CORRIGÉ NON OFFICIEL

# BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique

E5.1 - Analyse physico-chimique d'un procédé et de son environnement

**Session 2026**

Proposition de corrigé rédigée par FormaV pour s'entraîner. Ce n'est pas le corrigé officiel de l'examen et elle ne remplace pas les éléments de correction officiels.

Ce document a été mis en ligne par l'organisme FormaV®.

Toute reproduction, représentation ou diffusion, même partielle, sans autorisation préalable, est strictement interdite.

Pour consulter tous nos sujets d'annales et corrigés du BTS CIRA, veuillez visiter :
btscira.fr/annales-sujets-et-corriges

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR – CONTRÔLE INDUSTRIEL ET RÉGULATION AUTOMATIQUE**

**U51 – Analyse physico-chimique d'un procédé et de son environnement**

**Session 2026**

# PROPOSITION DE CORRIGÉ

*Proposition de corrigé établie par FormaV à partir du sujet, non officielle. Elle ne préjuge pas des consignes nationales de correction données aux jurys.*

## PARTIE A – PUISSANCE DE LA POMPE DU CIRCUIT PRIMAIRE — 14 points

### Question 1

*Déterminer la vitesse de l'eau, notée v, dans le circuit branche froide.*

Le débit volumique est égal au produit de la vitesse par la section de la conduite : $Q_V = v \times S$, avec $S = \dfrac{\pi D^2}{4}$.

$$S = \frac{\pi \times (0{,}698)^2}{4} = 0{,}383 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q_V}{S} = \frac{6{,}0}{0{,}383} \approx 15{,}7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Question 2

*Calculer le nombre de Reynolds Re et en déduire le coefficient de perte de charge régulière λ.*

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\eta} = \frac{740 \times 15{,}7 \times 0{,}698}{8{,}8 \times 10^{-5}} \approx 9{,}2 \times 10^{7}$$

Comme $Re > 10^5$, l'écoulement est turbulent rugueux. Le coefficient est donc indépendant de Re : $\lambda = 3{,}5 \times 10^{-2}$.

### Question 3

*En déduire la valeur des pertes de charge $\Delta p_c$ occasionnées dans le circuit branche froide.*

Le schéma de la branche froide (de la sortie du GV à l'entrée du réacteur) comporte quatre coudes (angles en haut à droite, en bas à droite, en bas à gauche et en haut à gauche), donc $\sum L_{éq} = 4 \times 1{,}0 = 4{,}0$ m, soit $L + \sum L_{éq} = 11{,}0 + 4{,}0 = 15{,}0$ m.

$$\Delta p_c = \frac{\lambda \times \rho \times v^2 \times (L + \sum L_{éq})}{2 \times D} = \frac{3{,}5 \times 10^{-2} \times 740 \times 15{,}7^2 \times 15{,}0}{2 \times 0{,}698}$$

$$\Delta p_c \approx 6{,}9 \times 10^{4} \text{ Pa} \approx 0{,}69 \text{ bar}$$

## Question 4

*Déterminer la puissance utile hydraulique $P_{hydraulique}$ transmise au fluide par la pompe.*

Tous les points du circuit sont à la même altitude, et la vitesse est la même dans la branche froide (conduite de section constante). Le bilan de pression entre la sortie du GV et l'entrée du réacteur s'écrit :

$$p_{sortie\ GV} + \Delta p_{pompe} - \Delta p_c = p_{entrée\ réacteur}$$

La pompe doit donc compenser les pertes de charge et fournir la différence de pression entre l'entrée du réacteur et la sortie du GV :

$$\Delta p_{pompe} = (162 - 153) \times 10^5 + 0{,}69 \times 10^5 \approx 9{,}7 \times 10^5\ \text{Pa}$$

$$P_{hydraulique} = \Delta p_{pompe} \times Q_V = 9{,}7 \times 10^5 \times 6{,}0 \approx 5{,}8 \times 10^6\ \text{W} = 5{,}8\ \text{MW}$$

La valeur obtenue, 5,8 MW, est cohérente avec celle donnée à la question 7.

## Question 5

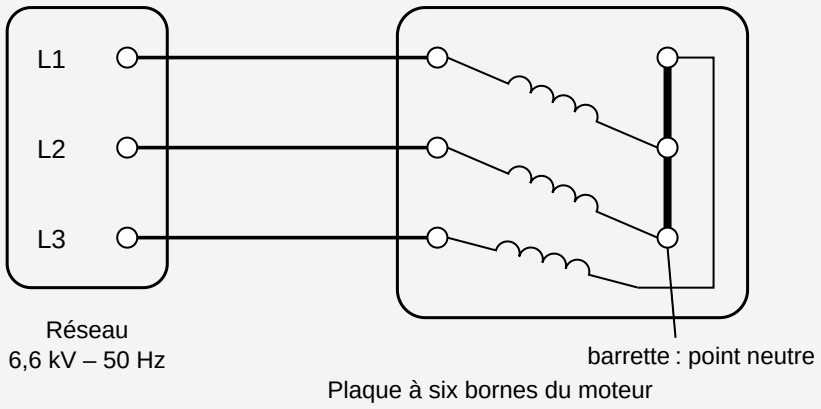
*En justifiant la réponse, préciser le couplage du moteur au réseau.*

La plaque signalétique indique 3800 V – 6600 V : 3800 V est la tension maximale supportable par un enroulement, et 6600 V la tension entre phases correspondante en couplage étoile. Le réseau triphasé est à 6,6 kV entre phases. Chaque enroulement ne doit recevoir que $\frac{6600}{\sqrt{3}} \approx 3810\ \text{V} \approx 3800\ \text{V}$. Le moteur doit donc être couplé en **étoile**.

## Question 6

*Compléter, sur le document réponse 1, le couplage du moteur au réseau.*

Couplage étoile : les trois bornes de gauche (débuts d'enroulements) sont reliées respectivement à L1, L2 et L3. Les trois bornes de droite (fins d'enroulements) sont reliées entre elles par une barrette qui forme le point neutre.




*Couplage étoile des enroulements du moteur sur le réseau 6,6 kV – 50 Hz*

Sur le document réponse 1, relier L1, L2 et L3 aux trois bornes de gauche de la plaque, et relier entre elles par une barrette verticale les trois bornes de droite (point neutre).

### Question 7

*Déterminer le rendement $r_{pompe}$ de la pompe pour un fonctionnement nominal du moteur.*

En fonctionnement nominal, la puissance mécanique utile fournie par le moteur à la pompe est la puissance indiquée sur la plaque : 10 MW.

$$r_{pompe} = \frac{P_{hydraulique}}{P_{utile\ moteur}} = \frac{5{,}8}{10} = 0{,}58 = 58\ \%$$

### Question 8

*En déduire le rendement $r_{total}$ de l'ensemble (moteur + pompe).*

Les rendements des éléments en série se multiplient :

$$r_{total} = r_{moteur} \times r_{pompe} = 0{,}94 \times 0{,}58 \approx 0{,}55 = 55\ \%$$

## PARTIE B – ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DES CHAUFFERETTES DU PRESSURISEUR — 5 points

### Question 9

*Justifier, à partir du graphe précédent, que le courant étudié est bien alternatif.*

Le spectre ne présente aucune raie au rang 0 : l'amplitude de la composante continue est nulle, donc la valeur moyenne du courant est nulle. Le courant est bien alternatif. Le spectre ne comporte que des harmoniques de rang impair, avec un fondamental de 67,3 A.

### Question 10

*En expliquant la démarche utilisée, compléter le document réponse 2 avec les fréquences et les valeurs efficaces des harmoniques.*

La fréquence de l'harmonique de rang n vaut $f_n = n \times f = n \times 50\ \mathrm{Hz}$. Le graphe donne les amplitudes (valeurs maximales) ; pour un signal sinusoïdal, la valeur efficace vaut $I_n = \dfrac{\hat{I}_n}{\sqrt{2}}$.

| **Rang** | **1** | **3** | **5** | **7** | **9** |
|---|---|---|---|---|---|
| Fréquence (en Hz) | 50 | 150 | 250 | 350 | 450 |
| Amplitude lue (en A) | 67,3 | 25,8 | 11,4 | 7,3 | 6,8 |
| Valeur efficace (en A) | 47,6 | 18,2 | 8,1 | 5,2 | 4,8 |

### Question 11

*Calculer le THD du courant circulant dans une chaufferette pour les neuf premiers harmoniques.*

Les harmoniques de rang pair sont nuls. Le rapport étant homogène, le calcul peut se faire avec les amplitudes (le facteur $\sqrt{2}$ se simplifie) :

$$THD = \frac{\sqrt{25{,}8^2 + 11{,}4^2 + 7{,}3^2 + 6{,}8^2}}{67{,}3} = \frac{\sqrt{895{,}1}}{67{,}3} = \frac{29{,}9}{67{,}3} \approx 0{,}44 = 44\ \%$$

### Question 12

*Pour une période de fonctionnement du gradateur de 20 secondes, déterminer la valeur à donner à $t_{ON}$.*

On a $U_{grad} = \sqrt{\dfrac{t_{ON}}{T_{grad}}} \times U$, d'où $t_{ON} = T_{grad} \times \left(\dfrac{U_{grad}}{U}\right)^2$.

$$t_{ON} = 20 \times \left(\frac{317}{400}\right)^2 = 20 \times 0{,}628 \approx 12{,}6\ \text{s}$$

Le gradateur doit donc conduire pendant environ 12,6 s sur chaque période de 20 s (rapport cyclique de 0,63).

## PARTIE C – MASSE DE COMBUSTIBLE — 10 points

### Question 13

*Montrer que le nombre « a » de neutrons produit lors de cette réaction de fission est égal à 3.*

Lors d'une réaction nucléaire, le nombre de charge (nombre de protons) et le nombre de nucléons se conservent.

Charge : $92 + 0 = 57 + 35 + a \times 0$, soit 92 = 92 : la relation est vérifiée.

Nucléons : $235 + 1 = 148 + 85 + a \times 1$, soit $236 = 233 + a$, donc $a = 3$.

### Question 14

*Déterminer la valeur de l'énergie libérée |ΔE| par la fission d'un noyau d'uranium.*

Masse des réactifs : $235{,}044 + 1{,}0087 = 236{,}0527\ \text{u}$.

Masse des produits : $147{,}932 + 84{,}916 + 3 \times 1{,}0087 = 235{,}8741\ \text{u}$.

Défaut de masse : $|\Delta m| = 236{,}0527 - 235{,}8741 = 0{,}1786\ \text{u} = 0{,}1786 \times 1{,}6605 \times 10^{-27} = 2{,}966 \times 10^{-28}\ \text{kg}$.

$$|\Delta E| = |\Delta m| \times c^2 = 2{,}966 \times 10^{-28} \times (2{,}998 \times 10^8)^2 \approx 2{,}67 \times 10^{-11}\ \text{J}$$

### Question 15

*Sachant que le réacteur libère une puissance P = 3000 MW, déterminer la masse d'uranium nécessaire pour faire fonctionner le réacteur à cette puissance pendant 1 an.*

Énergie à libérer en un an (365 jours) :

$$E = P \times t = 3000 \times 10^{6} \times 365 \times 24 \times 3600 = 3{,}000 \times 10^{9} \times 3{,}154 \times 10^{7} \approx 9{,}46 \times 10^{16}\ \text{J}$$

Nombre de noyaux d'uranium 235 à fissionner :

$$N = \frac{E}{2{,}666 \times 10^{-11}} = \frac{9{,}46 \times 10^{16}}{2{,}666 \times 10^{-11}} \approx 3{,}55 \times 10^{27}$$

Masse d'un noyau : $m_U = 235{,}044 \times 1{,}6605 \times 10^{-27} = 3{,}903 \times 10^{-25}\ \text{kg}$.

$$m = N \times m_U = 3{,}55 \times 10^{27} \times 3{,}903 \times 10^{-25} \approx 1{,}4 \times 10^{3}\ \text{kg}$$

Il faut environ 1,4 tonne d'uranium 235 pour faire fonctionner le réacteur pendant un an.

### Question 16

*Écrire l'équation de la réaction de combustion complète du méthane dans le dioxygène (réactifs et produits à l'état gazeux).*

$$\mathrm{CH_{4\,(g)}} + 2\ \mathrm{O_{2\,(g)}} \longrightarrow \mathrm{CO_{2\,(g)}} + 2\ \mathrm{H_2O_{(g)}}$$

### Question 17

*Calculer l'énergie produite par la combustion d'un kilogramme de méthane.*

Quantité de matière dans 1 kg : $n = \dfrac{m}{M} = \dfrac{1000}{16{,}0} = 62{,}5\ \text{mol}$.

$$E = n \times 890 = 62{,}5 \times 890 = 5{,}56 \times 10^{4}\ \text{kJ} = 5{,}56 \times 10^{7}\ \text{J}$$

### Question 18

*En déduire la masse de méthane qui permettrait de produire, par combustion, la même quantité d'énergie que celle dégagée par la fission de l'uranium pendant une année, soit environ $10^{17}$ J.*

$$m_{CH_4} = \frac{10^{17}}{5{,}56 \times 10^{7}} \approx 1{,}8 \times 10^{9}\ \text{kg}$$

Il faudrait environ 1,8 million de tonnes de méthane, soit un rapport voisin de $10^{6}$ avec la masse d'uranium de la question 15 (environ 1,4×10$^{3}$ kg). La fission libère par unité de masse un million de fois plus d'énergie que la combustion.

## PARTIE D – MESURE DE LA PRESSION DU CIRCUIT PRIMAIRE — 11 points

### Question 19

*En justifiant la réponse, préciser le régime de fonctionnement de l'ADI.*

La sortie de l'ADI est reliée à son entrée inverseuse (borne −) par la résistance R : il y a une contre-réaction sur l'entrée inverseuse. Le montage est stable et l'ADI fonctionne en **régime linéaire**. La tension différentielle d'entrée est alors nulle : $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$.

### Question 20

*En expliquant clairement le raisonnement suivi, exprimer la tension $V_S$ en fonction de I. Montrer alors que $V_S$ a une valeur comprise entre 2 et 10 V.*

L'ADI étant parfait et en régime linéaire, $V_- = V_+$. L'entrée non inverseuse est reliée à la masse, donc $V_- = 0$ V. Les courants d'entrée de l'ADI sont nuls : le courant I de la boucle 4–20 mA traverse donc intégralement la résistance R, entre le nœud d'entrée (à 0 V) et la sortie.

Le courant I, orienté sur le schéma du capteur vers l'entrée inverseuse, traverse R du nœud (à 0 V) vers la sortie de l'ADI : $V_- - V_{sortie} = R \times I$, soit $V_{sortie} = -R \times I$.

La flèche de $V_S$ est orientée de la sortie vers la masse (pointe côté masse), donc $V_S = V_{masse} - V_{sortie} = 0 - (-R \times I)$, d'où $V_S = R \times I$.

Application numérique avec $R = 500\ \Omega$ et $4\ \text{mA} \leq I \leq 20\ \text{mA}$ :

$$V_{S,min} = 500 \times 4 \times 10^{-3} = 2\ \text{V} \qquad V_{S,max} = 500 \times 20 \times 10^{-3} = 10\ \text{V}$$

Donc $2\ \text{V} \leq V_S \leq 10\ \text{V}$.

### Question 21

*Dans ces conditions, déterminer la valeur de la tension $V_S$ puis la valeur numérique $N_{10}$ délivrée par le CAN.*

Le capteur est linéaire : 101 bar correspond à 4 mA et 181 bar à 20 mA.

$$I = 4 + 16 \times \frac{155 - 101}{181 - 101} = 4 + 16 \times 0{,}675 = 14{,}8\ \text{mA}$$

$$V_S = R \times I = 500 \times 14{,}8 \times 10^{-3} = 7{,}4\ \text{V}$$

Le CAN a une entrée 0 – 10 V et convertit sur 12 bits, soit $2^{12} = 4096$ valeurs. Son quantum est $q = \dfrac{10}{4096} = 2{,}44\ \text{mV}$.

$$N_{10} = \frac{V_S}{q} = \frac{7{,}4}{10} \times 4096 \approx 3031$$

### Question 22

*Montrer que ce CAN permet de conserver la précision de mesure du capteur.*

Le capteur couvre 80 bar (de 101 à 181 bar), ce qui correspond à une variation de $V_S$ de 8 V (de 2 à 10 V). La sensibilité de la chaîne en amont du CAN est donc $s = \dfrac{8}{80} = 0{,}1\ \text{V} \cdot \text{bar}^{-1}$, soit 10 bar par volt.

Le quantum du CAN est $q = \dfrac{10}{2^{12}} = 2{,}44 \times 10^{-3}\ \text{V}$. Il correspond à une variation de pression de :

$$\Delta p_{CAN} = 2{,}44 \times 10^{-3} \times 10 \approx 0{,}024\ \text{bar}$$

Ce pas de 0,024 bar est inférieur à la précision du capteur (0,1 bar) : la conversion n'ajoute pas d'erreur significative et la précision de mesure du capteur est conservée.

Vérification équivalente : pour distinguer 0,1 bar sur 80 bar, il faut au moins $\dfrac{80}{0{,}1} = 800$ niveaux. Or le CAN en offre environ $\dfrac{8}{2{,}44 \times 10^{-3}} \approx 3280$ sur la plage utile de 2 à 10 V, ce qui est suffisant (10 bits donneraient déjà 1024 niveaux sur la pleine échelle, mais seulement environ 820 niveaux sur la plage utile : 12 bits laissent une marge confortable).

## PARTIE E – PUISSANCE CÉDÉE PAR LA VAPEUR À LA TURBINE — 7 points

### Question 23

*Placer sur le diagramme enthalpique du document réponse 3 les points B, C, D correspondant aux états B, C, D de l'eau.*

Construction : une détente isentropique est une verticale du diagramme (entropie constante). Un échauffement isobare suit l'isobare.

- A : vapeur saturante sèche à 71 bar, sur la courbe de rosée : $h_A \approx 2770\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $s_A \approx 5810\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- B : verticale issue de A jusqu'à l'isobare 10 bar, dans le domaine liquide + vapeur : $h_B \approx 2425\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $s_B = s_A$, titre en vapeur d'environ 0,82.
- C : isobare 10 bar prolongée de B jusqu'à la courbe de rosée (température de saturation 453 K), puis dans la zone de vapeur surchauffée jusqu'à 493 K : $h_C \approx 2875\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $s_C \approx 6790\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- D : verticale issue de C jusqu'à l'isobare 0,2 bar, dans le domaine liquide + vapeur : $h_D \approx 2240\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $s_D = s_C$.

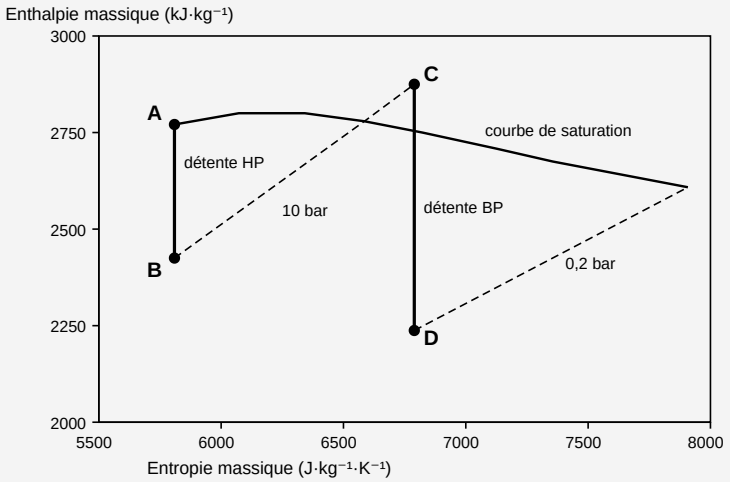



*Diagramme enthalpique (de Mollier) : points A, B, C, D (isentropes en trait plein, isobares en pointillé ; seule la partie utile du diagramme est tracée). Tracé simplifié : sur la copie, les points se placent sur le document réponse 3 aux coordonnées indiquées.*

## Question 24

*Déterminer l'état physique de l'eau au point D, puis relever le titre massique en vapeur de l'eau sortant de la turbine BP.*

Au point D (0,2 bar, après une détente isentropique issue d'une vapeur surchauffée), l'entropie $s_D \approx 6790\ \mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$ est inférieure à l'entropie de la vapeur saturante sèche à 0,2 bar (environ 7900 J·kg⁻¹·K⁻¹). Le point D est donc sous la courbe de saturation : l'eau est à l'état de **mélange liquide + vapeur**.

Sur le document réponse 3, le point D ($s_D \approx 6790\ \mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$, $h_D \approx 2240\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$) se trouve sur la courbe d'iso-titre x ≈ 0,84 : le titre massique en vapeur de l'eau sortant de la turbine BP vaut $x_D \approx 0{,}84$.

Environ 84 % de la masse de l'eau sortant de la turbine BP est à l'état de vapeur et 16 % à l'état liquide.

## Question 25

*Vérifier que la variation d'enthalpie massique $\Delta h_{A \to B}$ de l'eau vaut environ – 345 kJ·kg$^{-1}$ lors de sa détente dans la turbine HP.*

Lecture sur le diagramme : $h_A \approx 2770\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$ et $h_B \approx 2425\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$.

$$\Delta h_{A \to B} = h_B - h_A = 2425 - 2770 = -345\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$$

La valeur est négative : l'eau cède de l'énergie à la turbine lors de la détente.

## Question 26

*Sachant que le débit de l'eau dans la turbine HP est $Q_m$ = 2176 kg·s$^{-1}$, en déduire la puissance cédée par l'eau à la turbine HP.*

$$P_{HP} = Q_m \times |\Delta h_{A \to B}| = 2176 \times 345 \times 10^3 \approx 7{,}51 \times 10^8\ \mathrm{W} \approx 751\ \mathrm{MW}$$

### Question 27

*La puissance cédée par l'eau à la turbine BP est de 962 MW. En déduire la puissance totale reçue par la turbine.*

$$P_{totale} = P_{HP} + P_{BP} = 751 + 962 = 1713 \text{ MW} \approx 1{,}71 \times 10^{3} \text{ MW}$$

## PARTIE F – CONSOMMATION EN EAU D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE — 3 points

### Question 28

*Montrer que le débit massique d'eau évaporée au niveau de l'aéroréfrigérant est d'environ $Q_{m,eau}$ = 752 kg·s$^{-1}$.*

Chaque kilogramme d'air s'enrichit en vapeur d'eau de $34{,}5 - 3{,}7 = 30{,}8 \text{ g} = 0{,}0308 \text{ kg}$. Cette eau est évaporée depuis l'eau du circuit de refroidissement.

$$Q_{m,eau} = Q_{m,air} \times 0{,}0308 = 2{,}44 \times 10^{4} \times 0{,}0308 \approx 752 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Question 29

*En déduire la masse d'eau évaporée en une année par l'ensemble des CNPE de France.*

$$m = 30 \times 752 \times (365 \times 24 \times 3600) = 22\,560 \times 3{,}154 \times 10^{7} \approx 7{,}1 \times 10^{11} \text{ kg}$$

### Question 30

*Comparer la valeur précédemment trouvée à la consommation totale d'eau en France.*

$$\frac{7{,}1 \times 10^{11}}{3 \times 10^{13}} \approx 2{,}4 \times 10^{-2} \approx 2{,}4\ \%$$

L'évaporation dans les aéroréfrigérants des centrales nucléaires représente environ 2,4 % de la consommation totale d'eau en France, soit environ un quarantième.

## RÉCAPITULATIF DU BARÈME

| Partie | Intitulé | Points |
|---|---|---|
| A | Puissance de la pompe du circuit primaire | 14 |
| B | Alimentation électrique des chaufferettes du pressuriseur | 5 |
| C | Masse de combustible | 10 |
| D | Mesure de la pression du circuit primaire | 11 |
| E | Puissance cédée par la vapeur à la turbine | 7 |
| F | Consommation en eau d'une centrale nucléaire | 3 |
| | **Total** | **50** |

## Continue à t'entraîner

Retrouve tous les sujets et corrigés du BTS CIRA, classés par épreuve et par année :
btscira.fr/annales-sujets-et-corriges

Pour réviser tout le programme avant l'examen, les Fiches de Révision du BTS CIRA reprennent l'essentiel de chaque épreuve :
btscira.fr/fiches-de-revision

Copyright © 2027 FormaV®. Tous droits réservés.

FormaV® est une marque déposée auprès de l'INPI sous le numéro 5227897.

Ce document a été élaboré par FormaV® avec le plus grand soin afin d'accompagner chaque apprenant vers la réussite de ses examens. Son contenu (textes, graphiques, méthodologies, tableaux, exercices, concepts, mises en forme) constitue une œuvre protégée par le droit d'auteur.

Toute copie, partage, reproduction, diffusion ou mise à disposition, même partielle, gratuite ou payante, est strictement interdite sans accord préalable et écrit de FormaV®, conformément aux articles L.111-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Dans une logique anti-plagiat, FormaV® se réserve le droit de vérifier toute utilisation illicite, y compris sur les plateformes en ligne ou sites tiers.

En utilisant ce document, vous vous engagez à respecter ces règles et à préserver l'intégrité du travail fourni. La consultation de ce document est strictement personnelle.

Merci de respecter le travail accompli afin de permettre la création continue de ressources pédagogiques fiables et accessibles.