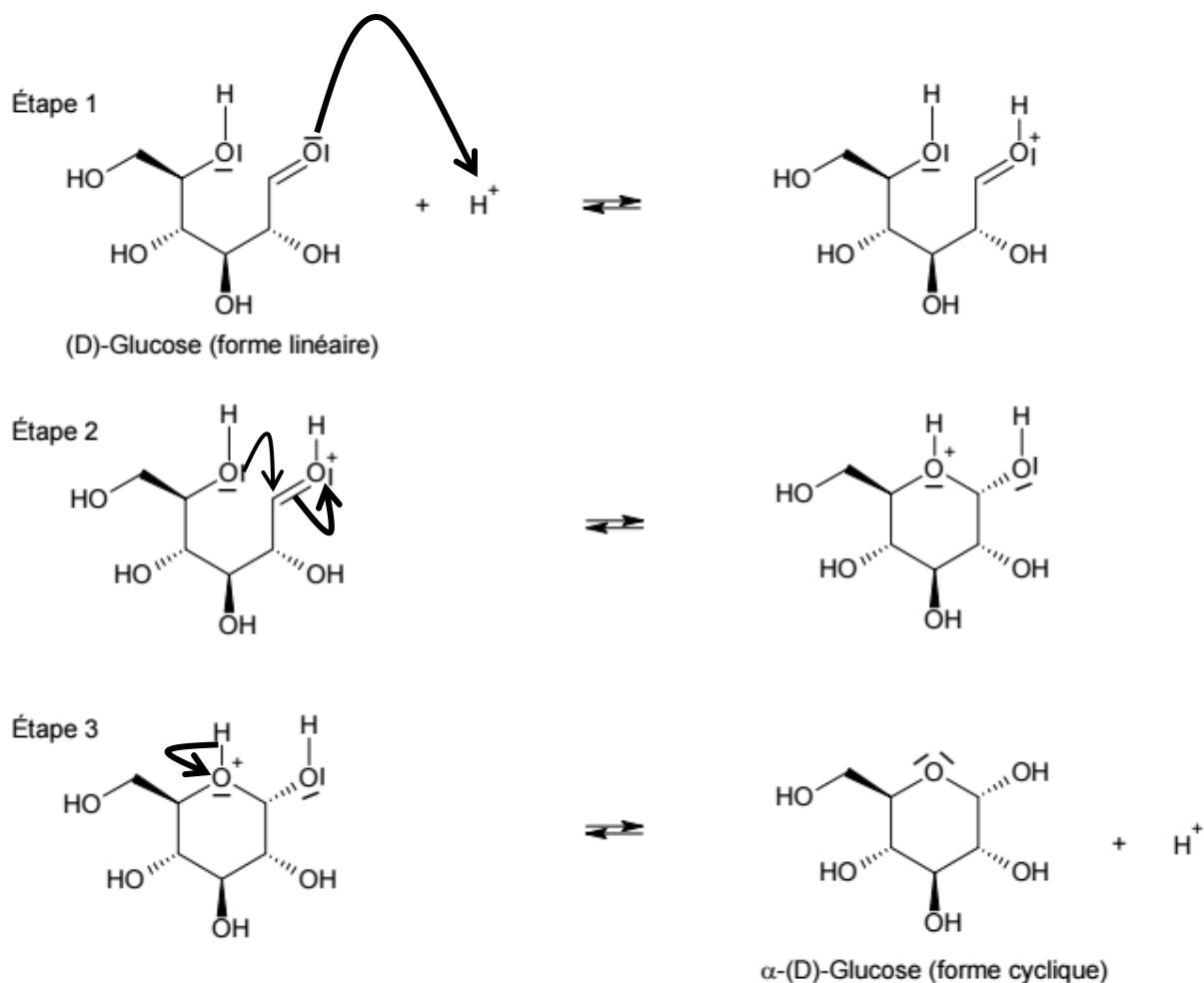
Corrigé

1. Étude de la structure du saccharose

1.1.



1.2. Les flèches courbes représentent des transferts de doublets d'électrons, elles sont orientées d'un site donneur de doublets vers un site accepteur de doublets.



1.3. Le spectre infrarouge présente deux pics l'un vers 2900 cm^{-1} , caractéristique des liaisons C-H ; l'autre vers 3300 cm^{-1} , caractéristique des liaisons O-H liées. On note surtout l'absence d'un pic d'absorption entre 1650 et 1750 cm^{-1} caractéristique du groupement carbonyle C=O présent dans la forme linéaire du D-glucose. Le D-glucose est donc soit absent, soit présent en très petite quantité, il est donc bien minoritaire.

1.4. Des stéréoisomères possèdent la même formule semi-développée, or ici le groupement carbonyle C=O du D-Glucose est sur le premier atome de carbone alors que dans D-Fructose il se trouve sur le deuxième atome de carbone. Ces deux molécules ne sont pas des stéréoisomères.

1.5. On observe les configurations spatiales des atomes de carbone asymétriques porteurs de l'atome d'oxygène reliant les deux parties de la molécule de saccharose et on les compare à celles des formes cycliques.

On voit que le saccharose est formé à partir du α -(D)-Glucose et du β -(D)-fructofuranose.

1.6. Le saccharose possède plusieurs groupements hydroxyle OH. Or l'atome d'oxygène possède une plus grande électronégativité que celui d'hydrogène, dès lors l'atome O est porteur d'une charge partielle négative δ^- et l'atome d'hydrogène est porteur d'une charge partielle positive δ^+ . La liaison O-H est polarisée.

Les groupes O-H vont pouvoir former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau ce qui explique la grande solubilité du saccharose.

1.7. L'acide utilisé lors de l'hydrolyse n'apparaît pas dans l'équation de la réaction. On peut faire l'hypothèse qu'il s'agit d'un catalyseur (régénéré au cours de la réaction).

Pour tester cette hypothèse, on peut effectuer la même expérience sans acide et comparer les temps de demi-réaction (ou les durées de réaction) avec acide.

1.8.

Au cours d'une chromatographie, une espèce chimique migre toujours à la même hauteur (avec le même éluant et la même plaque).

Avant l'hydrolyse : **A**

seul le saccharose est présent.

Au cours de l'hydrolyse : **B**

Il reste du saccharose non consommé, il s'est formé du glucose et du fructose.

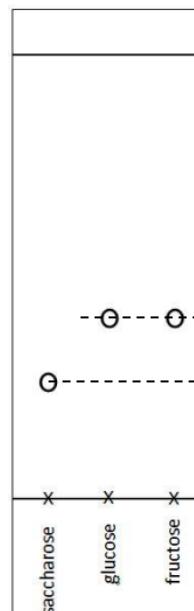
Après hydrolyse complète : **C**

L'eau étant introduite en excès et la transformation étant totale, il ne reste plus de saccharose.

Seuls sont présents les produits formés (glucose et fructose).



Photographie du chromatogramme



Schématisation du chromatogramme

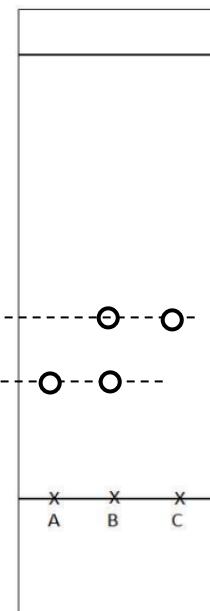


Schéma
À COMPLÉTER

2. Du saccharose au bioéthanol

2.1. éthanol $\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--OH}$

2.2. Les deux spectres présentent trois signaux, il faut regarder la multiplicité des signaux pour déterminer quel spectre appartient à l'éthanol.

Le spectre de l'éthanol contient un singulet provenant du proton du groupement hydroxyle.

Les trois protons du groupement CH_3 - ont deux atomes d'hydrogène sur l'atome de carbone voisin et donnent un triplet.

Les deux protons centraux $-\text{CH}_2-$ ont trois plus proches voisins et donnent un quadruplet.

Seul le spectre 2 possède un singulet, un triplet et un quadruplet, c'est donc le spectre de l'éthanol.

2.3. D'après l'équation de la réaction supposée totale, la consommation d'une mole de saccharose $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ conduit à la formation de quatre moles d'éthanol.

On peut traduire cela par $n_s = \frac{n_e}{4}$ ou encore $n_e = 4 n_s$ où n_e représente la quantité de matière d'éthanol obtenue par fermentation.

On commence par exprimer la masse m_s de saccharose présente dans une betterave de masse $m = 1,25 \text{ kg}$, sachant que le pourcentage massique en saccharose vaut 19,5%.

$$m_s = \frac{19,5}{100} \times m$$

On peut alors exprimer, la quantité de matière n_s en saccharose dans la betterave :

$$n_s = \frac{m_s}{M(\text{saccharose})} = \frac{0,195 \times m}{M(\text{saccharose})}$$

$$\text{On obtient } n_e = 4 \times \frac{0,195 \times m}{M(\text{saccharose})}$$

$$\text{La masse d'éthanol obtenue est finalement : } m_e = n_e \cdot M(\text{éthanol}) = \frac{4 \times 0,195 \times m \times M(\text{éthanol})}{M(\text{saccharose})}$$

$$m_e = \frac{4 \times 0,195 \times 1,25 \times 10^3 \times 46,0}{342,0} = 131 \text{ g}$$

Autre méthode :

D'après l'équation de la réaction supposée totale, la consommation d'une mole de saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$ conduit à la formation de quatre moles d'éthanol.

On peut traduire cela par $n_s = \frac{n_e}{4}$ ou encore $n_e = 4 n_s$ où n_e représente la quantité de matière d'éthanol obtenue par fermentation.

On utilise la donnée « 30 g de betterave ... on recueille 5,8 g de saccharose ».

Ainsi par proportionnalité 30 g de betterave \rightarrow 5,8 g de saccharose
 $1,25 \times 10^3$ g de betterave $\rightarrow m_s$ g de saccharose

$$m_s = \frac{1,25 \times 10^3 \times 5,8}{30} = 241,67 \text{ g de saccharose} \quad \text{valeur non arrondie stockée en mémoire}$$

$$n_e = 4 \cdot n_s = 4 \cdot \frac{m_s}{M(\text{saccharose})}$$

$$m_e = n_e \cdot M(\text{éthanol}) = 4 \cdot \frac{m_s}{M(\text{saccharose})} \cdot M(\text{éthanol})$$

$$m_e = 4 \times \frac{241,67}{342,0} \times 46,0 = 130 \text{ g}$$

3. Volume de bioéthanol nécessaire : $V = 3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Masse volumique de l'éthanol (=bioéthanol) : $\rho = 789 \times 10^3 \text{ g.m}^{-3} = 789 \text{ kg.m}^{-3}$.

Déterminons la masse d'éthanol nécessaire : $\rho = \frac{m_{\text{necess}}}{V}$ donc $m_{\text{necess}} = \rho \cdot V$

$$m_{\text{necess}} = 789 \times 3 \times 10^6 = 2,367 \times 10^9 \text{ kg} = 2,367 \times 10^{12} \text{ g}$$

On n'arrondit pas ce résultat intermédiaire.

On a établi à la question précédente que 1,25 kg de betterave permet d'obtenir 131 g d'éthanol (ou 130g).

Ainsi par proportionnalité 1,25 kg de betterave \rightarrow 131 g d'éthanol (ou 130 g)
 $m_{\text{bet}} = ? \text{ kg} \rightarrow 2,367 \times 10^{12} \text{ g}$

$$m_{\text{bet}} = \frac{1,25 \times 2,367 \times 10^{12}}{131} = 2,26 \times 10^{10} \text{ kg} = 2,26 \times 10^7 \text{ tonnes} \quad (\text{ou } 1,82 \times 10^7 \text{ t})$$

En ne conservant qu'un seul chiffre significatif, on retrouve bien la valeur annoncée de **2 × 10⁷ tonnes**.

Surface agricole nécessaire à cette production :

On prend la valeur arrondie de 2×10^7 tonnes pour la suite.

D'après les données, le rendement de la culture de betterave est de 74,8 tonnes par hectare.

Pour produire 2×10^7 tonnes, il faut une surface $S = \frac{2 \times 10^7}{74,8} = 2,7 \times 10^5$ ha = $0,27 \times 10^6$ ha, c'est-à-dire

0,3 millions d'hectares en ne conservant qu'un seul chiffre significatif.

Cela correspond à un **ordre de grandeur de 10^5 ha**.

Cette surface semble très faible par rapport à la surface agricole française cultivée en 2009 qui vaut

10 millions d'hectares, en effet elle ne représente que $\frac{0,3}{10} = 0,03 = 3\%$ de cette surface.

On peut penser que si le bioéthanol n'est pas plus utilisé, c'est qu'il est sûrement plus cher à produire que l'essence.