

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2019

—

**SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN  
LABORATOIRE**

(Classes de terminale STL)

PREMIERE PARTIE

Durée : 5 heures

—

L'usage de tout modèle de calculatrice, avec ou sans mode examen, est autorisé.

**Consignes aux candidats**

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Section/S spécialité/Série : SPECL

Epreuve : 101

Matière : SPCL

Session : 2019







# CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

---

SESSION 2019

---

## SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LABORATOIRE SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE

**Durée : 5 heures**

---

*Si au cours de l'épreuve un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre pour cela.*

*Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet. Ce sujet comporte 25 pages numérotées de 1/24 à 24/24. L'annexe page 24/24 est un document réponse à rendre avec la copie.*

*Le sujet comporte deux parties indépendantes. Les candidats doivent rédiger chacune de ces deux parties sur des feuilles différentes.*

*Il est souhaitable qu'un futur lauréat du concours général montre sa maîtrise dans les différents domaines de la chimie et de la physique. Il lui est donc fortement conseillé d'aborder toutes les parties.*

*L'usage de la calculatrice est autorisé.*

## Thème général : Coupe du monde de football

Dimanche 15 juillet 2018, face à la Croatie, l'équipe de France masculine de football a décroché en Russie son deuxième titre de champion du monde après celui de 1998. Les Bleus chercheront à réitérer cette performance lors de la prochaine Coupe du Monde qui se tiendra en 2022 au Qatar. Ce sujet permet de se replonger dans cet incroyable épisode russe qui a enflammé les Français et de se projeter sur la prochaine compétition au Qatar.



- A. *Coupe du monde et dopage*-----3  
B. *Objectif Qatar 2022*-----15

## A. Coupe du monde et dopage

Lors de la dernière coupe du monde de football, la FIFA, l'instance dirigeante du football mondial, a annoncé avoir réalisé 2700 tests sans constater de violation. Cette partie du problème s'intéresse aux moyens de contrôle du dopage des sportifs lors de telles compétitions.

L'EPO (érythropoïétine) est le produit star parmi les drogues de la performance, rendu notamment célèbre dans le cyclisme. C'est une molécule qui influe sur la production de globules rouges dans le corps humain et qui permet alors une meilleure oxygénation des tissus musculaires, donc une meilleure performance « sportive ».

### Quelques données

Masses molaires :  $M(H) = 1,010 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  ;  $M(C) = 12,01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  ;  $M(O) = 16,00 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

Température de fusion du propionate de testostérone : 118-123 °C.

Table de données IR :

Liaison	C-H (alcane)	C-H (alcène)	C=O (cétone)	C=O (ester)	C=O (cétone conjuguée)	O-H (alcool)
Nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )	2840-3000	3000-3100	1705-1725	1735-1750	1666-1685	3200-3550

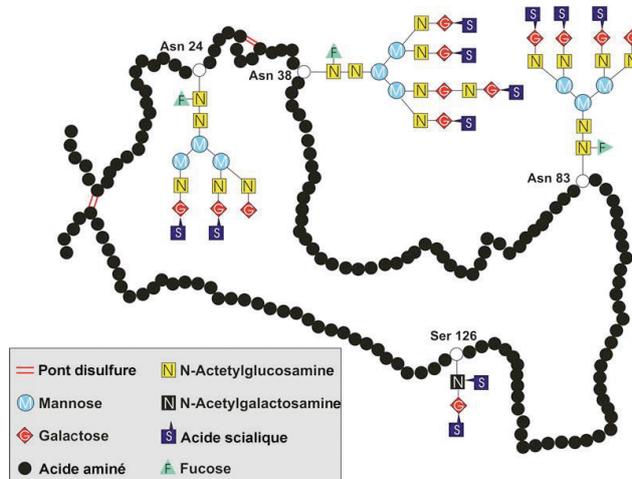
## A.1. Structure et propriétés de l'EPO

### Document 1 – L'EPO

L'EPO, ou érythropoïétine, est une hormone de nature glycoprotéique (constituée d'une partie protéique de 165 acides aminés liée à un glucide).

Sécrétée par les reins et le foie, elle stimule la production de globules rouges par la moelle osseuse, augmentant ainsi la capacité respiratoire : nous la sécrétions dès que le taux d'oxygène sanguin diminue.

Depuis 1988, une molécule de synthèse ayant la même action que l'EPO endogène (c'est-à-dire produite par le corps humain), l'EPO recombinante, est disponible et a été utilisée par des sportifs pour augmenter la capacité respiratoire et donc l'endurance, et faciliter la récupération<sup>1</sup>.



**Figure 1 : représentation schématique de l'EPO humaine avec la chaîne polypeptidique, les groupements oligosaccharidiques et les ponts disulfures (liaisons S-S)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> « La traque aux molécules dopantes », Jean-Luc Veuthey (extrait du livre *La chimie et le sport*, EDP Sciences, 2011, isbn : 978-2-7598-0596-9, p. 157)

<sup>2</sup> Mihov, Deyan Nikolaev. Cytoprotective properties of erythropoietin in nonerythropoietic tissues : from erythrocytes to the heart. 2009, University of Zurich, Faculty of Science.

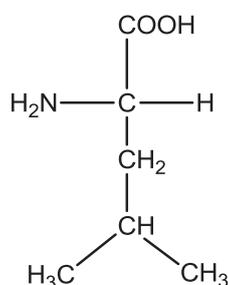
## Document 2 – Le point isoélectrique

Le point isoélectrique d'une entité chimique, noté généralement  $pI$ , est la valeur de  $pH$  pour laquelle cette entité est électriquement neutre, sous forme zwitterionique (c'est-à-dire portant une charge positive et une charge négative situées sur deux atomes non adjacents).

Pour un acide aminé simple, le point isoélectrique peut être déterminé à partir des deux  $pK_a$  associés à cet acide par la formule suivante :

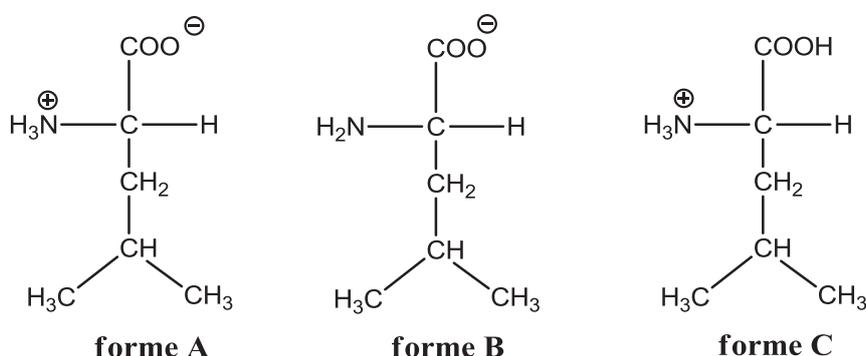
$$pI = \frac{1}{2}(pK_{a1} + pK_{a2})$$

Comme indiqué dans le **document 1**, l'EPO est principalement formée d'une chaîne d'acides aminés, parmi lesquels la L-leucine, dont la représentation de Fischer est donnée ci-dessous :



1. Identifier et nommer les groupes fonctionnels présents dans cette molécule.
2. Identifier le(s) atome(s) de carbone asymétrique(s) de la L-leucine.

En réalité, la L-leucine n'existe pas en solution aqueuse sous la forme représentée ci-dessus. En effet, en fonction de la valeur de  $pH$  du milieu dans lequel elle se trouve, les trois formes acido-basiques possibles sont les suivantes :



Les deux valeurs de  $pK_a$  associées à la L-leucine sont 2,4 et 9,6. On donne de plus les  $pK_a$  des couples acide éthanoïque/ion éthanoate et ion ammonium/ammoniac :

$$pK_a(\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-) = 4,8 ; pK_a(\text{NH}_4^+/\text{NH}_3) = 9,2.$$

3. En vous aidant des données ci-dessus, attribuer les deux  $pK_a$  de la L-leucine aux couples correspondants.
4. Recopier et compléter le diagramme de prédominance des formes acido-basiques de la L-leucine ci-dessous.



5. En vous aidant du **document 2**, donner la valeur du point isoélectrique de la L-leucine.

## A.2. Électrophorèse de l'EPO

Les différents acides aminés d'un mélange peuvent être séparés par électrophorèse. Cette méthode est décrite dans le **document 3**.

### Document 3 – L'électrophorèse

L'électrophorèse est une technique d'analyse mise au point pour la première fois en 1937 par le biochimiste suédois Arne Wilhem Kaurin Tiselius. Elle consiste en la séparation des ions d'un mélange en fonction de leur charge et de leur taille, sous l'effet d'une différence de potentiel électrique appliquée entre deux électrodes.

Le plus couramment, l'échantillon est déposé sur un support (par exemple une bande de papier ou d'acétate de cellulose) imbibé d'une solution de pH fixé, appelée solution tampon.

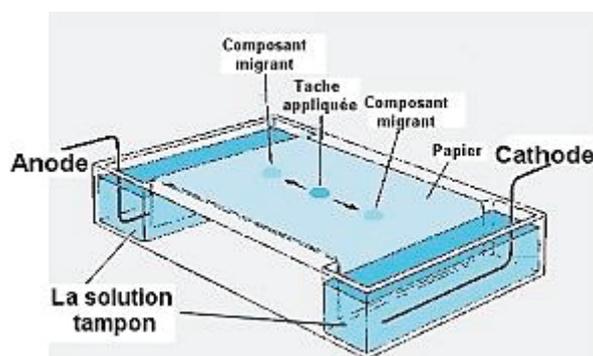


Figure 2 : principe de l'électrophorèse<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://www.lebioblog.com/article-la-chromatographie-sur-couche-minche-et-l-electrophorese-112923885.html>

## Document 4 – La focalisation isoélectrique

La focalisation isoélectrique (FIE) est un type d'électrophorèse permettant de séparer un mélange de molécules en fonction de la valeur de leur point isoélectrique.

Le principe de base de la focalisation isoélectrique est de créer une zone de variation de pH dans laquelle peuvent se déplacer les protéines soumises à un champ électrique. Les protéines migrent dans ce champ électrique. Arrivées au pH correspondant à leur  $pI$ , elles s'immobilisent. De cette façon, il est possible de séparer les protéines d'une préparation selon leur  $pI$ .

On peut créer une telle variation de pH avec des solutions tampons contenant des « polyélectrolytes » porteurs de groupes ionisables positivement ou négativement. Ces polyélectrolytes contenus dans une solution imprégnant un gel de polyacrylamide migrent sous l'action d'un champ électrique et se distribuent par ordre de  $pI$ . En fonction de sa position, chaque zone du gel est tamponnée à un pH donné par le  $pI$  des polyélectrolytes présents dans cette zone. Une série de polyélectrolytes ayant chacun un  $pI$  couvrant une certaine gamme de pH crée donc une zone dans laquelle le pH varie de manière continue de  $pH = 2$  à  $pH = 10$  environ. Si on fait migrer une petite quantité de protéines dans ce système, après ou durant sa formation, elles migrent aussi et s'immobilisent à leur  $pI$ .<sup>4</sup> Le sens d'évolution du pH dans le schéma ci-dessous sera précisé dans la **question 10**. Une solution d'acide fort se trouve à une extrémité du gel et une solution de base forte à l'autre extrémité.

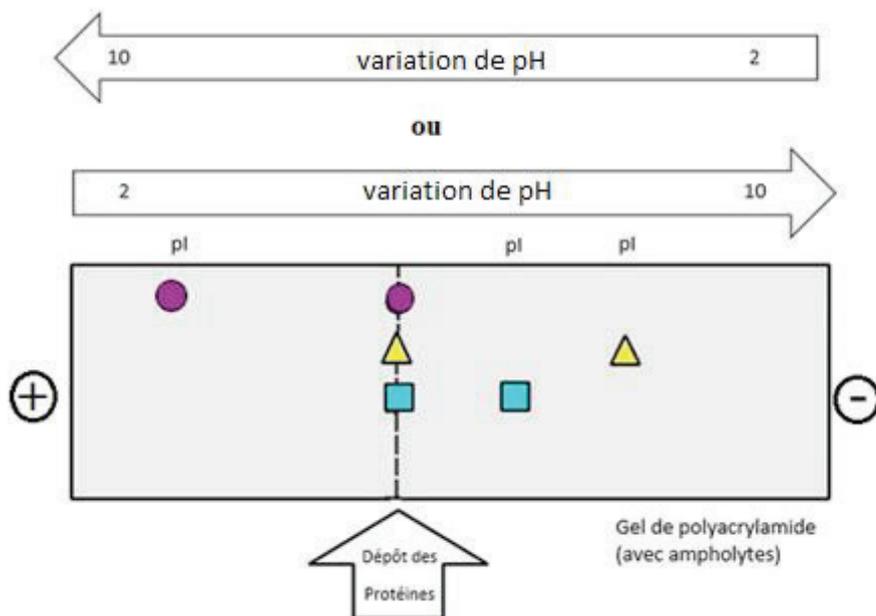
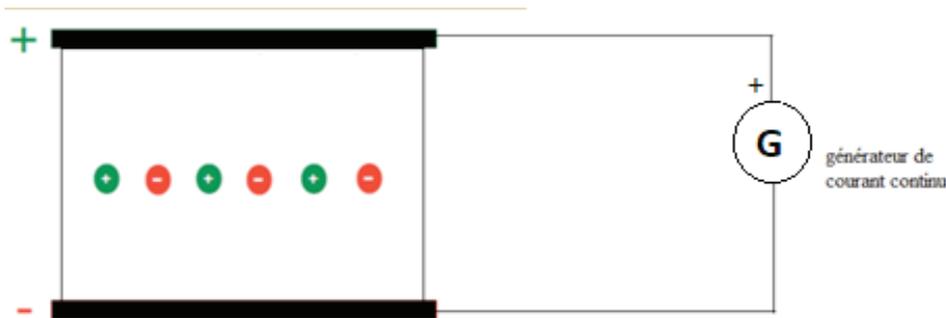


Figure 3 : principe de la focalisation isoélectrique<sup>5</sup>

6. Dans le schéma simplifié d'une électrophorèse ci-dessous, préciser quel pôle correspond à l'anode et quel pôle correspond à la cathode.

<sup>4</sup> [http://www8.umoncton.ca/umcm-gauthier\\_didier/siitub/FIE.html](http://www8.umoncton.ca/umcm-gauthier_didier/siitub/FIE.html)

<sup>5</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Montage\\_focalisation\\_iso%C3%A9lectrique.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Montage_focalisation_iso%C3%A9lectrique.jpg)



**Figure 4 : Schéma simplifié d'une électrophorèse**

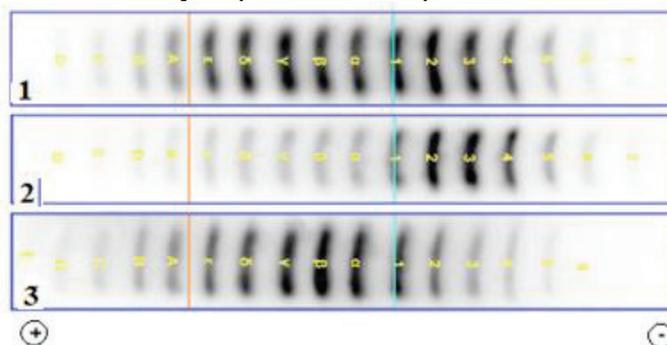
7. Compléter la **figure 4** fournie en annexe en y ajoutant des flèches indiquant le sens de déplacement des électrons dans les fils, ainsi que le sens de déplacement des ions sur le support.

Dans le cas de l'EPO, la situation est plus compliquée en raison des 165 acides aminés présents. Afin de détecter la présence d'EPO dans un échantillon d'urine d'un footballeur, il faut pouvoir notamment différencier l'EPO endogène de l'EPO recombinante. Cette dernière est produite à partir de cellules de hamster et présente quelques différences de structure avec son homologue naturelle. En particulier, le point isoélectrique est différent, ce qui permet de séparer les différentes formes d'EPO par focalisation isoélectrique (voir **document 4**).

Ainsi, le pI de l'EPO endogène est compris dans une zone de pH s'étendant environ de 3,7 à 4,7, tandis que celui de l'EPO recombinante est compris dans l'intervalle de pH 4,4-5,1 environ.<sup>6</sup>

8. Pour  $\text{pH} < \text{pI}$ , quel est le signe de la charge globale du composé ? Même question pour  $\text{pH} > \text{pI}$ . On pourra s'aider pour répondre de la question 4.
9. Expliquer ces phrases du **document 4** : « Les protéines migrent dans ce champ électrique. Arrivées au pH correspondant à leur pI, elles s'immobilisent. »
10. En déduire quel doit être le sens de variation du pH dans la **figure 3** du **document 4**.

Trois exemples de résultats d'analyse par FIE sont présentés ci-dessous.



**Figure 5 : Bandes obtenues après FIE<sup>7</sup>**

<sup>6</sup> Testing for recombinant erythropoietin, Joris R. Delanghe, Mathieu Boollen and Monique Beullens, Am. J. Hematol. 83 :237-241, 2008

<sup>7</sup> <https://precisionbiosystems.com/western-blot-application-note/>

11. Attribuer à chaque bande l'un des choix suivants :

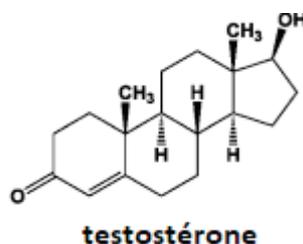
- échantillon contrôlé négatif à l'EPO recombinante (mais contenant aussi de l'EPO endogène) ;
- échantillon contrôlé positif à l'EPO recombinante (contenant peu ou pas d'EPO endogène) ;
- échantillon suspect susceptible de contenir de l'EPO recombinante en plus de l'EPO endogène.

### A.3. Propriétés de la testostérone

L'EPO n'est pas le seul produit dopant chez les sportifs, une étude sur le dopage conduite par l'UEFA, l'instance européenne du football, a révélé un nombre inattendu de taux élevés de testostérone suggérant que celle-ci s'est aussi introduite dans le monde du football en tant que produit dopant. La testostérone est une hormone stéroïdienne qui intéresse particulièrement le monde du sport notamment car elle a un effet sur les muscles, développe la volonté de gagner et crée un comportement de type « dominant ». Les anabolisants stéroïdiens cherchent à reproduire les effets de la testostérone et sont détournés de leur usage dans les comportements dopants.

#### Document 5 – Testostérone et stéroïdes anabolisants

La testostérone, de formule brute  $C_{19}H_{28}O_2$ , est la principale hormone sexuelle mâle et le prototype des stéroïdes anabolisants<sup>8</sup>.

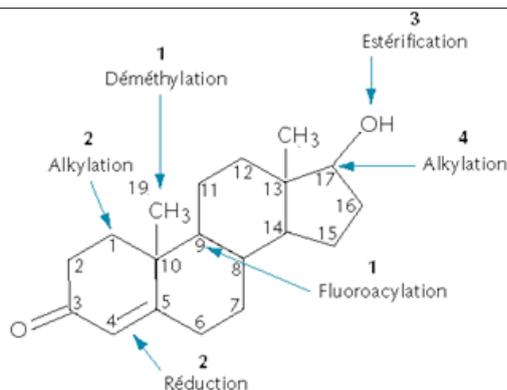


Les stéroïdes anabolisants sont des dérivés de synthèse de la testostérone, dont les modifications chimiques ont réduit les effets androgéniques au profit des effets anabolisants.

Le métabolisme rapide de la testostérone après prise orale ou injection intra-musculaire résulte de son passage hépatique et de sa transformation en métabolites inactifs. Les modifications chimiques de la testostérone permettent d'obtenir des dérivés qui résistent à cette dégradation hépatique. Une possibilité de modification chimique est l'estérification en  $17\beta$  de la testostérone par des composés carboxylés comme les acides propanoïque, cypionique ou heptanoïque. Ces dérivés estérifiés lipophiles sont injectés sous forme de solutions huileuses et sont libérés dans la circulation sanguine d'autant plus lentement que la chaîne carbonée est longue.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> <http://www.societechimiquedefrance.fr/testosterone.html>

<sup>9</sup> [https://www.jle.com/fr/revues/mte/e-docs/le\\_dopage\\_aux\\_anabolisants\\_190043/article.phtml?tab=texte](https://www.jle.com/fr/revues/mte/e-docs/le_dopage_aux_anabolisants_190043/article.phtml?tab=texte)



**Figure 6 : Modifications chimiques possibles de la testostérone. 1 : augmente l'action anabolisante, 2 : diminue l'action virilisante, 3 : prolonge l'activité, 4 : augmente l'activité après prise orale**

12. Que signifie le terme « lipophile » ?

13. Expliquer la phrase suivante du **document 5** : « Ces dérivés estérifiés lipophiles sont injectés sous forme de solutions huileuses et sont libérés dans la circulation sanguine d'autant plus lentement que la chaîne carbonée est longue ».

#### A.4. Dépistage de la testostérone par GC/C/IRMS

De même que l'EPO, la testostérone existe sous forme endogène (c'est-à-dire produite naturellement par le corps) et exogène (synthétique). Tout l'enjeu des contrôles anti-dopage est donc de distinguer la testostérone exogène de l'endogène. Le dépistage de testostérone exogène dans les urines se fait par un appareil constitué d'un chromatographe en phase gazeuse (GC) couplé à un spectromètre de masse de rapport isotopique (IRMS) via une interface de combustion (C)<sup>10</sup>.

Après séparation de la testostérone et de ses différents métabolites, les molécules subissent une combustion produisant CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. Après élimination de l'eau, le dioxyde de carbone est injecté dans le spectromètre de masse, dans lequel il est ionisé en CO<sub>2</sub><sup>+</sup>. L'appareil sépare les ions issus des deux isotopes en fonction de leur rapport masse/charge (m/z). Le principe de l'analyse repose sur le fait que la teneur en isotope 13 du carbone (<sup>13</sup>C) est différente suivant l'origine endogène ou exogène des métabolites de la testostérone, la testostérone exogène contenant moins de <sup>13</sup>C que son homologue endogène. L'appareil mesure alors le rapport isotopique <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C et fournit la déviation isotopique δ<sup>13</sup>C, exprimée en ‰ et définie par :

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{référence}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{référence}}} \times 1000$$

Les déviations isotopiques ont des valeurs négatives. La référence utilisée est le VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) pour lequel <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C = 0,0112372. On peut conclure à une

<sup>10</sup> Détection de la testostérone par IRMS, Docteur Corinne Buisson, Département des analyses de l'Agence française de lutte contre le dopage (Laboratoire de Châtenay-Malabry)

administration exogène de testostérone lorsque la différence de déviation isotopique entre les métabolites de la testostérone et des composés endogènes de référence (CER) issus de voies métaboliques différentes est supérieure en valeur absolue à 3 ‰.

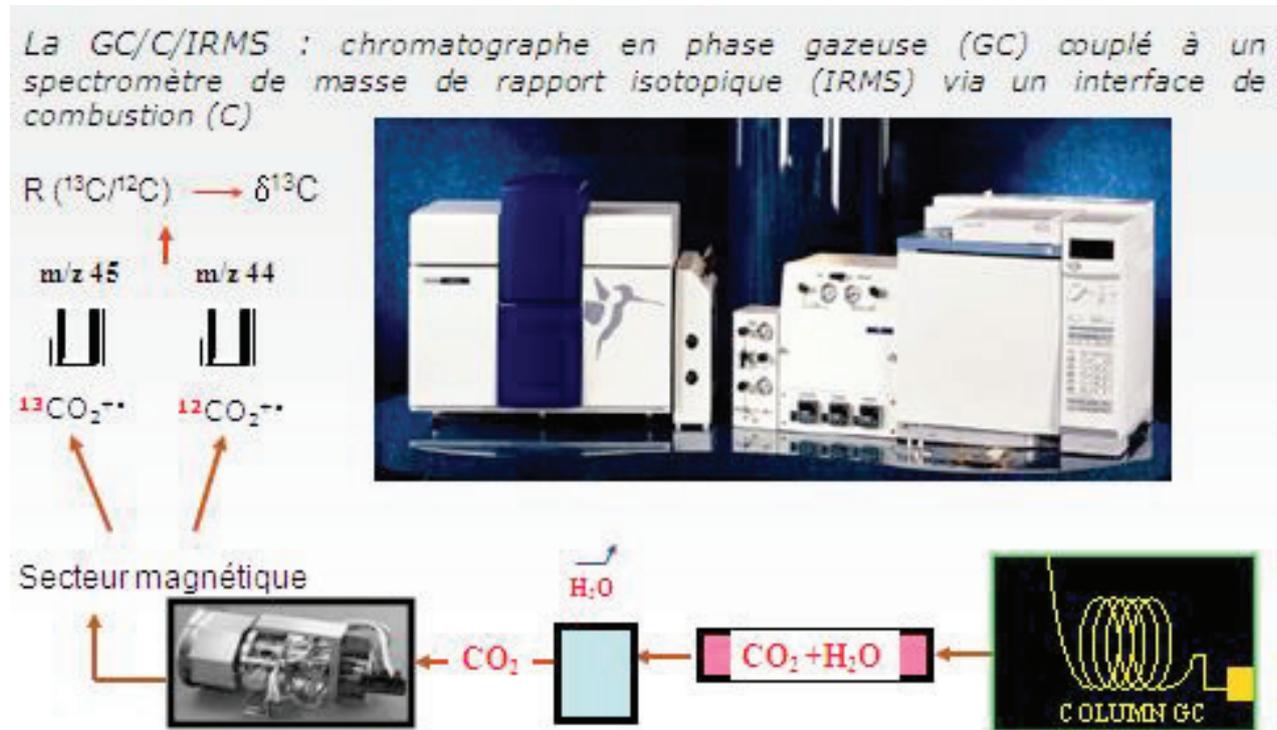


Figure 7 : principe de la GC/C/IRMS

14. Rappeler ce qu'on appelle un isotope.
15. Donner l'équation de la réaction de combustion de la testostérone.
16. En supposant cette réaction totale, quelle est la masse de  $\text{CO}_2$  obtenue par combustion de 100 mg de testostérone ?

L'analyse par GC-C-IRMS d'un échantillon d'urine d'un athlète a donné entre autres les résultats suivants<sup>11</sup> :

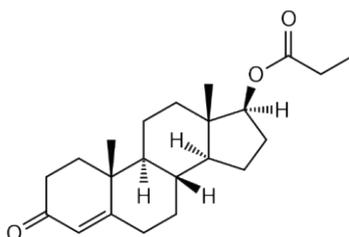
	Composés endogènes de référence (CER)	5Aen (métabolite de la testostérone)
$\delta^{13}\text{C}$ moyen	- 20,1 ‰	- 25,2 ‰

17. Donner le rapport isotopique moyen du CER de cet athlète.
18. Peut-on conclure à l'administration de testostérone exogène pour cet athlète ?

<sup>11</sup> Étude de l'influence de précurseurs de la testostérone sur l'excrétion et la signature isotopique de ses métabolites de phase II, Mémoire de Master, Marc-André Trudel, 2016

## A.5. Propriétés et synthèse d'un ester de testostérone

Le propionate de testostérone est un des esters synthétiques de la testostérone les plus répandus, découvert en 1936 et utilisé pour la première fois à des fins thérapeutiques en 1937. Il permet notamment de traiter l'hypogonadisme, qui correspond à un défaut de testostérone chez l'homme.



En dehors de son usage thérapeutique, le propionate de testostérone est un stéroïde anabolisant pouvant permettre d'accroître les performances physiques, et fait donc partie des composés recherchés lors d'un contrôle anti-dopage.

On donne les valeurs de solubilité dans l'eau à 25 °C des deux composés :

Testostérone : 23,4 mg/L

Propionate de testostérone : 1,48 mg/L<sup>12</sup>

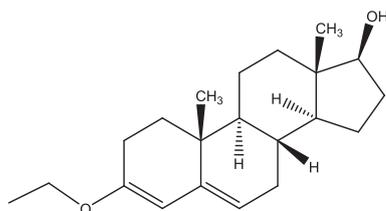
19. Expliquer la différence de valeur observée entre les deux composés.

Les pictogrammes de sécurité associés au propionate de testostérone sont les suivants :

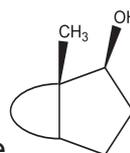


20. Donner la signification de ces pictogrammes.

Le propionate de testostérone peut être synthétisé par une réaction d'estérification. Une méthode de préparation a été par exemple décrite en 1953 par Ercoli et Ruggieri.<sup>13</sup> Les auteurs ont utilisé comme réactif de départ l'éthyléther d'énol de la testostérone :



(représenté sous la forme



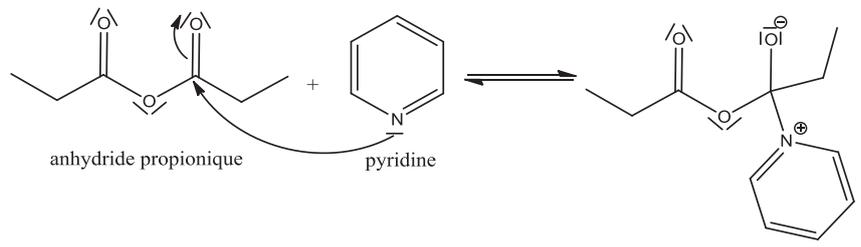
dans la suite)

<sup>12</sup> <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

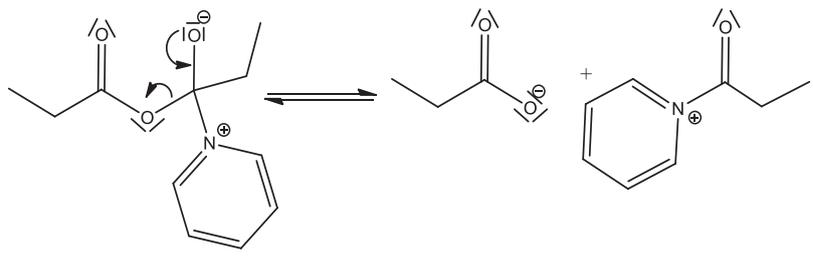
<sup>13</sup> An Improved Method of Preparing Testosterone, Dihydrotestosterone and Some of their Esters, Alberto Ercoli and Pietro de Ruggieri, *Journal of the American Chemical Society* **1953** 75 (3), 650-653

On fait réagir cette molécule avec l'anhydride propionique dans une solution de pyridine ; on donne le mécanisme suivant pour la réaction :

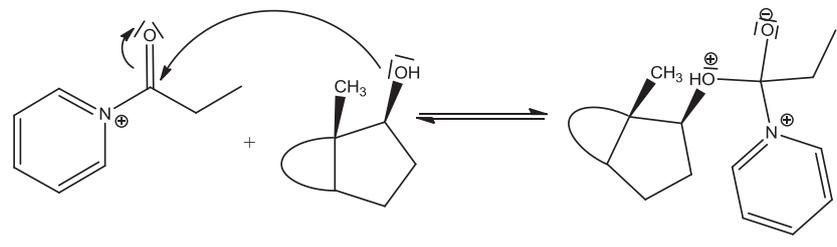
Etape 1



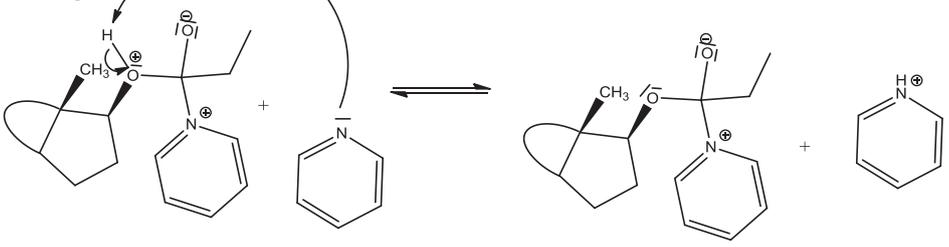
Etape 2



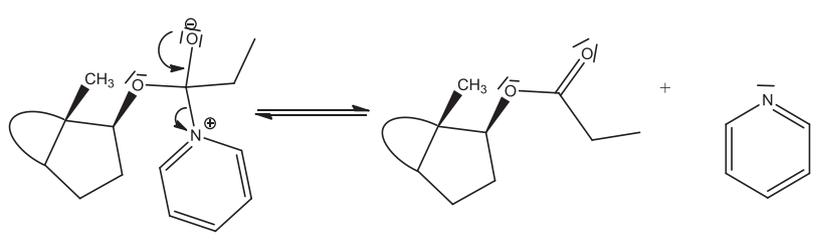
Etape 3



Etape 4



Etape 5



21. Identifier le site nucléophile et le site électrophile mis en jeu dans l'étape 1.
22. Pour chaque étape du mécanisme, identifier le type de réaction mis en jeu parmi la liste suivante : addition, élimination, substitution, réaction acido-basique.
23. Dans ce mécanisme, en plus de son rôle de base, la pyridine est qualifiée de catalyseur nucléophile. Expliquer.
24. Écrire l'équation de la réaction d'estérification dont le mécanisme est donné ci-dessus.

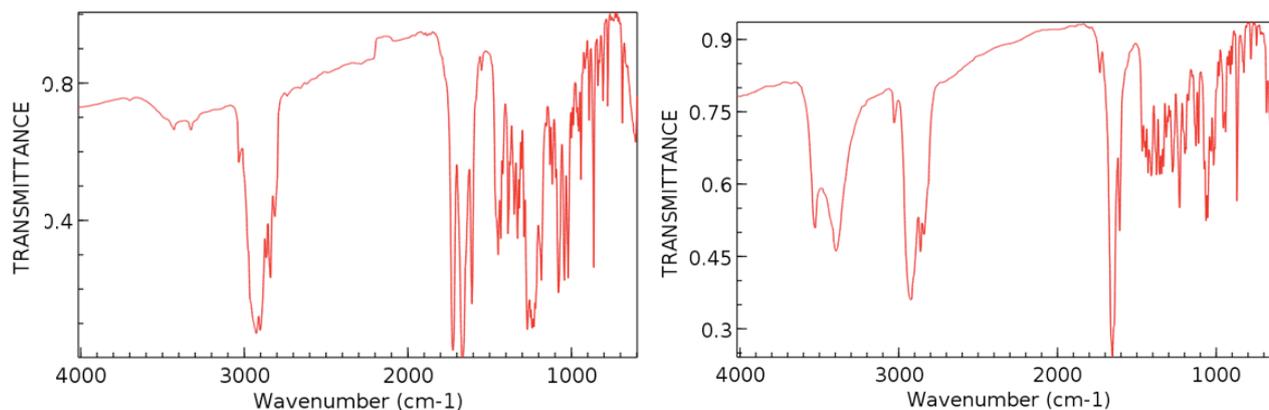
Une hydrolyse à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique dans l'acétone conduit ensuite au propionate de testostérone. Pour cette dernière étape, le protocole donné par les auteurs est le suivant :

*Une goutte d'acide chlorhydrique à 36 % a été ajoutée à une solution de 200 mg du produit d'estérification, dans 2 mL d'acétone, puis le mélange a été chauffé pendant 5 minutes dans un bain de vapeur. Une dilution à l'aide d'eau a conduit à 170 mg de cristaux de température de fusion 115-118 °C. Après recristallisation dans un mélange éther/éther de pétrole, la température de fusion est de 121 °C.*

25. Expliquer pourquoi l'ajout d'eau permet l'apparition de cristaux.
26. Proposer alors une méthode permettant d'isoler ces cristaux.
27. Décrire le principe et la mise en œuvre de la recristallisation, et justifier sa nécessité dans le protocole donné ci-dessus.

On donne ci-dessous deux spectres IR, l'un correspondant à la testostérone et l'autre au propionate de testostérone<sup>14</sup>.

28. Attribuer à chaque molécule son spectre en justifiant la réponse et en attribuant les principales bandes IR aux groupes fonctionnels correspondants.



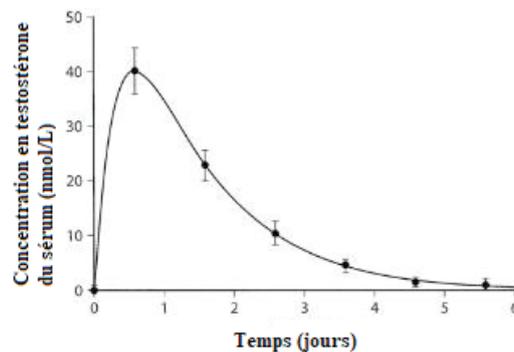
**Figure 8 : Spectres IR**

<sup>14</sup> NIST Chemistry WebBook (<https://webbook.nist.gov/chemistry>)

## A.6. Pharmacocinétique du propionate de testostérone

Le propionate de testostérone est l'ester de testostérone ayant le plus court temps de demi-vie  $t_{1/2}$  (temps nécessaire pour que la concentration de substance présente dans l'organisme soit divisée par deux).

Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la concentration moyenne en propionate de testostérone dans le sérum de sept personnes souffrant d'hypogonadisme, après injection d'une dose de composé.



**Figure 9 : pharmacocinétique du propionate de testostérone chez sept patients ; ronds : concentrations moyennes de testostérone mesurées dans le sérum ; courbe : meilleure modélisation du profil pharmacocinétique<sup>15</sup>**

L'élimination du propionate de testostérone peut être modélisée par une loi de décroissance exponentielle de la forme :

$$C(t) = C_0 e^{-kt}$$

où  $C(t)$  est la concentration à l'instant  $t$ ,  $C_0$  la concentration à l'instant  $t=0$  de la décroissance, c'est-à-dire la concentration maximale atteinte par le composé, et  $k$  est une constante.

29. D'après la définition de  $t_{1/2}$  donner l'expression de  $C(t_{1/2})$  en fonction de  $C_0$ .
30. Estimer la valeur du temps de demi-vie, noté  $t_{1/2}$ , du propionate de testostérone à partir du graphique de la **Figure 9**.
31. Estimer alors la valeur de  $k$  en précisant son unité.

---

<sup>15</sup> Behre, H., & Nieschlag, E. (2012). Testosterone preparations for clinical use in males. In S. Nieschlag (Author) & E. Nieschlag & H. Behre (Eds.), *Testosterone: Action, Deficiency, Substitution* (pp. 309-335). Cambridge : Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139003353.016

## B. Objectif Qatar 2022

À peine le Mondial russe de l'été 2018 terminé, le Qatar se projette déjà sur l'immense chantier de la prochaine Coupe du monde de football organisée sur son sol en 2022.

Afin de lutter contre les températures extrêmes de la région, le Qatar développe un système de climatisation dans les stades pour le confort des joueurs et du public. Ainsi, plus de 5 ans avant que la Coupe du Monde de la FIFA ne commence, le pays hôte du Qatar a terminé l'installation de sa technologie de refroidissement dans le Khalifa International Stadium à Doha (photo ci-contre).



### Document 6 – Khalifa International Stadium



Avec une capacité de 40 000 places, il s'agit du plus grand stade qatari. Réalisé par l'architecte français Roger Taillibert, il est aussi le stade principal de l'équipe du Qatar de football. L'enveloppe extérieure a été entièrement refaite, le bâtiment a été doté d'un toit membranaire de 44 000 m<sup>2</sup> rappelant les dunes de sable.

Capacité : 40 000 places

Surface du terrain : 7848 m<sup>2</sup>

Équipe : Équipe du Qatar de football

Propriétaire : Fédération du Qatar de football

## Document 7 – Cooling technology

Extrait de l'interview accordée par le Docteur Saud Abdul-Aziz au site goal.com :

The cooling technology in place at Khalifa International Stadium makes the venue the largest open-air stadium in the world to be cooled. By utilising district cooling, the stadium is cooled in a way which lowers energy consumption and keeps fans and players alike comfortable regardless of the temperatures outside.

District cooling means that the cooling technology is 40 per cent more sustainable than conventional techniques. We have an energy centre located one kilometer away from the stadium, from where chilled water<sup>16</sup> is brought in a pipeline to the venue. Once it arrives here we are pushing cold air on to the field of play and spectator seating areas.

We have designed the cooling technology at Khalifa International Stadium to be energy efficient, and fully compliant to the Supreme Committee standards in terms of field of play and spectator seating area temperatures to reach 26 degrees centigrade while the outside temperature is close to 40 degrees. On match day at the Emir Cup final on Friday, we were actually able to reduce the temperature to 20 degrees on the field of play, and a comfortable 23 degrees in the spectator areas.



**Dr. Saud Abdul-Aziz Abdul-Ghani, Professor at the College of Engineering at Qatar University**



**Cooling air nozzles**

<sup>16</sup> Chilled water : eau réfrigérée

## B.1. Principe

32. À l'aide du **document 7**, et en s'appuyant sur un schéma clair, décrire le principe de fonctionnement de la climatisation du stade Khalifa.

Nous nous intéressons dans un premier temps aux différents états de l'eau.

33. Remplir les cases de la **figure 10** fournie en annexe représentant le diagramme  $(P, T)$  de l'eau.

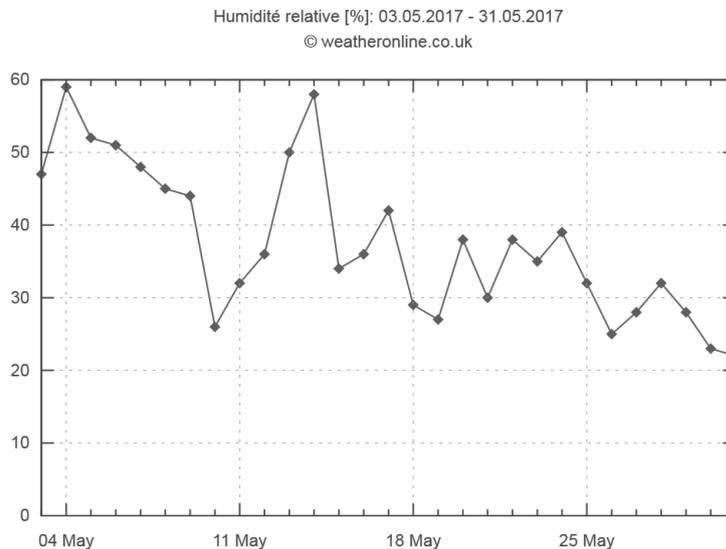
34. Sur cette figure, quel nom donne-t-on au point  $T_r$  ? Que peut-on dire de l'état de l'eau en ce point ?

35. Quel nom donne-t-on au point C ? Que se passe-t-il à partir du point C ?

36. Décrire en quelques mots les phénomènes d'évaporation et de condensation.

### Document 8 – Humidité relative à Doha au Qatar

Le graphe suivant donne l'humidité relative de la ville de Doha au Qatar pour le mois de mai 2017 :



Hygrométrie dans la ville de Doha (Mai 2017)

Source : weatheronline.co.uk

On rappelle que l'humidité relative, aussi appelée degré hygrométrique, est donnée par la formule suivante :

$$H_R = 100 \times \frac{P_{eau}}{P_{vs}(T)} \text{ exprimé en \%}$$

avec  $P_{eau}$  pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air

$P_{vs}(T)$  pression de vapeur saturante à la température  $T$

D'après le document 7, l'air ambiant se trouve à  $T_{al} = 40\text{ °C}$  avant climatisation et à  $T_{aF,sol} = 20\text{ °C}$  au niveau du terrain après climatisation.

37. En s'appuyant sur les documents précédents, déterminer s'il y a un risque de condensation de la vapeur d'eau dans les gradins et sur la pelouse du stade de la finale de la coupe de l'Emir le vendredi 19 mai 2017. Cette question doit s'inscrire dans une démarche de résolution de problème, on fera apparaître clairement les hypothèses faites ainsi que la démarche de résolution. On pourra s'aider de la **figure 11** donnant quelques valeurs exactes du diagramme ( $P, T$ ) de l'eau.

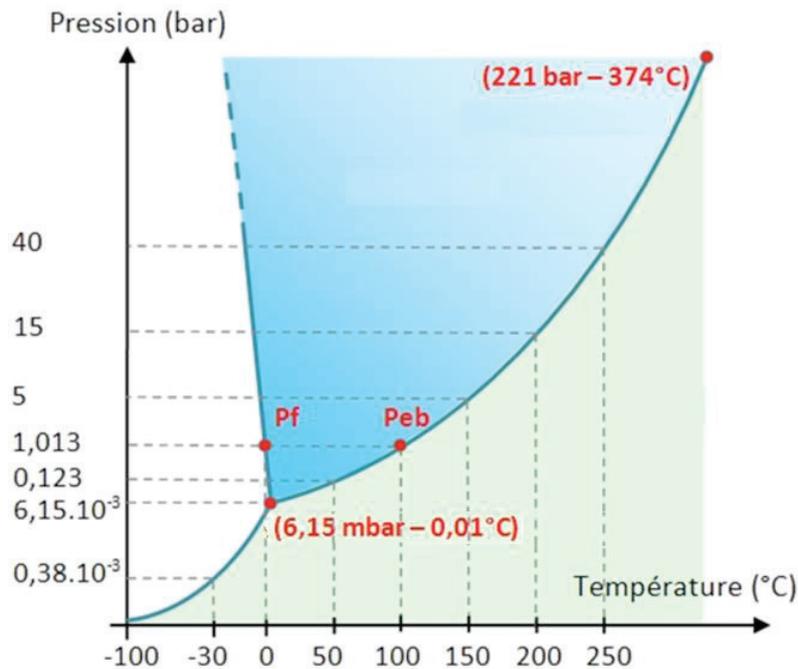


Figure 11 : Courbe ( $P, T$ ) de l'eau

## B.2. Structure du stade

38. La surface au sol du stade correspond à la somme de celle du terrain et de sa toiture qui ne couvre que les gradins. En modélisant la surface du stade et du terrain par deux disques concentriques, **figure 12**, déterminer les valeurs des rayons  $R_1$  et  $R_2$  à l'aide des données du **document 6**.

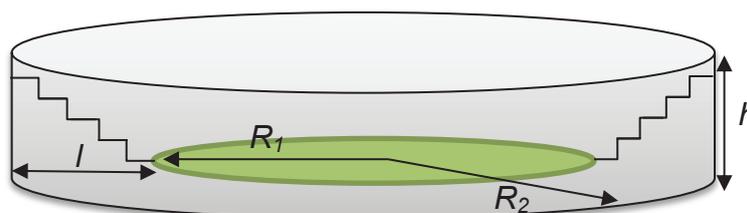
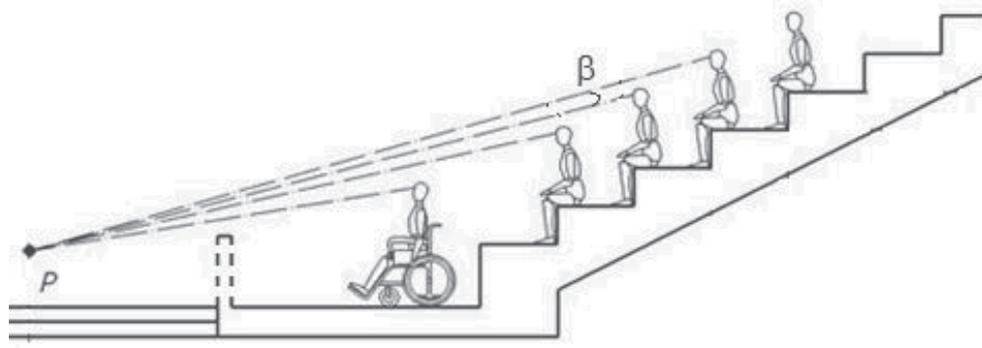


Figure 12 : Schéma du Khalifa stadium

39. Déterminer la surface moyenne occupée par chaque spectateur dans les gradins.  
 40. En assimilant chaque place à un carré, montrer alors le nombre de sièges présents sur une longueur au sol ( $l = R_2 - R_1$ , **figure 12**) et donc le nombre de gradins dans le stade est de l'ordre de 75.

Soit  $P$  un point observé par les spectateurs sur le terrain (**figure 13**). Pour leur confort visuel, la tribune doit respecter un écart angulaire  $\beta$  minimal entre les lignes de visibilité : celui-ci ne doit pas être inférieur à  $\beta_{\min} = 10'$  quelle que soit la position du point  $P$  sur le terrain.



**Figure 13 : Coupe d'un gradin (non à l'échelle et non représentative du vrai nombre de siège)**

On rappelle que  $1^\circ = 60'$  (minutes d'arc)

41. Après avoir identifié la position du point  $P$  sur le terrain pour laquelle  $\beta$  est minimal, montrer que la condition de confort visuel impose au Khalifa International Stadium une hauteur totale de l'ordre d'une quarantaine de mètres.

**On prendra par la suite :**  $h = 40$  m.

42. Montrer que le volume d'air  $V$  à l'intérieur du stade est d'environ  $2,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

On donne pour l'air les données suivantes :

- Masse volumique  $\rho_a = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$
- Capacité thermique massique  $c_a = 1,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

On prendra pour température initiale de l'air  $T_{ai} = 40^\circ\text{C}$  et pour température finale  $T_{af} = 26^\circ\text{C}$ .

43. Calculer le transfert thermique  $Q$  positif qui a été prélevé à l'air pour climatiser le stade.  
 44. Sachant que le système est mis en route deux heures avant le début d'un match, déterminer la valeur de la puissance thermique  $P$  supposée constante qui a été nécessaire pour climatiser le stade.

Par la suite nous prendrons cette puissance égale à  $P = 5,0 \text{ MW}$ .

45. Montrer que la puissance thermique précédemment calculée s'écrit :

$$P = D_a c_a (T_{al} - T_{aF})$$

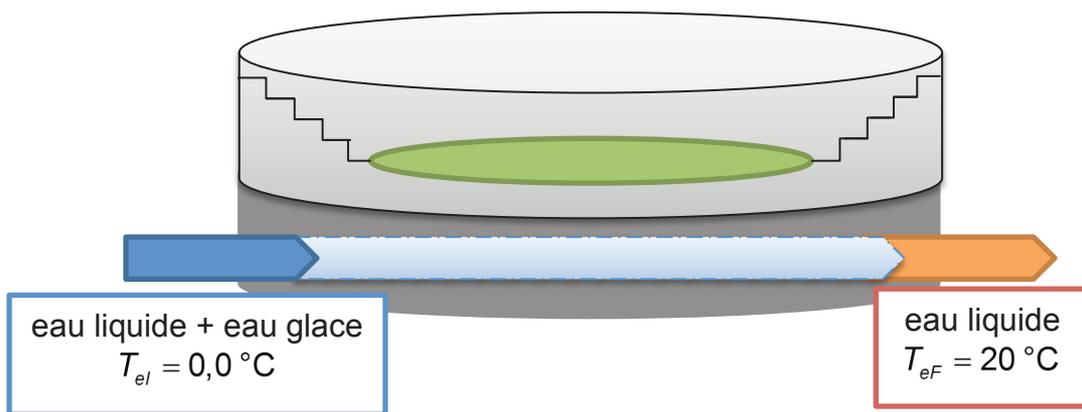
où  $D_a$  est le débit massique de l'air dans les buses de refroidissement (**document 7**)

On rappelle que le débit massique d'un fluide de masse volumique  $\rho$  parcourant à la vitesse  $v$  une canalisation de section normale  $S$  s'écrit :  $D_m = \rho S v$ .

46. Évaluer à l'aide de la photo du **document 7** la dimension de chaque buse. Sachant que pour le confort des spectateurs et des joueurs, l'air doit sortir des buses à une vitesse  $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$ , estimer le nombre de buses nécessaires pour climatiser tout le stade.

47. En réalité le stade compte 500 buses d'air. Expliquer une telle différence avec le résultat précédent.

Pour prélever une telle puissance thermique au stade, un mélange d'eau liquide et d'eau glace de fraction massique  $x_g$  arrive par les canalisations souterraines avec la température  $T_{el} = 0,0 \text{ °C}$  et en ressort sous forme entièrement liquide à la température  $T_{eF} = 20 \text{ °C}$  (**figure 14**)



**Figure 14 : Passage de l'eau de refroidissement sous le stade**

On rappelle qu'une fraction massique est donnée par  $x_g = \frac{m_g}{m_t}$ ,  $m_g$  étant la masse de glace contenue dans une masse totale  $m_t$ .

On donne pour l'eau :

- sa chaleur latente de fusion :  $\ell_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- sa capacité thermique massique pour l'état liquide :  $c_e = 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

48. Montrer que le débit massique  $D_e$  de l'eau glacée nécessaire pour extraire la puissance  $P$  du stade est donné par la relation :

$$D_e = \frac{P}{x_g \ell_f + c_e (T_{eF} - T_{el})}$$

49. Calculer ce débit en prenant une puissance  $P = 5,0 \text{ MW}$  et une fraction massique  $x_g = 0,50$ . Commenter. Le mélange d'eau glacée doit-il être plus riche ou plus pauvre en glace pour réduire le débit ?
50. Évaluer l'ordre de grandeur du rayon de la canalisation pour évacuer le débit  $D_e$  déterminé précédemment avec une vitesse d'écoulement de  $10 \text{ m.s}^{-1}$ . Commenter.

### B.3. Usine de production de glace

Pour produire de la glace, le Qatar a fait appel à un géant de la production de froid : le groupe japonais DAIKIN.

#### Document 8 – Groupe de production d'eau froide DAIKIN

C'est en Italie, dans la grande banlieue de Rome, que Daikin France produit les dix-huit imposants systèmes de 21 MW destinés au Qatar pour la climatisation des stades du Mondial de football en 2022. « Un des plus gros groupes froids au monde, précise Antonio Ariemma, Area Manager Europe ».

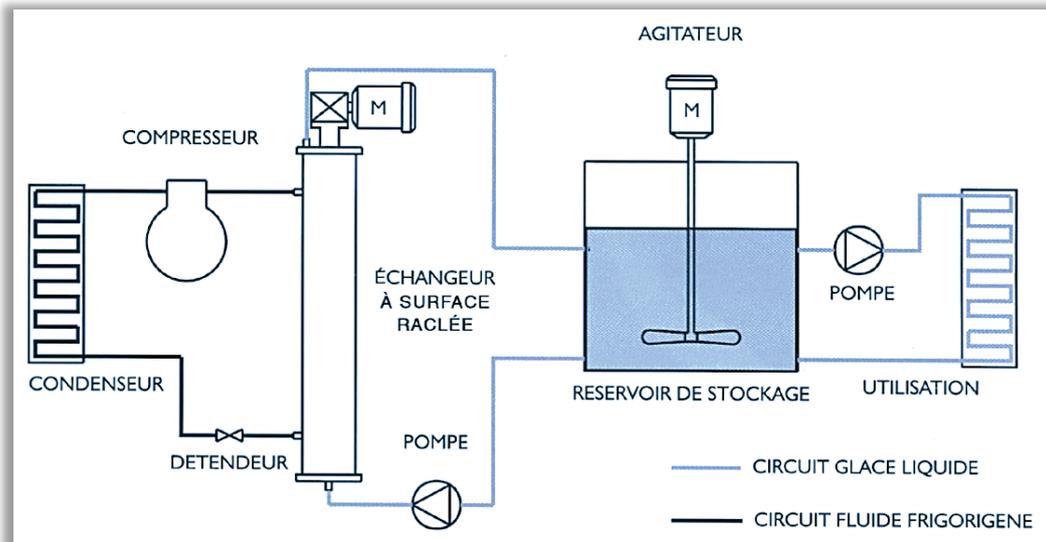


#### Groupe de production de glace liquide

Ces groupes ont un coefficient de performance pouvant aller jusqu'à 6,0.

Source : [www.daikin.fr](http://www.daikin.fr)

Le principe est le suivant : pour refroidir l'eau du circuit secondaire (en bleu sur la **figure 15**), le groupe utilise un fluide frigorigène à faible impact écologique, le difluorométhane appelé aussi HFC-32 ou R-32, qui parcourt un circuit primaire (en noir sur la **figure 15**). Ce fluide effectue en continu des transferts énergétiques entre le condenseur et l'évaporateur, ce dernier étant en contact avec l'eau à refroidir dans l'échangeur. Un mélange d'eau liquide et d'eau glace est alors produit dans le circuit secondaire, mélange appelé glace liquide.



**Figure 15 : Principe de production de glace liquide**

51. Où est situé l'évaporateur dans le schéma précédent ? Qui s'y évapore, l'eau ou le R-32 ?
52. Rappeler la définition du coefficient de performance pour une machine frigorifique.
53. D'après les données, quelle est la puissance thermique  $P_{th}$  qui sera extraite à l'eau au niveau de l'échangeur ?
54. Cette puissance  $P_{th}$  est nettement supérieure à la puissance  $P$  déterminée à la question 44. Expliquer une telle différence.

## B.4. Qatar et développement durable

Toujours dans le cadre de ces ambitions écologiques et environnementales, le Qatar compte alimenter ses groupes froids et ses stades à l'aide de panneaux solaires implantés dans une ferme solaire externe. Selon le design spécifique de certains stades, il est possible que les panneaux photovoltaïques soient même directement installés sur le toit.



**Photo d'une ferme solaire implantée au Qatar**

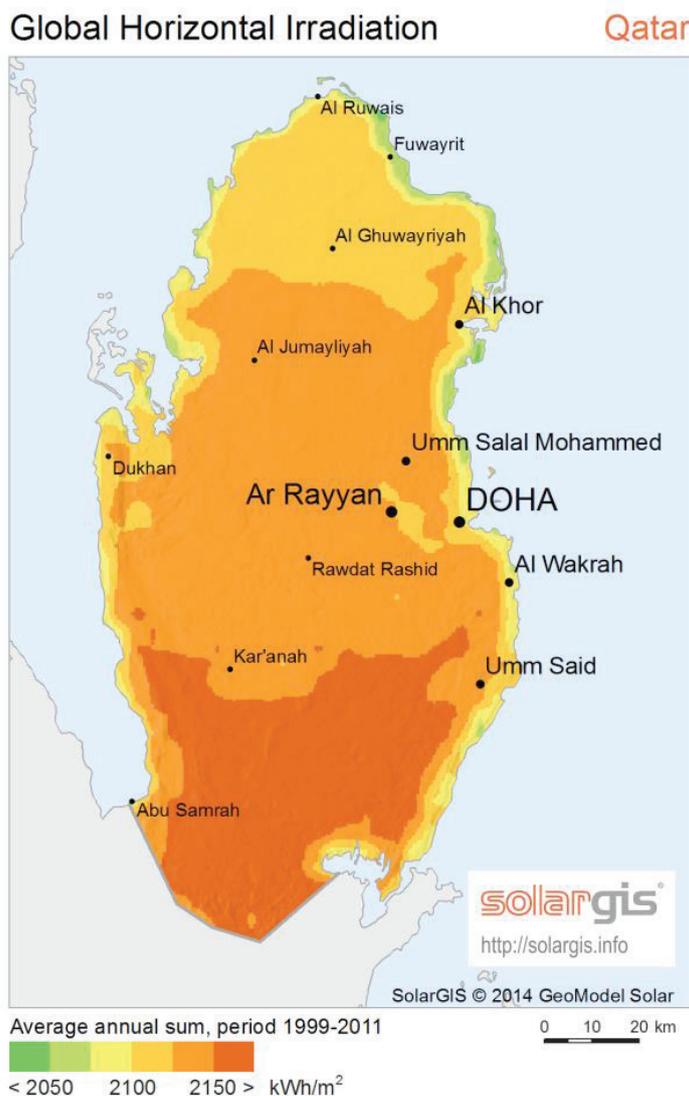
On s'intéresse à un système type panneaux photovoltaïques classiques de rendement photovoltaïque  $\eta = 17\%$ . Nous ferons abstraction de tout système de stockage de l'énergie produite.

55. Définir le rendement d'un panneau photovoltaïque.
56. À l'aide du **document 9**, évaluer quelle devrait être la surface totale des panneaux solaires qui alimenteraient le groupe froid DAIKIN pour climatiser le Khalifa International

Stadium sachant que l'ensoleillement moyen à Doha est de 9,3 h par jour. Commenter la valeur obtenue.

57. En partant du soleil et du stade, représenter une chaîne énergétique qui permet de modéliser l'ensemble des échanges énergétiques qui interviennent dans l'étude du stade de Doha. On fera clairement apparaître les différentes formes d'énergie, les convertisseurs et les réservoirs.

### Document 9 – Irradiation moyenne annuelle au Qatar



**Energie solaire moyenne annuelle reçue par m<sup>2</sup> au Qatar exprimée en kWh/m<sup>2</sup>**

Source : <http://solargis.info>

**FIN DE L'ÉPREUVE**



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

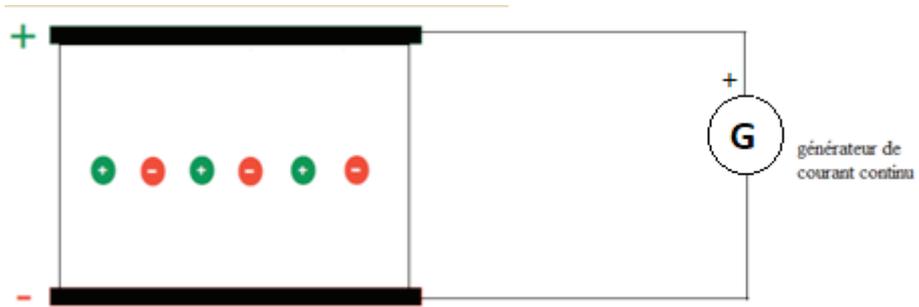


Figure 4 : Schéma simplifié d'une électrophorèse

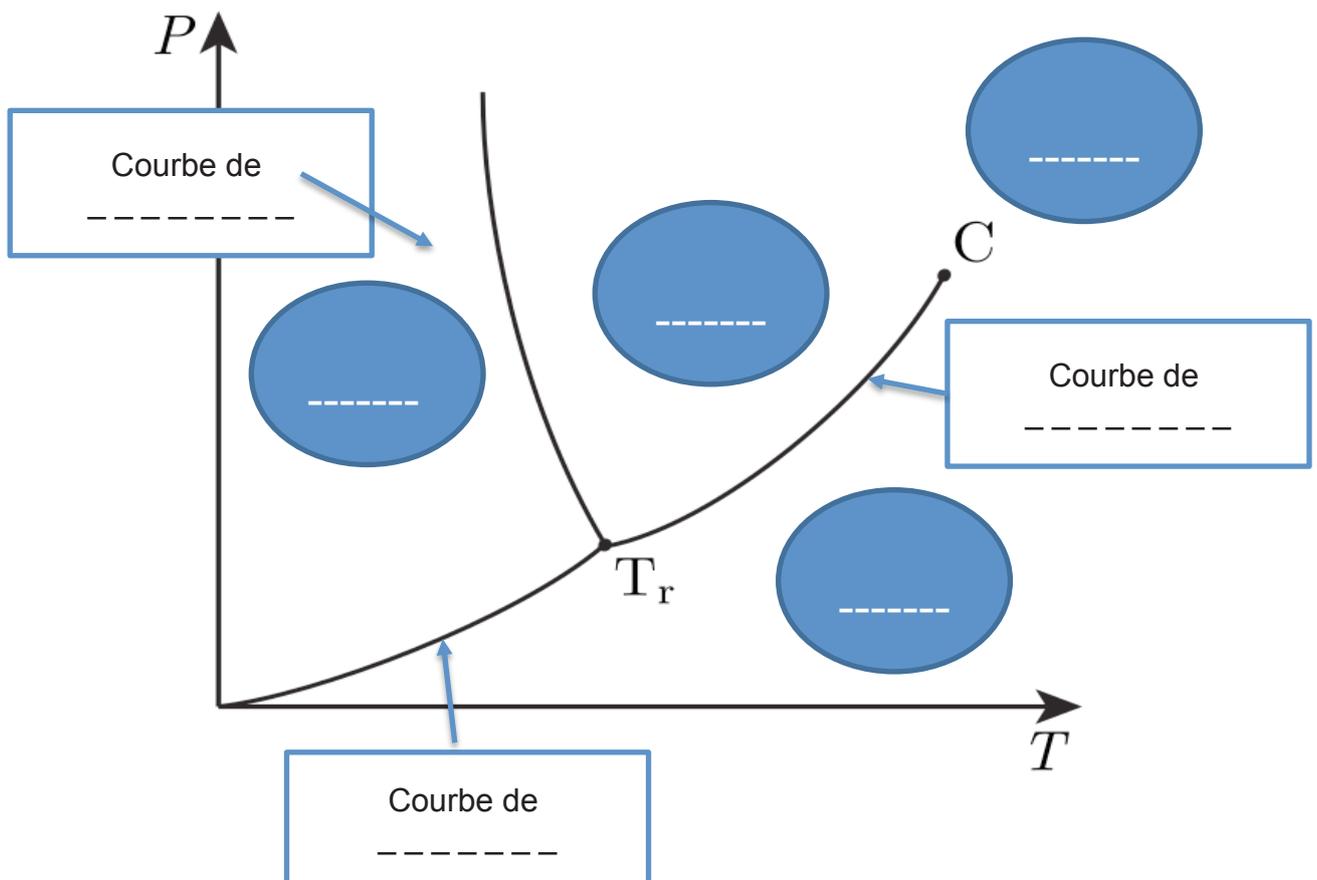


Figure 10 : Diagramme  $(P, T)$  de l'eau

