

- Question 17** Deux secteurs ont une fréquence d'injection double de tous les autres durant un cycle. À l'aide du document technique DT3, **justifier** cette particularité au vu des secteurs concernés.
- Question 18** À l'aide du document technique DT7, **donner** le temps d'un cycle de compression/injection  $t_{CI}$  (prendre un maximum de périodes pour la précision de la mesure).
- Question 19** En considérant un temps d'injection moyen  $\overline{t_{inj}}$  de 15,6 s, en déduire le temps de compression  $t_C$ . **En déduire** la durée en minutes des déperditions thermiques entre 2 apports énergétiques.

## 2.2. Déperditions thermiques, bilan global

- Question 20** En considérant à nouveau des conditions extrêmes ( $T_{ext} = -20\text{ °C}$ ), **calculer** la chute de température obtenue cette fois-ci durant le temps de compression  $t_C$ . En considérant que l'énergie apportée lors d'une injection suffit à compenser ces pertes thermiques, **conclure** quant à la faisabilité du maintien en température du digesteur.

Ainsi, les pertes cumulées peuvent être obtenues en calculant les pertes durant les temps cumulés de déperditions thermiques, à l'aide de l'équation 4 (ou en d'autres termes le temps des pertes cumulées est égal au temps cumulé des pertes).

- Question 21** **Évaluer** le taux de fonctionnement du compresseur  $\tau_C$  (en %), défini comme le rapport entre le temps de fonctionnement du compresseur  $t_C$  sur le temps total d'un cycle  $t_{CI}$ .
- Question 22** **En déduire** le nombre d'heures annuel  $t_A$  durant lesquelles les déperditions se produisent.

On rappelle l'équation des déperditions thermiques obtenue précédemment :

$$\Delta Q(t) = \frac{(T_0 - T_{ext})}{R_{tot}} t$$

On donne  $R_{tot} = 0,0032 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ .

- Question 23** Sachant que la température annuelle moyenne à Calais est de  $11,5\text{ °C}$ , **en déduire** sur une année l'énergie thermique perdue  $\Delta Q_A$  dans la matière en digestion (en MWh).
- Question 24** Sachant que le rendement du compresseur est de 30 %, **en déduire** l'énergie annuelle  $E_A$  consommée par le compresseur (en MWh).

Au final, le calcul est valable en considérant que seuls les échanges thermiques avec l'extérieur (au travers des parois) sont responsables des déperditions. Cela suppose qu'aucune autre déperdition n'intervient, et en particulier que la matière est introduite à la température interne du digesteur, soit 55°C.

Cela est assuré par (voir documents techniques DT1 et DT2) :

- le préchauffage des huiles et graisses ainsi que des eaux traitées ;
- la recirculation d'une partie du digestat (appelée « levain ») ainsi que du jus extrait du digestat (température de 40°C environ) ;
- un chauffage global des intrants dans le malaxeur avant introduction par la pompe.

**Question 25** Au vu des flux d'énergies mis en jeu (voir documents techniques DT1 et DT2), **conclure** quant à l'énergie annuelle consommée pour le seul maintien en température du digesteur  $E_{MTA}$  en MWh.

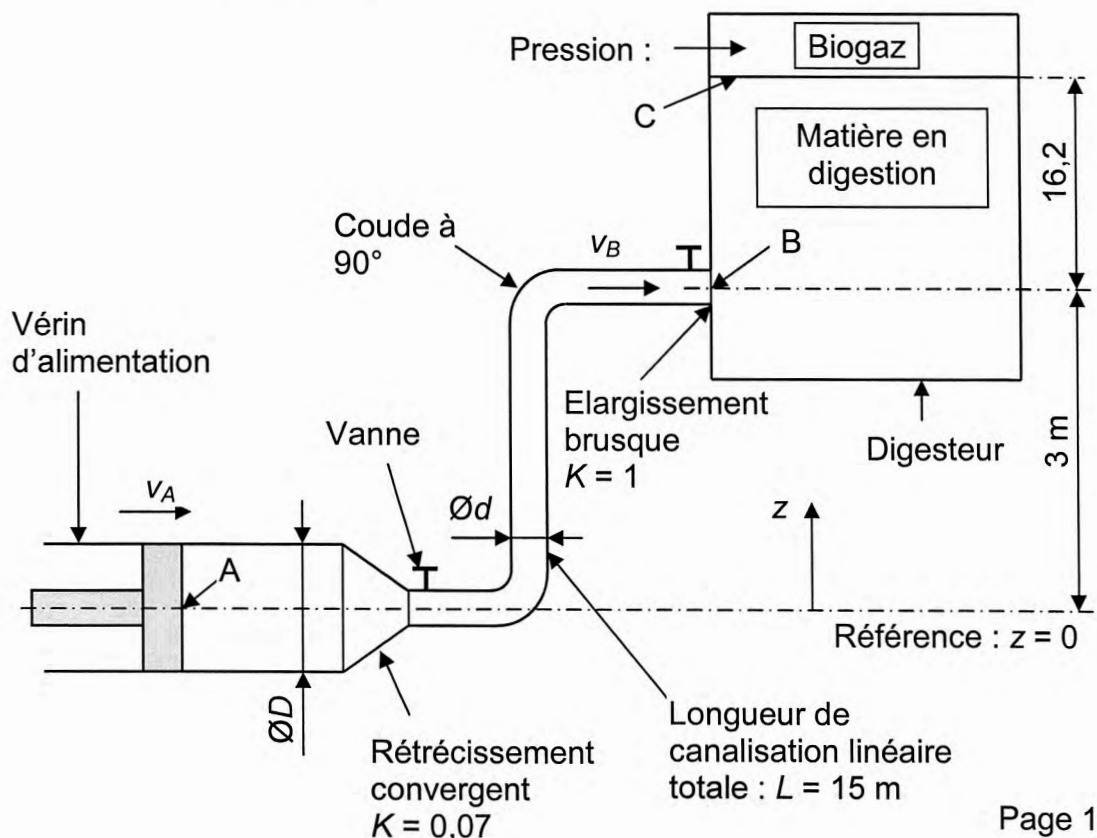
### 3. Étude de la chaîne d'alimentation du digesteur

En observant la chaîne d'alimentation du digesteur (voir document technique DT2), on remarque que le réseau EDF alimente en énergie électrique une centrale hydraulique. Cette centrale distribue ensuite son énergie hydraulique à une pompe de recirculation, au malaxeur et au vérin d'alimentation. Nous connaissons les puissances hydrauliques nécessaires et les temps d'utilisation du malaxeur et de la pompe de recirculation.

L'objectif de cette étude est de :

- déterminer la puissance hydraulique nécessaire à l'introduction des intrants et le temps d'utilisation du vérin d'alimentation ;
- effectuer le bilan énergétique de la chaîne d'alimentation du digesteur.

Schématisation de l'alimentation :



### Hypothèses :

- seul le déplacement à vitesse constante du vérin est pris en compte ;
- la variation de hauteur de la matière en digestion est négligée ;
- les pertes de charge régulières dans le vérin est négligée ;
- les pertes de charge singulières dues aux vannes sont négligées ;
- les intrants et la matière en digestion se comportent comme un fluide incompressible de masse volumique et de viscosité identiques et dont l'écoulement est laminaire.

### Données :

- $D = 0,28$  m ;
- $d = 0,15$  m ;
- $v_A = 0,2$  m/s ;
- $p = 25$  mbar ;
- masse volumique des intrants  $\rho = 920$  kg/m<sup>3</sup> ;
- viscosité dynamique des intrants  $\eta = 0,85$  Pa·s ;
- accélération de la pesanteur  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.

### 3.1. Évaluation des conditions de vitesse et de pression au point B, entrée du digesteur

**Question 26** Déterminer l'expression littérale de la pression au point B,  $p_B$ , en fonction de  $p$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $z_B$  et  $z_C$ . Calculer sa valeur numérique en Pa puis en bar.

**Question 27** Déterminer l'expression littérale de la vitesse de déplacement  $v_B$  des intrants dans le tube d'alimentation en fonction de  $v_A$ ,  $D$  et  $d$ . Calculer sa valeur numérique.

### 3.2. Détermination de la pression nécessaire au point A du vérin d'alimentation

Dans le conduit d'acheminement de diamètre constant, nous sommes dans le cas d'un écoulement laminaire ( $Re < 2000$ ), dans ce cas l'équation de Bernoulli généralisée est du type :

$$p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_B + \rho g z_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \Delta P_R + \Sigma \Delta P_S$$

Pertes de charge régulières :  $\Delta P_R = \frac{32 \cdot \eta \cdot v \cdot L}{d^2}$

Pertes de charge singulières :  $\Delta P_S = K \frac{\rho \cdot v^2}{2}$

Avec :

- $\eta$ , viscosité dynamique en Pa·s ;
- $v$ , vitesse du fluide en m/s ;
- $L$ , longueur de la canalisation en m ;
- $d$ , diamètre de la canalisation en m ;
- $\rho$ , masse volumique du fluide en kg/m<sup>3</sup> ;

- $K$ , coefficient de pertes de charge sans dimension ( $K$  est défini pour la section de plus petit diamètre).

**Question 28** En utilisant le théorème de Bernoulli entre les points A et B et sans tenir compte des pertes de charge dans un premier temps, **calculer**  $p_A$ .

**Question 29** **Calculer** la variation de pression due aux pertes de charge régulières. **Calculer** la variation de pression due aux pertes de charge singulières. **En déduire**  $\Delta P_{Total}$ .

**Question 30** **Calculer** en pourcentage l'augmentation de pression au point A due aux pertes de charge. **Conclure**. **En déduire** la valeur de  $p_A$  en bar.

### 3.3. Évaluation de la puissance hydraulique nécessaire au fonctionnement du vérin d'alimentation

**Question 31** **Déterminer** l'expression littérale de la puissance  $P_A$  au point A nécessaire au déplacement des intrants. **Calculer** cette puissance lors du déplacement à vitesse constante.

**Question 32** Connaissant le rendement de la pompe d'introduction (voir document technique DT2), **calculer** la puissance nécessaire au vérin d'alimentation,  $P_{hVA}$ , pour injecter les intrants.

### 3.4. Évaluation de la durée d'utilisation annuelle du vérin d'alimentation

En référence aux documents techniques DT2 et DT3, nous savons que le site traite une masse de déchets d'environ 26 000 tonnes par an. Afin d'assurer un taux de matière sèche de 30 %, on ajoute des diluants ainsi qu'une partie du digestat (le levain). Au final c'est 39 780 tonnes d'intrants par an qui sont injectés dans le digesteur.

**Question 33** **Déterminer** le volume  $V_{ia}$  en  $m^3$  des intrants injectés en une année. **Calculer** le débit du vérin d'alimentation à vitesse constante. **En déduire** la durée  $T$  nécessaire à l'introduction des intrants en une année si l'on considère que le piston se déplace à vitesse constante.

### 3.5. Bilan énergétique de la chaîne d'alimentation pour un an de fonctionnement

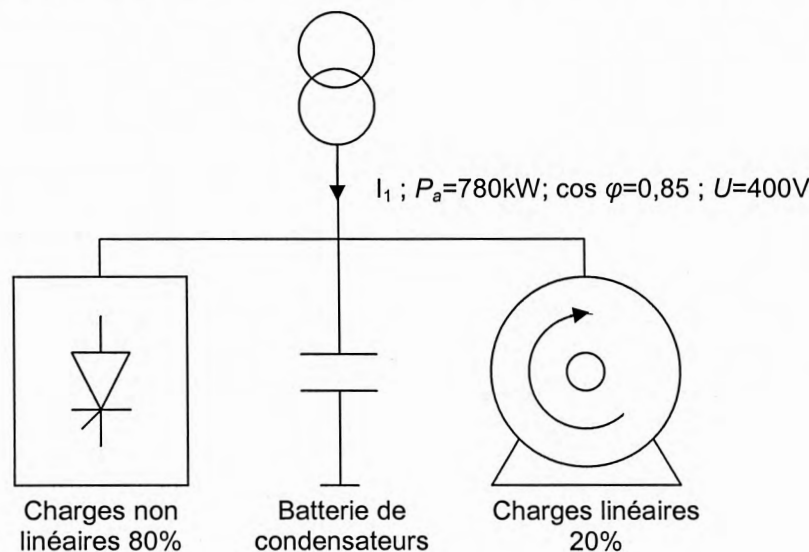
Pour la suite, on donne les caractéristiques suivantes pour le vérin d'alimentation :

- puissance hydraulique,  $P_{hVA} = 2,6$  kW ;
- durée d'utilisation, 2,7 h/jour ;
- énergie nécessaire au retour du vérin en position rentrée négligeable.

**Question 34** Connaissant les puissances hydrauliques et le temps d'utilisation des organes alimentés par la centrale hydraulique et le rendement de cette dernière, **déterminer**, en MWh, l'énergie électrique annuelle consommée par la chaîne d'alimentation du digesteur  $E_{CAa}$ .

## Partie 2. Étude du réseau électrique

La puissance absorbée par l'ensemble des récepteurs (pompes, surpresseurs, trommels, transporteurs, ventilateurs, agitateurs, éclairage...) de l'usine de méthanisation des biodéchets de Calais est d'environ 380 kW pendant les périodes de pointe. Cette puissance est atteinte essentiellement le matin lors de la réception des déchets fermentescibles et des déchets verts. Le bilan énergétique de l'usine (voir document technique DT1) fait apparaître une consommation électrique de 1 510 MWh. L'usine est entièrement automatisée. Les récepteurs sont constitués essentiellement de moteurs contrôlés en grande partie par des variateurs de vitesse. Le réseau électrique de l'usine est considéré comme fortement perturbé avec la présence d'harmoniques de rang 5 et plus. Lors de la conception de l'usine il a été prévu une possible extension. Elle a donc été dimensionnée avec les données suivantes : une puissance absorbée de 780 kW constituée de 80% de charge non linéaire, un  $\cos\varphi$  de 0,85 et une tension triphasé de 400 V.



L'objet de cette étude porte sur :

- le dimensionnement du transformateur, en tenant compte des perturbations du réseau ;
- la compensation de l'énergie réactive, par l'ajout d'une batterie de condensateurs ;
- les incidences liées à ce rajout sur l'installation ;
- la solution adoptée pour y remédier.

### 1. Dimensionnement du transformateur

**Question 35** Calculer la puissance apparente  $S_1$  de l'installation et le courant absorbé  $I_1$ . Dans la suite de l'énoncé ce courant sera pris comme fondamental.

Les nombreuses charges non linéaires de l'installation génèrent des harmoniques de courant et de tension. Ces harmoniques peuvent fortement contraindre le transformateur voire l'endommager. En conséquence un facteur de déclassement de 0,86 doit être appliqué au transformateur.

**Question 36** Choisir la puissance assignée du transformateur à l'aide du document technique DT8.

**Question 37** Proposer des solutions technologiques permettant l'atténuation de la pollution harmonique dans le réseau électrique afin d'éviter le surdimensionnement de l'appareillage tel le transformateur.

## 2. Compensation de l'énergie réactive

---

**Question 38** Énoncer les avantages techniques et économiques de la compensation de l'énergie réactive ?

En tarif vert, si le comptage de l'énergie est réalisé en aval du transformateur, le fournisseur d'énergie facture l'énergie réactive lorsque la tangente  $\varphi$  est supérieure à 0,31.

**Question 39** Déterminer la puissance de la batterie de condensateurs nécessaire à la compensation de l'installation.

**Question 40** Choisir la puissance de la batterie de condensateurs directement supérieure à l'aide du document technique DT9.

**Question 41** Conclure quant à l'intérêt de la compensation de l'énergie réactive pour le transformateur.

## 3. Le phénomène de résonance

---

On peut modéliser l'installation par un schéma monophasé équivalent entre phase et neutre pour une analyse harmonique.  $I_h$  représente le générateur des courants harmoniques des charges non linéaires,  $R_{cha}$  les charges linéaires, et  $L_{cc}$  l'inductance du transformateur.

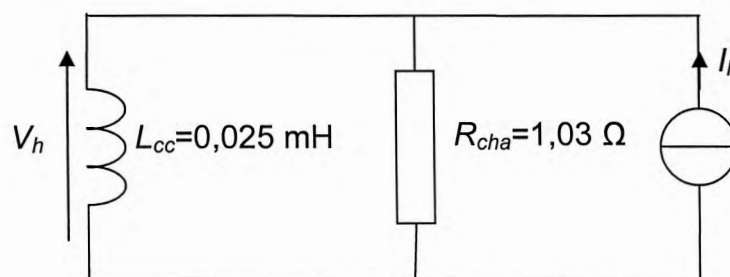


Schéma monophasé équivalent

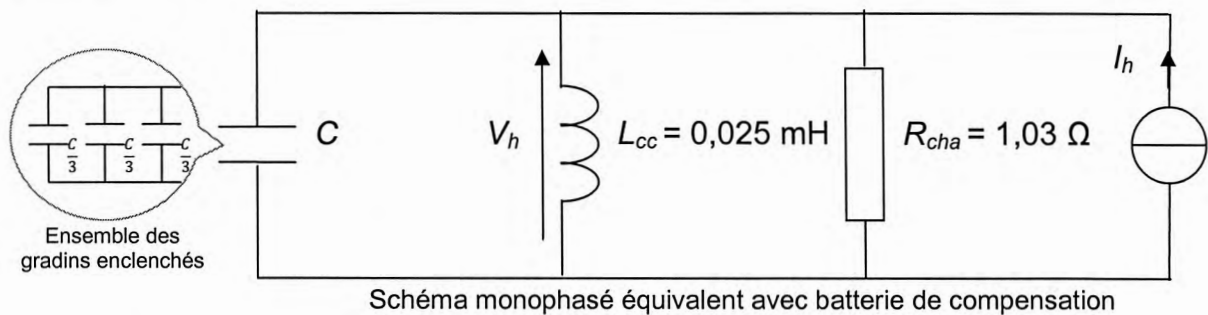
**Question 42** Exprimer le module de l'impédance  $Z_{RL}$  du schéma équivalent en fonction de  $R_{cha}$ ,  $L_{cc}$  et de la fréquence  $f$ . Représenter sur le document réponse DR1 l'impédance  $Z_{RL}$  en fonction de  $f$ .

Les courants harmoniques imposés par les charges non linéaires génèrent des chutes de tensions  $V_h$  dans l'impédance du transformateur, par exemple  $V_{11}$ .

**Question 43** Calculer  $V_{11}$ .

**Question 44** Conclure quant à l'incidence de ces tensions harmoniques sur les autres récepteurs ?

La batterie de condensateurs déterminée question 40 est rajoutée en parallèle au schéma précédent, représentée par un condensateur de capacité  $C$ , équivalent à la somme des capacités de la batterie.



**Question 45** Déterminer la valeur de la capacité  $C$  lorsque trois gradins de la batterie, correspondant à une compensation triphasée de 150 kVAR, sont enclenchés.

**Question 46** Exprimer le module de l'impédance  $Z_{RLC}$  du schéma équivalent avec batterie de condensateurs en fonction de  $C$ ,  $R_{cha}$ ,  $L_{cc}$  et de la fréquence  $f$ . Représenter sur le document réponse DR1 l'impédance  $Z_{RLC}$  en fonction de  $f$ .

**Question 47** Calculer la fréquence de résonance parallèle  $f_p$  du circuit.

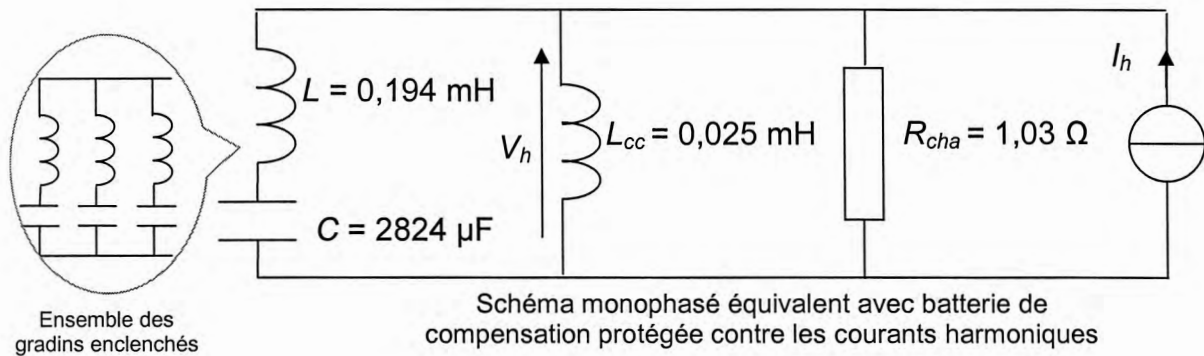
**Question 48** Pour l'harmonique le plus proche de la fréquence de résonance, calculer  $V_h$  la chute de tension aux bornes de l'impédance du transformateur générée par cette harmonique.

**Question 49** Calculer le courant harmonique  $I_{11T}$  circulant dans le transformateur et  $I_{11C}$  le courant circulant dans un gradin du système de compensation.

**Question 50** Interpréter les résultats et conclure quant aux conséquences du phénomène sur l'installation.

## 4. Protection contre les effets de résonance

Une self de protection est maintenant ajoutée en série avec le condensateur.



- Question 51** Sur le document réponse DR1 la caractéristique de l'impédance du circuit ci-dessus a été tracée. À partir de cette caractéristique, **déterminer** le courant harmonique  $I_{11T}$  circulant dans le transformateur et le courant  $I_{11C}$  circulant dans un gradin du système de compensation.
- Question 52** **Calculer** la fréquence de résonance série  $f_{rs}$  du circuit série LC (self de protection et condensateur).
- Question 53** **Conclure** quant à l'intérêt de la self ainsi que sur le positionnement de la fréquence de résonance série  $f_{rs}$  du circuit série.

### Partie 3. Synthèse : amélioration des performances énergétiques globales

Les études menées précédemment amènent à deux constats :

- l'usine nécessite un certain nombre de différents récepteurs consommateurs d'énergie, afin de satisfaire aux différentes exigences fonctionnelles et contraintes technologiques. L'énergie électrique totale ainsi consommée représente donc une quantité nécessaire et suffisante à son bon fonctionnement ;
- ces récepteurs entraînent des pollutions harmoniques ainsi que le renvoi d'énergie réactive sur le réseau électrique, qui sont compensés et atténués afin de bien dimensionner et protéger l'installation. On limite de plus d'éventuels surcoûts tarifaires superflus.

Finalement, les performances énergétiques de l'usine sont, en termes de consommation électrique, quasi optimales. La production d'énergie électrique issue de la cogénération est même excédentaire au regard de celle consommée localement (voir document technique DT1).

- Question 54** À l'aide du document technique DT1, **identifier** la nature des pertes énergétiques résiduelles puis, en vous inspirant du dossier technique sur la méthanisation, **proposer** une solution permettant d'améliorer les performances énergétiques globales de l'usine.



<b>Nom :</b> <i>(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</i>	<input type="text"/>																							
<b>Prénom :</b>	<input type="text"/>																							
<b>N° d'inscription :</b>	<input type="text"/>								<b>Né(e) le :</b>	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>								

*(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)*

<b>Concours</b>	<b>Section/Option</b>	<b>Epreuve</b>	<b>Matière</b>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

GDE ENE 2

# Document Réponse 1

# Document Réponse DR1

