

SESSION 2025

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique,
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique,
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des
constructions.

**ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE
D'UN SYSTÈME PLURITECHNOLOGIQUE**

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.
Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1414A	101	7809

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1415A	101	7809

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1416A	101	7809

► Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement Privé :

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1414A	101	7809

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1415A	101	7809

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1416A	101	7809

Définition de l'épreuve

L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de construire une analyse critique de solutions technologiques et de mobiliser ses connaissances scientifiques et technologiques pour élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances d'un système ou d'un processus lié à la spécialité et définir des solutions technologiques.

Conseils aux candidats

Il est demandé aux candidats :

- de rédiger les réponses aux différentes parties sur des feuilles de copie séparées et clairement repérées ;
- de numéroter chaque feuille de copie et d'indiquer le numéro de la question traitée ;
- de rendre tous les documents réponses, même non complétés ;
- d'utiliser exclusivement les notations indiquées dans le sujet lors de la rédaction des réponses ;
- de justifier clairement les réponses ;
- d'encadrer ou souligner les résultats ;
- de présenter lisiblement les applications numériques, sans omettre les unités, après avoir explicité les expressions littérales des calculs ;
- de formuler les hypothèses nécessaires à la résolution des problèmes posés si celles-ci ne sont pas indiquées dans le sujet.

Étude proposée

Le support d'étude s'inspire d'une unité de méthanisation qui se situe à Val de Briey, en Meurthe-et-Moselle (54). Ce support est présenté en pages suivantes.

L'étude est décomposée en quatre parties indépendantes :

- Partie 1 : Comment procéder à l'introduction des substrats solides dans le digesteur ?
- Partie 2 : Comment déterminer la consommation énergétique du système de brassage du digesteur ?
- Partie 3 : Comment réduire la part d'autoconsommation de biogaz dans les digesteurs ?
- Partie 4 : Concevoir une séquence pédagogique à partir d'une problématique industrielle de production biogaz.

Ce sujet se décompose de la façon suivante :

- texte du sujet, pages 2 à 25 ;
- documents techniques DT 1 à DT 12, pages 26 à 39 ;
- documents pédagogiques DP 1 à DP 2, pages 40 à 42 ;
- documents réponses DR 1 à DR 6, pages 43 à 49, à rendre avec la copie.

Mise en situation

Unité de méthanisation de Val de Briey (54 – Meurthe et Moselle)

La méthanisation est un procédé biologique naturel permettant de dégrader la matière organique par des bactéries, en l'absence d'oxygène.

Ce procédé conduit à la formation de deux produits valorisables (voir Figure 1) :

- une énergie renouvelable, appelée biogaz (composé majoritairement de biométhane CH_4 et de dioxyde de carbone CO_2), qui peut être valorisée sous forme de chaleur, d'électricité (cogénération), de biométhane carburant ou biométhane injecté dans le réseau de gaz naturel après épuration ;
- un digestat provenant de la matière non digérée, qui peut être épandu et qui participera à la fertilisation naturelle des sols.

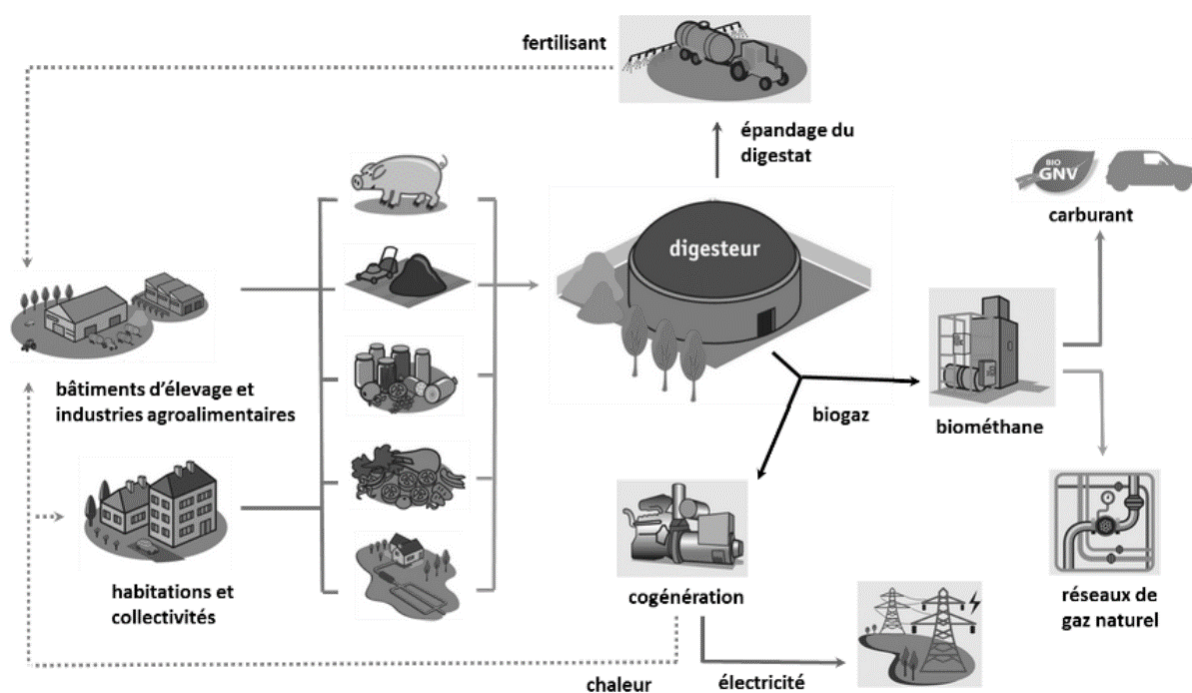


Figure 1 : schématisation des circuits de la méthanisation

Le procédé de méthanisation permet donc de remplir plusieurs fonctions, au croisement des filières énergétiques, de gestion des déchets et de recyclage d'éléments fertilisants.

L'unité de méthanisation de Val de Briey (voir Figure 2) s'inscrit parfaitement dans ce processus et permet ainsi de valoriser des ressources (effluents d'élevage et matières végétales agricoles) issues des activités de dix exploitations locales.



Figure 2 : site de l'unité de méthanisation de Val de Briey (54)

Pour cette unité de méthanisation, le choix de l'exploitant s'est orienté vers une valorisation du biogaz en biométhane injecté sur le réseau de gaz naturel passant à proximité du site.

L'unité « normaux-mètres cubes » [Nm³], employée dans le sujet, correspond au volume de gaz défini dans des conditions normalisées de pression (101 300 Pa) et de température (0°C soit 273,15 K).

C'est donc la majeure partie des 2 704 365 Nm³ de biogaz produit annuellement qui sera alors acheminée vers un processus d'épuration du biogaz en biométhane avant injection finale de ce biométhane sur le réseau de gaz naturel (voir Figure 3).

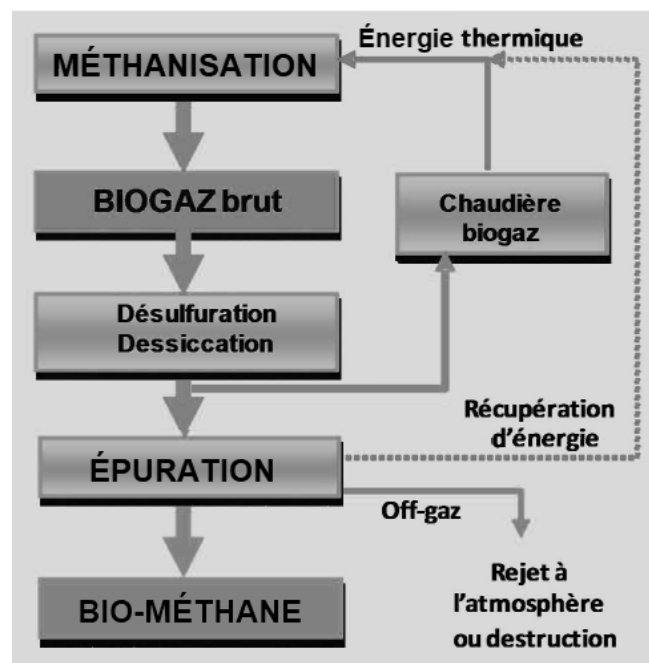


Figure 3 : prétraitement du biogaz

Toutefois, une partie du biogaz produit (voir Figure 4) sera autoconsommée sur site par une chaudière équipée d'un brûleur biogaz, permettant de fournir la chaleur nécessaire au maintien des conditions thermiques du processus de méthanisation

mésophile (digestion anaérobie en régime de température de 40°C) dans les deux digesteurs et post-digesteur du site.

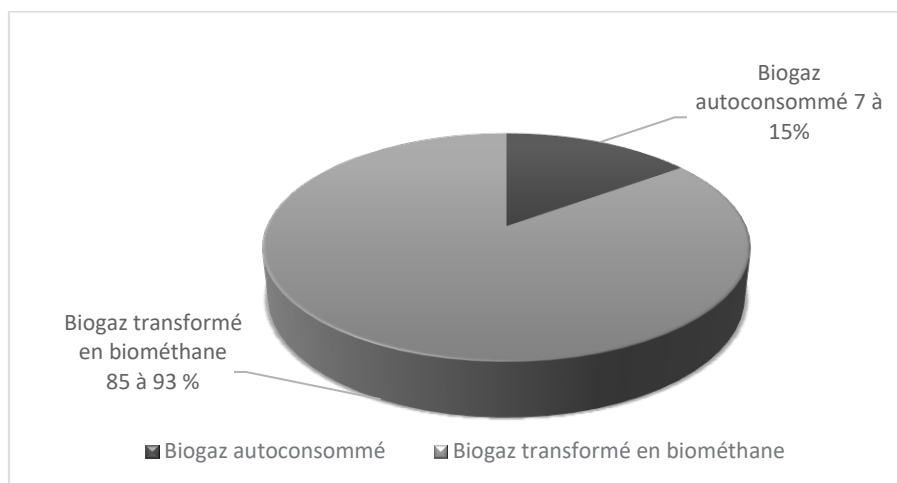


Figure 4 : répartition en volume du biogaz produit sur site selon l'utilisation

Pour optimiser la production de biogaz au sein de l'unité de méthanisation, il est également fondamental de maîtriser la qualité et les quantités de matières organiques (intrants) à l'entrée du processus car toute modification brutale des caractéristiques de la ration des digesteurs viendra perturber l'activité des bactéries, et donc la production de biogaz.

L'unité de méthanisation de Val de Briey traite quotidiennement 84 tonnes de substrats en utilisant le procédé de transformation par « voie liquide en infiniment mélangé », ce qui signifie que l'alimentation et la vidange des digesteurs se font en continu, de façon séquencée.

Aussi, afin d'obtenir un mélange agitable dans le digesteur et pompable, la teneur en matière sèche (notée % MS) de la ration entrante ne doit pas excéder 20 %, conformément au Tableau 1 :

% MS dans le mélange de substrats entrants	Type de process
5–20 %	Voie liquide infiniment mélangée
25–30 %	Voie solide piston
25–40 %	Voie solide discontinue

Tableau 1 : teneur en matière sèche des substrats entrants selon le type de process

Sur le site de Val de Briey, l'introduction des substrats solides nécessite un prétraitement par recirculation du digestat permettant de diluer et de réchauffer le mélange entrant.

En voie liquide infiniment mélangée, la teneur en matière sèche de la matière organique en décomposition dans les digesteurs est en moyenne égale à 8 % MS.

En 2022, l'unité de méthanisation a traité au total 25 754 tonnes de matières premières pour une production de 165 Nm³·h⁻¹ de biométhane.

L'unité de méthanisation de Val de Briey est constituée des principaux éléments suivants (voir les diagrammes SysML donnés dans les **DT 1A**, **DT 1B** et **DT 1C**) :

- un système permettant la préparation des intrants solides dans le digesteur (incorporateur - doseur BIG-Mix et alimentateur Prémix) ;
- deux cuves digesteurs en béton d'un volume brut unitaire de 2 280 m³ (2 090 m³ utile) et permettant la production principale de biogaz ;
- une cuve post-digesteur en béton d'une capacité de 2 078 m³ (2 009 m³ utile), permettant d'améliorer la stabilité du digestat et de collecter le biogaz résiduel produit ;
- une cuve de stockage des digestats en béton d'un volume brut de 7 938 m³ permettant le stockage final du digestat avant épandage ;
- une station de transfert assurant les écoulements entre les différentes cuves décrites ci-dessus.

Problématique générale : Optimiser la production de biogaz dans l'unité de méthanisation

Partie 1. Comment procéder à l'introduction des substrats solides dans le digesteur ?

Objectif : Dimensionner les constituants et estimer la consommation énergétique du système mis en œuvre pour introduire la ration journalière des substrats solides dans les digesteurs.

Id	Nom de l'exigence	Critère
1.2.	Introduire les substrats solides	Le taux de matière sèche des intrants doit être compatible avec le procédé de méthanisation par voie en infiniment mélangé soit un taux visé de 12 % MS
1.2.1	Stocker les substrats solides dans la trémie d'incorporation	Le volume de la trémie d'incorporation doit permettre de contenir la ration quotidienne des substrats solides
1.2.5	Mélanger les substrats solides	Humidifier les substrats solides avec la matière en digestion recirculée (voir exigence 1.3.4.3.1)
1.2.6	Alimenter les digesteurs	Acheminer la matière mélangée successivement dans les deux digesteurs La ration quotidienne est introduite en continu à fréquence régulière La pompe d'alimentation fonctionne 40 % du temps (20 % par digesteur)
1.3.	Accélérer le processus de décomposition de la matière	Digestion anaérobie en régime de température mésophile (40°C)
1.3.1	Renouveler la matière organique	84 tonnes d'intrants par jour pour les deux digesteurs dont 84% de substrats solides Durée moyenne de séjour de la matière dans les digesteurs : 38 jours Durée moyenne de séjour de la matière dans le post-digesteur : 20 jours
1.3.4	Maintenir les conditions optimales de température	La température doit être maintenue à 40°C
1.3.4.1	Chauffer la matière en digestion	Le chauffage compense le déficit thermique "pertes – apports"
1.3.4.1.1	Autoconsommer une partie du biogaz	Objectif visé : 5 % d'autoconsommation du biogaz produit pour le chauffage des digesteurs et du post-digesteur
1.3.4.3	Homogénéiser la matière organique	Le brassage de la matière contribue à son réchauffement
1.3.4.3.1	Recirculer la matière	Recirculation quotidienne de 6,7 % du volume utile des digesteurs

Tableau 2 : extrait du diagramme des exigences

La quantité et la qualité des gisements conditionnent le rendement de l'unité de méthanisation. La connaissance de la teneur en matière sèche [% MS], du taux de matière volatile [% MV] et du potentiel méthanogène (PBM) par substrat permet d'évaluer la production de biométhane envisageable et de préparer le mélange d'introduction dans les digesteurs.

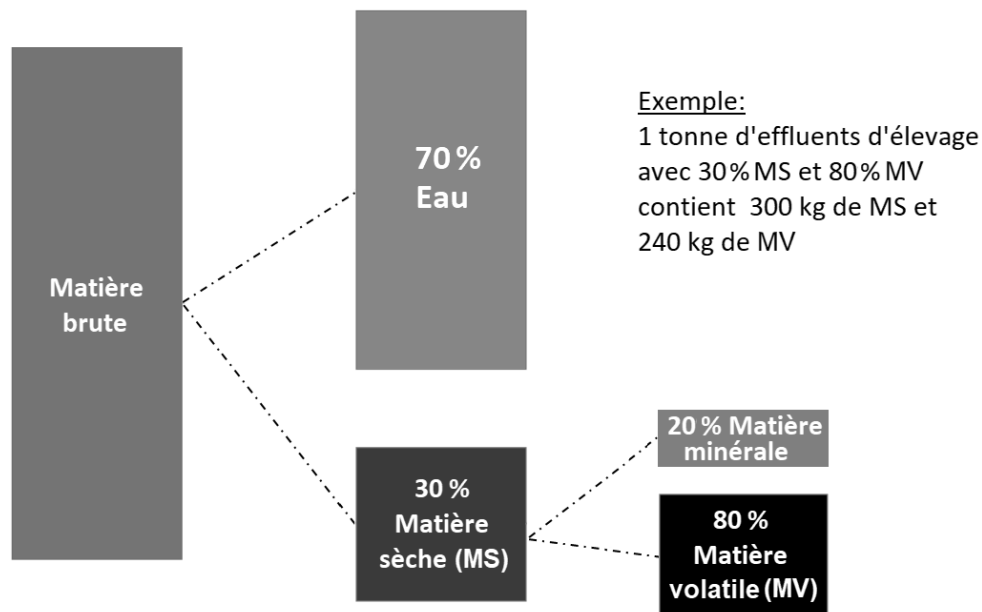


Figure 5 : composition des matières

La connaissance de la teneur en matière sèche des matières brutes entrantes (voir Figure 5) permet de définir le mode d'introduction de la façon suivante :

- substrats liquides introduits par pompage ;
- substrats solides introduits par mélange et pompage avec recirculation du digestat.

Le site de Val de Briey utilise le procédé de méthanisation par voie liquide avec une recirculation du digestat (voir Figure 6).

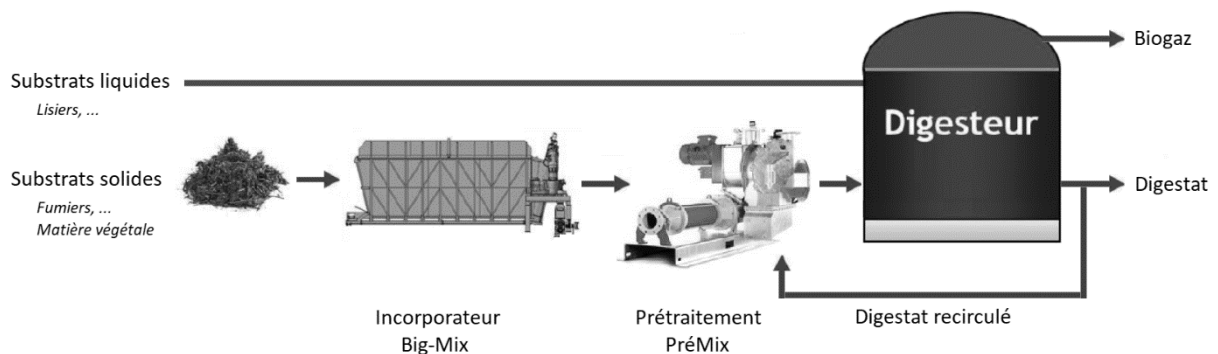


Figure 6 : illustration du process d'incorporation en « infiniment mélangé »

1.1 Analyse des intrants

La teneur en matière sèche [% MS] attendue pour la suspension organique alimentant les digesteurs est de l'ordre de 12 %.

Hypothèse : le process fonctionne en continu tout au long de l'année.

Question 1 : Compléter, sur le document **DR 1**, les cellules vides du tableau d'approvisionnement annuel des substrats puis **analyser** la production potentielle du biométhane par type de substrat et la teneur en matière sèche des substrats solides au regard du procédé de méthanisation par « voie liquide en infiniment mélangé ».

Question 2 : En supposant un taux d'autoconsommation initial du biogaz de 10 %, pour le maintien en température des digesteurs et du post-digesteur, **déterminer** la production horaire [$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] escomptée de biométhane injectable sur le réseau de gaz.

1.2 Introduction des substrats solides

Les substrats solides, stockés sur le site, sont chargés quotidiennement par un employé à l'aide d'un engin télescopique dans la trémie d'incorporation d'un équipement appelé BIG-Mix (voir Figure 7).

La trémie d'incorporation est constituée d'un fond mouvant qui déplace le substrat solide vers un mélangeur vertical (broyeur à couteaux) qui permet d'homogénéiser le substrat avant de le transférer via une vis à auge vers la suite du procédé de méthanisation.

Quel que soit l'équipement de préparation installé en aval de l'incorporateur BIG-Mix, ce dernier est alimenté en substrat solide de façon homogène et continue, qu'il s'agisse d'un broyeur ou d'une pompe d'introduction en voie liquide.

La masse volumique moyenne des substrats solides stockés dans les silos est de $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Figure 7 : chargement du BIG-Mix

Question 3 : À partir du **DR 1**, **déterminer** la ration quotidienne de substrats solides et **sélectionner**, à l'aide du document **DT 2**, le modèle d'incorporateur BIG-Mix optimal permettant de stocker cette ration pour un seul chargement journalier.

1.3 Prétraitement des intrants solides

Le procédé de méthanisation par voie liquide en infiniment mélangé consiste à introduire la ration quotidienne de substrats de façon séquentielle en maintenant le volume du digesteur constant (volume sortant égal au volume entrant) selon la Figure 6.

Les substrats solides, après leur introduction dans le processus via l'incorporateur BIG-Mix, subissent un prétraitement afin de réduire leur teneur en matière sèche avant l'entrée dans le digesteur. Cette opération, réalisée par l'alimentateur Prémix, consiste à mélanger le substrat solide avec du digestat recirculé, rendant la suspension homogène et pompable. Ce prétraitement permet également de réchauffer la matière incorporée dans le digesteur améliorant ainsi son rendement.

Le principe de fonctionnement de l'alimentateur « Prémix », dans lequel on réalise simultanément deux opérations est détaillé dans la Figure 8.

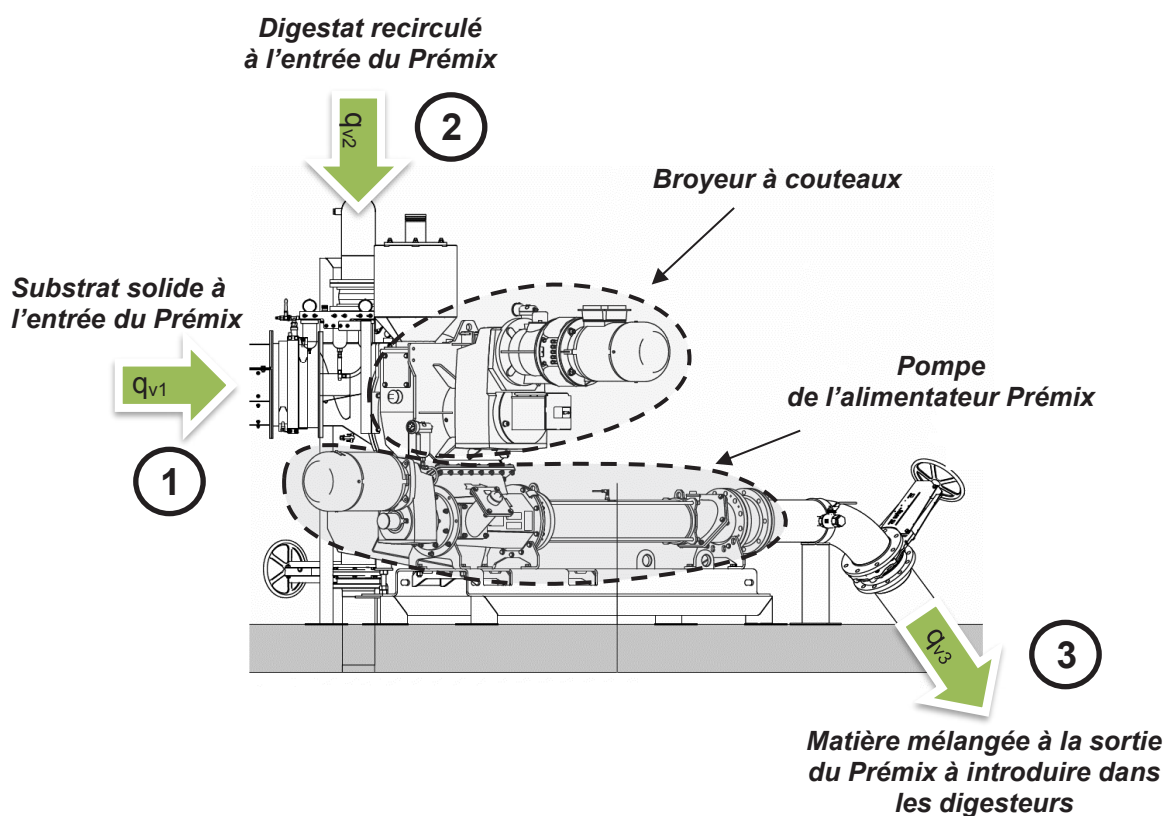


Figure 8 : principe de fonctionnement et raccordement du « Prémix »

Dans un premier temps, le substrat solide à introduire ① est mélangé avec du digestat ② en provenance des digesteurs. Cette première opération a pour but de « fluidifier » et de faciliter le conditionnement de la matière organique à introduire dans les digesteurs.

Puis, le mélange est haché et calibré avec un broyeur muni de couteaux rotatifs.

En sortie du « Prémix », le mélange ③ est alors transporté par l'intermédiaire d'une pompe jusqu'aux deux digesteurs (alimentation alternative des deux digesteurs).

Données utilisables :

Ration quotidienne : 84 tonnes pour l'ensemble des deux digesteurs dont 84 % de substrats solides.

Volume utile des digesteurs : 2 090 m³ par digesteur

Caractéristiques du substrat solide à l'entrée du Prémix :

- Masse volumique : 750 kg·m⁻³
- Teneur en matière sèche : 26,3 %
- Température du substrat solide : 34°C (les matières brutes solides sont stockées de sorte à conserver leur pouvoir méthanogène : le fumier est stocké dans un bâtiment couvert avec mur de fond et les matières végétales sont stockées dans des silos couloir et recouvertes par une bâche).

Caractéristiques du digestat recirculé :

- Recirculation du digestat : 6,7 % du volume utile par digesteur
- Masse volumique de la matière dans le digesteur : 960 kg·m⁻³
- Teneur en matière sèche du digestat recirculé : 8 %
- Température du digestat recirculé : 40°C

Le process gère la circulation de la matière entre les différentes unités grâce à la pompe de transfert et un ensemble de vannes commandées (voir Figure 9).

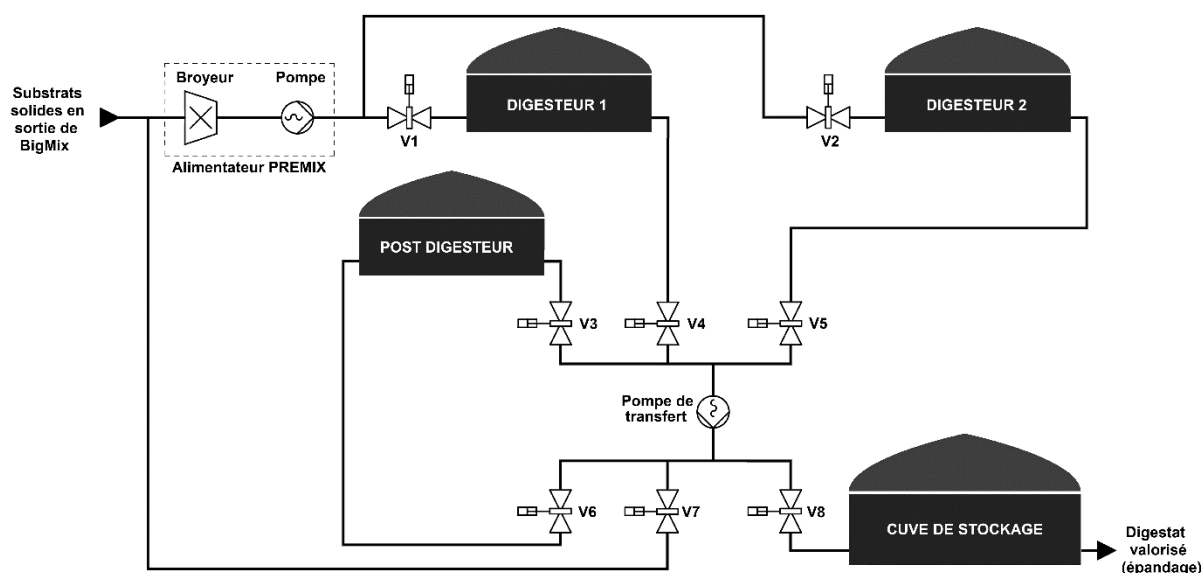


Figure 9 : circuit de transfert du digestat

La pompe de transfert fonctionne 55,4 % du temps par jour durant lequel elle réalise la séquence décrite dans le Tableau 3.

La pompe de l'alimentateur Prémix fonctionne 40 % du temps par jour en introduisant le mélange successivement à parts égales dans les deux digesteurs.

Les volumes de matière dans les digesteurs et le post-digesteur reviennent à l'équilibre à la fin de chaque cycle.

Transfert de matière	Durée	Vannes ouvertes
Digesteur 1 vers le Prémix (recirculation digesteur 1)	21 minutes	V1, V4 et V7
Digesteur 2 vers le Prémix (recirculation digesteur 2)	21 minutes	V2, V5 et V7
Digesteur 1 vers le post-digesteur	4 minutes	V4 et V6
Digesteur 2 vers le post-digesteur	4 minutes	V5 et V6
Post-digesteur vers l'unité de stockage	8 minutes	V3 et V8

Tableau 3 : séquence de fonctionnement de la pompe de transfert et des vannes commandées

Hypothèses :

Les deux fluides en entrée du Prémix sont parfaitement miscibles et ont des capacités thermiques équivalentes. La formule ci-dessous permet de déterminer la masse volumique du mélange ③, formé par le substrat solide à l'entrée du Prémix ① et le digestat recirculé ② :

$$\rho_{\text{mél}} = \frac{m_1 + m_2}{V_1 + V_2}$$

Question 4 : Vérifier par calcul que les temps de fonctionnement de la pompe de transfert et de la pompe du Prémix, dédiés à l'apport de la ration dans le digesteur n°1, sont égaux à 4h48min sur une journée.

Question 5 : Déterminer les débits volumiques en $[m^3 \cdot h^{-1}]$ du substrat solide à l'entrée du Prémix q_{v1} , du digestat recirculé q_{v2} et de la matière introduite dans le digesteur q_{v3} .

Question 6 : Déterminer la teneur en matière sèche [% MS], la masse volumique et la température de la matière mélangée en sortie du Prémix. Conclure sur le choix du procédé « voie liquide en infiniment mélangé ».

1.4 Dimensionnement de la motopompe de l'alimentateur Prémix

Données fluidiques utilisables pour cette partie :

- Matière mélangée en sortie du Prémix à introduire dans le digesteur :
 - Masse volumique : $\rho_3 = 907 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 - Taux de cisaillement mesuré : 10 s^{-1}
 - Taille moyenne des fibres après passage dans le broyeur : 5 mm
 - Débit volumique : $q_{v3} = 39 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

- Tube acier inoxydable DN200, de diamètre extérieur 219,1 mm et d'épaisseur 3,76 mm.

Question 7 : Déterminer la vitesse moyenne v_3 pour le système de pompage afin de respecter l'exigence d'introduction de matière dans chaque digesteur.

Question 8 : À l'aide du **DT 3**, déterminer la viscosité dynamique μ et la contrainte de cisaillement τ de la matière à la sortie du système de pompage.

La matière organique convoyée par le système de pompage se présente comme un fluide de type non-newtonien.

Pour ce type de fluide, le coefficient de perte de charge Λ , permettant d'obtenir les pertes de charge linéiques j , en régime laminaire, est donné par l'équation de Buckingham-Reiner ci-dessous :

$$\Lambda = \frac{64}{Re} \left[1 + \frac{He}{6 \times Re} - \frac{64}{3} \left(\frac{He^4}{\Lambda^3 \times Re^7} \right) \right]$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds [SU]}$$

$$He = \frac{D^2 \times \rho \times \tau}{\mu^2} \quad \text{Nombre de Hedström [SU]}$$

Unités :

ρ : masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v : vitesse [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

D : diamètre canalisation intérieur [m]

μ : viscosité dynamique [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

Afin de résoudre cette équation, un algorithme de recherche de zéro peut être utilisé. Le **DT 4** expose le principe de la méthode de dichotomie qui sera plébiscité dans la suite du sujet.

Question 9 : Compléter sur le **DR 2A** la structure algorithmique puis définir en langage Python sur le **DR 2B** la fonction dichotomie (f , a , b , eps) qui prend comme argument la fonction f dont on recherche le zéro, a , b et eps et qui renvoie Λ , solution de l'équation de Buckingham-Reiner.

Dans le cas d'étude, la résolution de l'équation de Buckingham-Reiner donnée précédemment, aboutit à une valeur finale arrondie de $\Lambda = 49,6$.

Rappel :

- les pertes de charge linéiques s'obtiennent par $j = \Lambda \times \frac{\rho \times v^2}{2 \times D}$ [Pa·m⁻¹]

- les pertes de charge totales $\Delta P_{\text{réseau}} = (j \times L) + \sum \left[\zeta \times \frac{\rho \times v^2}{2} \right]$ [Pa]

avec ζ (dzéta) : coefficient de perte de charge de la singularité (coudes, tés, ...)

Question 10 : À partir du **DT 5**, **déterminer** la perte de charge linéique j du réseau hydraulique alimentant les digesteurs et la perte de charge totale du réseau hydraulique $\Delta P_{\text{réseau}}$.

Rappel :

- équation de Bernoulli généralisée entre deux points 1 et 2

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \Delta P_{\text{pompe}} - \Delta P_{\text{réseau}} = P_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

Unités :

ρ : masse volumique [kg·m⁻³]

g : accélération de la pesanteur [m·s⁻²]

z : altitude [m]

v : vitesse du fluide [m·s⁻¹]

P : pression [Pa]

$\Delta P_{\text{réseau}}$: pertes de charge [Pa]

ΔP_{pompe} : pression fournie par la pompe [Pa]

Hypothèse :

La pression du fluide à l'entrée du système de pompage (P_1) est égale à la pression atmosphérique.

Question 11 : **Calculer** la pression nécessaire à la pompe ΔP_{pompe} à l'aide du **DT 6** et de l'équation de Bernoulli généralisée ci-dessus.

Pour la suite du questionnement, le débit de la pompe sera pris égal à 39 m³·h⁻¹ et la pression nécessaire à la pompe à 2,8 bars.

La chaîne de puissance du système de pompage est présentée sur la Figure 10.

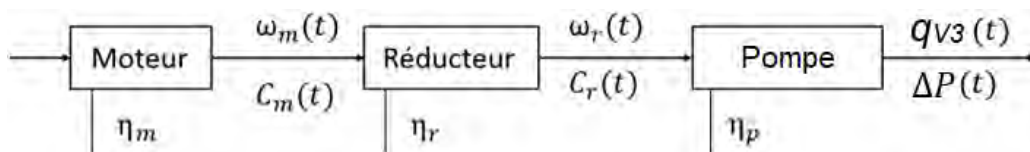


Figure 10 : chaîne de puissance de la pompe de l'alimentateur Prémix

Question 12 : À l'aide du document **DT 7**, **indiquer** les caractéristiques mécaniques nécessaires à l'arbre du système de pompage et **déterminer** le rendement de la pompe.

Hypothèse :

Rendement du réducteur égal à 0,98.

Question 13 : À l'aide du **DT 8**, **déterminer** le taux de charge du moto-réducteur d'entraînement de la pompe et le rendement global de l'ensemble {moto-réducteur + pompe}.

Question 14 : **Calculer** la consommation d'énergie électrique annuelle de la pompe de l'alimentateur Prémix et **compléter** cette valeur dans la ligne correspondante du tableau sur le **DR 3**. **Conclure** au regard de la consommation électrique globale de l'installation.

Partie 2. Comment déterminer la consommation énergétique du système de brassage du digesteur ?

Objectif : Afin d'homogénéiser la température et de permettre une production optimale de biogaz, des systèmes de brassage sont présents dans les digesteurs. L'objectif de cette partie est de procéder à la vérification du dimensionnement et d'estimer la consommation énergétique des agitateurs.

Id	Nom de l'exigence	Critère
1.3	Accélérer le processus de décomposition de la matière	Digestion anaérobie en régime de température mésophile (40°C)
1.3.4	Maintenir les conditions optimales de températures	La température doit être maintenue à 40°C
1.3.4.3	Homogénéiser la matière organique	Le brassage (agitation et recirculation) de la matière contribue à son réchauffement
1.3.4.3.2	Agiter la matière organique par intermittence	Deux agitateurs "paddle" par digesteur sont dimensionnés pour résister aux charges d'utilisation à une fréquence de rotation maximale de 10 tr·min ⁻¹ Agitation selon un cycle horaire et des fréquences de rotation prédéfinis Puissance d'agitation recommandée par l'US-EPA (agence américaine de la protection de l'environnement) inférieure à 8 W·m ⁻³

Tableau 4 : extrait du diagramme des exigences

2.1 Dimensionnement de la motorisation

La température dans le digesteur est une donnée essentielle de la production du biogaz. Trois capteurs, présents à différentes hauteurs dans le digesteur, permettent un contrôle permanent de la température. Deux systèmes de brassage sont installés dans chaque digesteur. Leur objectif est d'homogénéiser le mélange et de permettre à la température d'être maintenue constante.

Chaque agitateur est constitué d'un tube en acier entraîné en rotation par un motoréducteur. Le long de ce tube sont fixées 4 pâles se terminant par une plaque inclinée. Le dispositif étudié ici est présenté sur la Figure 11 et sur le **DT 9**.

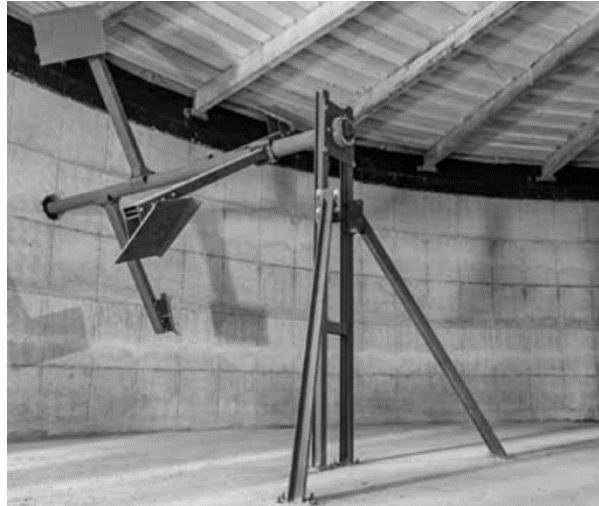


Figure 11 : arbre de brassage dans un digesteur vide

Hypothèses :

L'action du digestat sur la plaque s'applique sur la surface projetée de la plaque sur le plan (\vec{y}_1, \vec{z}_1) et est uniforme suivant \vec{z}_1 . L'étude se fait dans le plan (\vec{x}_1, \vec{y}_1) uniquement. Cette action est modélisée par une densité linéique d'effort $p(y)$ (exprimée en $N \cdot m^{-1}$) au point M comme présenté sur la Figure 12.

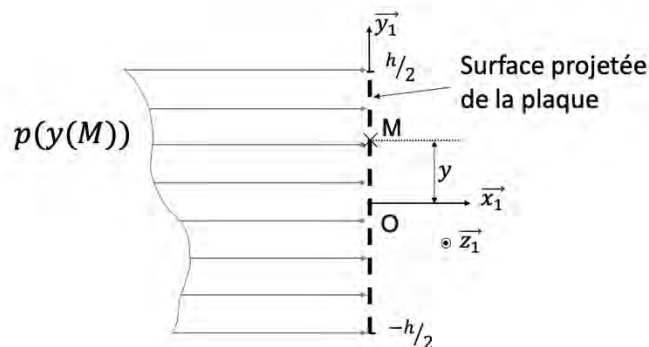


Figure 12 : modélisation de la densité de pression linéique sur la surface projetée de la plaque

Question 15 : À partir du DT 9 et par dérivation du vecteur position \overrightarrow{AM} , déterminer l'expression du vecteur vitesse du point M appartenant à la plaque 3 dans son mouvement par rapport au bâti en fonction de $\dot{\theta}$, a et y .

Un mobile se déplaçant dans un fluide subit une distribution de pression dont la résultante s'oppose au mouvement. La densité de pression élémentaire de traînée p est exprimée en fonction de la vitesse, de la forme du mobile et du fluide dans lequel il se déplace.

Pour la plaque 3, la résultante élémentaire s'écrit :

$$\overrightarrow{dF_{digestat \rightarrow plaque}(y)} = p(y) \cdot dy \cdot \vec{x}_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot (a + y)^2 \cdot dy \cdot \vec{x}_1$$

avec :

- $\overrightarrow{dF_{digestat \rightarrow plaque}}(y)$: résultante élémentaire exercée par le digestat sur la plaque en [N]
- $p(y)$: densité linéique d'effort exercée par le digestat sur la plaque en $[N \cdot m^{-1}]$
- ρ : masse volumique du digestat
- C_x : coefficient de trainée
- L : largeur suivant \vec{z}_1 de la surface projetée
- dy : élément de longueur élémentaire appartenant à la surface projetée

Données :

- vitesse angulaire en sortie du réducteur : $\dot{\theta}$ en $[rad \cdot s^{-1}]$
- masse volumique du digestat : $\rho = 960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- coefficient de trainée : $C_x = 1,2$
- $L = 0,8 \text{ m}$
- moment élémentaire au point O :

$$\overrightarrow{dM_{O,digestat \rightarrow plaque}} = \overrightarrow{OM} \wedge \overrightarrow{dF_{digestat \rightarrow plaque}}$$

- $\overrightarrow{OM} = y \cdot \vec{y}_1$ avec $y \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}\right]$

Question 16 : Déterminer l'expression du moment élémentaire au point O en fonction de $p(y)$, y et dy et des vecteurs du paramétrage.

L'action mécanique globale exercée par le digestat sur la plaque au point O peut alors être déterminée par intégration de l'effort et du moment élémentaire sur la hauteur de la plaque.

$$\{T_{digestat \rightarrow plaque}\} = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{F_{digestat \rightarrow plaque}} \\ \overrightarrow{M_{O,digestat \rightarrow plaque}} \end{array} \right\}_O = \left\{ \begin{array}{l} \int_{y \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}\right]} \overrightarrow{dF_{digestat \rightarrow plaque}} \\ \int_{y \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}\right]} \overrightarrow{dM_{O,digestat \rightarrow plaque}} \end{array} \right\}_O$$

Question 17 : Déterminer l'expression de l'effort global $\overrightarrow{F_{digestat \rightarrow plaque}}$ et le moment global $\overrightarrow{M_{O,digestat \rightarrow plaque}}$ au point O de l'action mécanique exercée par le digestat sur la plaque.

Question 18 : Déterminer l'expression du torseur de l'action mécanique globale du digestat sur la plaque au point A appartenant à l'axe de rotation de l'arbre de brassage. Justifier que le couple résistant global dû aux quatre plaques sur l'arbre de brassage a pour expression :

$$C_r = 2 \cdot \rho \cdot C_x \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \left(a^3 \cdot h + \frac{a \cdot h^3}{4} \right)$$

Hypothèses :

- Les différents solides sont considérés indéformables ;
- Les différentes liaisons du système sont considérées parfaites, sans jeux ni frottements ;
- L'action mécanique résultant de la pression du digestat sur les bras (hors plaque) est négligée.

Données :

- Inertie équivalente de l'ensemble en mouvement ramenée sur l'arbre de brassage : J_{eq}
- Actions mécaniques :
 - o Couple moteur s'exerçant sur l'arbre moteur : C_m
 - o Couple en sortie du réducteur s'exerçant sur l'arbre de brassage : C_e
 - o Couple résistant total exercé par le fluide sur l'arbre de brassage : C_r
- Le rendement du réducteur est de $\eta_r = 0,933$
- Le rapport de transmission du réducteur est de $i_{eff} = 100,8$
- Les caractéristiques de la motorisation choisie sont exposées dans le **DT 10**.

Question 19 : **Expliciter** la démarche (isolement, théorème, projection...) permettant de déterminer l'équation reliant le couple C_m aux différents paramètres connus de l'étude. **Appliquer** cette démarche et **en déduire** l'expression de C_m en fonction de J_{eq} , $\ddot{\theta}$, C_r , η_r et i_{eff} .

Au vu des accélérations du système, le choix du moteur est effectué en analysant uniquement le régime permanent (phase d'utilisation à vitesse constante).

Des mesures ont permis d'établir les profils du couple résistant ramené à l'arbre du moteur et de la puissance mécanique en sortie du moteur d'un agitateur en fonction de la fréquence de rotation, représentés sur le **DT 11**.

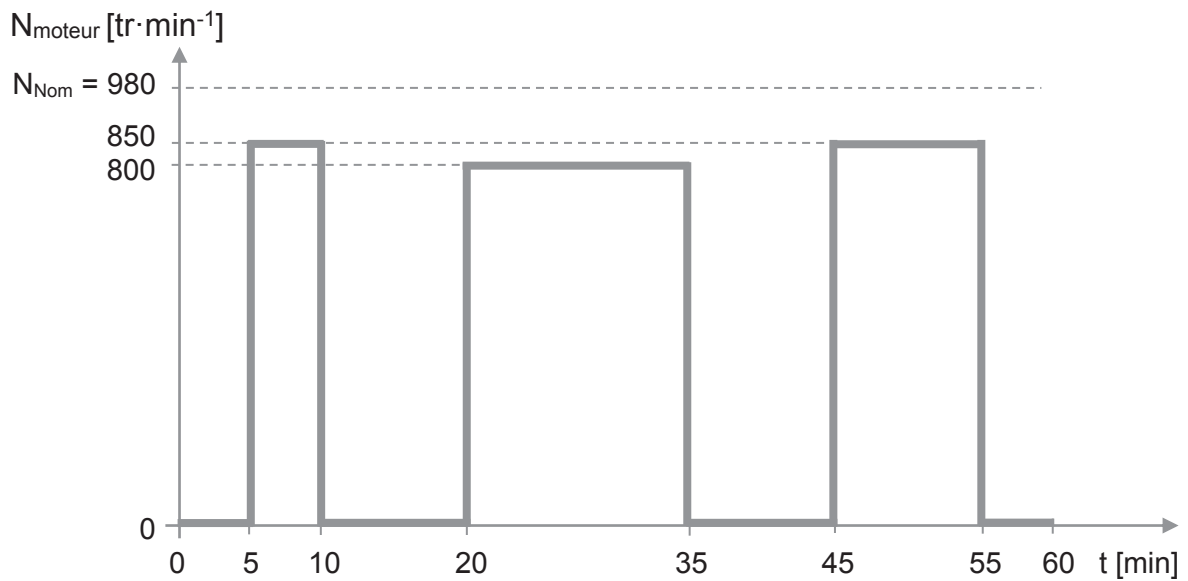
Question 20 : **Représenter** l'allure du couple moteur établi à la question 19 sur le **DR 4** puis **conclure** sur la validité du modèle analytique effectué.

Question 21 : **Justifier**, à partir du **DT 11**, pourquoi la fréquence de rotation du moteur en utilisation est limitée à $960 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

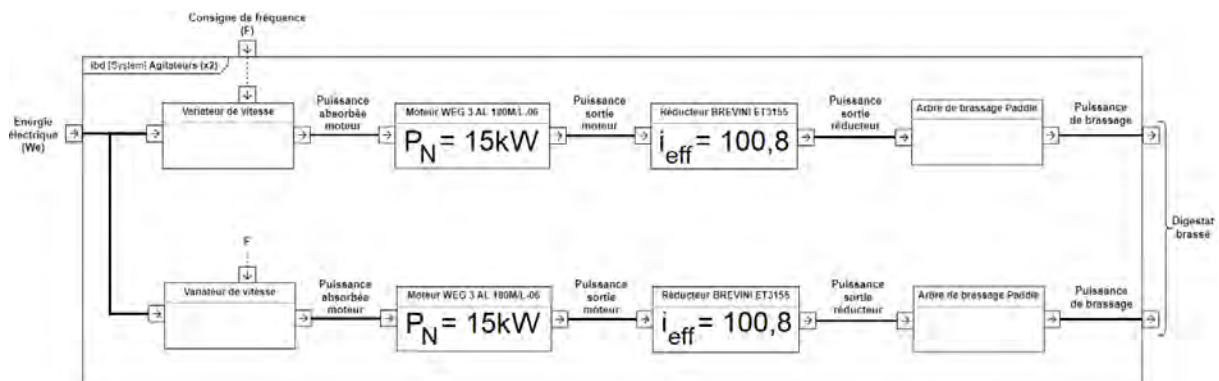
2.2 Bilan énergétique du système de brassage

L'agitation est un poste de dépense important pour les exploitants. La consommation d'énergie représenterait en effet entre **30** et **50** % de la consommation électrique globale de l'installation.

Les agitateurs sont programmés pour se déclencher automatiquement selon le cycle horaire suivant (Figure 13) :



Le diagramme de blocs interne des agitateurs dans un digesteur est présenté sur la Figure 14.



Question 22 : À partir des DT 10 et DT 11, déterminer la puissance moyenne absorbée lors d'un cycle horaire d'agitation (Figure 13) et vérifier que la puissance d'agitation respecte la recommandation de l'US-EPA, précisée dans l'exigence « Agiter la matière organique ».

Question 23 : Déterminer la consommation d'énergie électrique annuelle pour un agitateur. Compléter cette valeur dans le DR 3. Conclure au regard de la consommation électrique globale de l'installation.

Partie 3. Comment réduire la part d'autoconsommation de biogaz dans les digesteurs ?

Objectif : *L'objectif de cette partie est de réaliser le bilan thermique simplifié d'un digesteur afin d'en déduire, à l'aide d'un modèle multiphysique, la valeur d'autoconsommation de biogaz et d'estimer, au final, l'efficacité énergétique de l'installation.*

Id	Nom de l'exigence	Critère
1.3.	Accélérer le processus de décomposition de la matière	Digestion anaérobie en régime de température mésophile (40°C)
1.3.4	Maintenir les conditions optimales de température	La température doit être maintenue à 40°C
1.3.4.1	Homogénéiser la matière organique	Le brassage (agitation et recirculation) de la matière organique dans les digesteurs contribue à son réchauffement
1.3.4.1.1	Autoconsommer une partie du biogaz	Objectif visé : 5% d'autoconsommation du biogaz produit pour le chauffage des digesteurs et du post-digesteur
1.3.4.1.2	Récupérer la chaleur fatale de l'épurateur	Un échangeur de chaleur entre le compresseur de l'épurateur et la chaudière permet de récupérer la chaleur fatale : 39 kW
1.3.4.2	Capter l'énergie solaire	Le revêtement sélectif sur la surface de couverture permet de capter un maximum d'irradiation solaire
1.3.4.3	Chauffer la matière en digestion	La chaudière est dimensionnée pour compenser le déficit thermique "pertes – apports" dans les conditions les plus défavorables
1.3.4.4	Limiter les pertes thermiques	La structure est conçue pour limiter les pertes thermiques. Le radier et les parois sont isolés Le gazomètre est constitué d'une double membrane

Tableau 5 : extrait du diagramme des exigences

Afin d'accélérer le processus de décomposition naturelle de la matière en milieu anaérobie et d'optimiser ainsi la production de biogaz, il est nécessaire de maintenir une température constante de 40°C (process mésophile) dans les digesteurs et le post-digesteur.

Descriptif constructif des digesteurs (voir DT 12) :

- Diamètre intérieur des parois : $D_{int} = 22$ m
- Hauteur des parois : $h = 6$ m
- Température du sol : 8°C
- Température extérieure de référence : -15°C
- Caractéristiques du radier

Matériaux	Épaisseur E [cm]	Conductivité thermique λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Béton	15	1,4
Isolant	8	0,035

- Caractéristiques des voiles

Matériaux	Épaisseur E [cm]	Conductivité thermique λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Béton	23	1,4
Isolant	10	0,035

Coefficients d'échange thermique convectif utilisables :

- L'échange convectif des parois structurelles internes et externes du digesteur est négligé ;

Caractéristiques du biogaz :

- Production annuelle de biogaz du site de méthanisation : 2 704 365 Nm³

Caractéristiques de la matière organique introduite dans le digesteur :

- Capacité thermique massique de la matière organique : $C_{mo} = 3\,220 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Données concernant l'installation de chauffage des digesteurs

- Rendement global de l'installation de chauffage des digesteurs : $R_g = 85 \%$
- Pouvoir calorifique inférieur du biogaz produit : $PCI_{\text{biogaz}} = 5,5 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$
- Pouvoir calorifique inférieur du biométhane : $PCI_{\text{biométhane}} = 9,96 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$

Question 24 : Calculer le flux de chaleur perdu vers le sol de fondation ϕ_{radier} [W].

Les voiles des digesteurs présentent une forme cylindrique et dans ce cas, la loi de Fourier permettant d'exprimer le flux de chaleur à travers un matériau constituant la paroi de rayon x s'écrit :

$$\phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{avec} \quad S = 2\pi \cdot x \cdot h$$

En intégrant l'équation différentielle ci-dessus sur l'épaisseur x de l'un des matériaux constituant les voiles, le flux ϕ s'écrit :

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{r} \quad \text{avec} \quad r = \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{2\pi \cdot \lambda \cdot h} = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi \cdot \lambda \cdot h}$$

Note : r est appelée résistance thermique du matériau considéré [$K \cdot W^{-1}$]

Question 25 : En appliquant la relation précédente, pour chaque matériau constituant les voiles, **déterminer** le flux de chaleur perdu par les parois du digesteur en contact avec l'extérieur ϕ_{parois} [W].

L'introduction de la matière organique mélangée dans le digesteur s'effectue avec un débit massique moyen de $1,96 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ et à une température moyenne $\theta_{\text{matière}} = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Question 26 : Déterminer le flux de chaleur nécessaire $\phi_{\text{matière}}$ en [W] pour tenir compte de l'introduction de la matière organique dans le digesteur

Afin de prendre en compte l'ensemble des échanges thermiques et de prédire le comportement du système complet comprenant les deux digesteurs et le post-digesteur, un modèle multiphysique est proposé.

La variation de la température extérieure sur l'année obtenue par relevés météorologiques (voir Figure 15) est implémentée dans le modèle et permet d'obtenir l'évolution annuelle de la puissance de chauffage nécessaire au maintien en température des digesteurs et du post-digesteur présentée Figure 16.

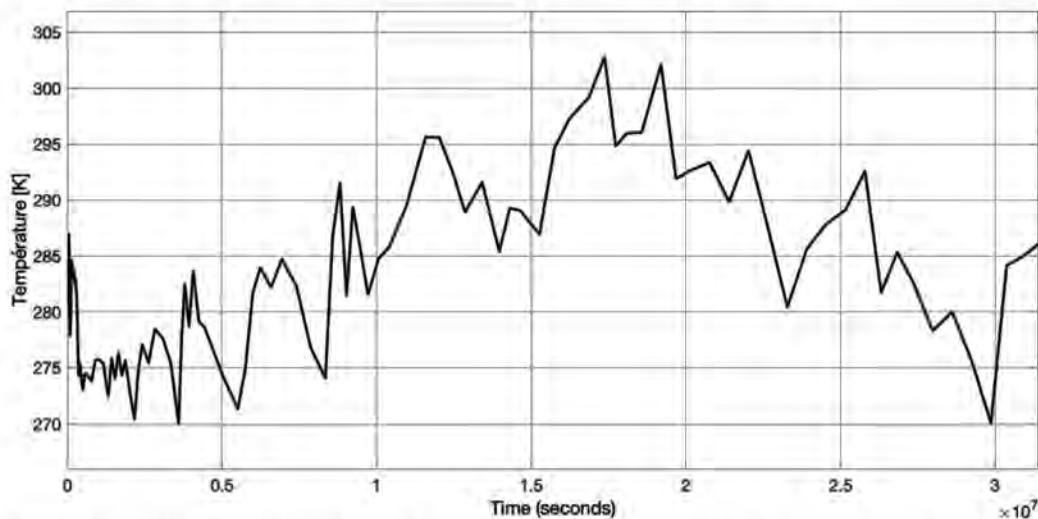


Figure 15 : variation annuelle de la température extérieure sur le site de Val-de-Briey

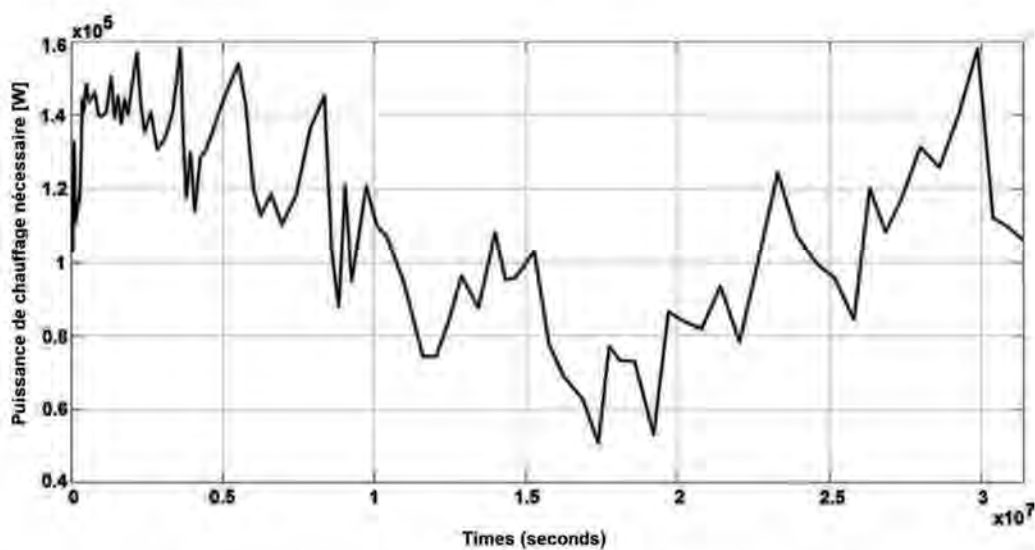


Figure 16 : variation annuelle de la puissance de chauffage nécessaire au maintien en température des digesteurs et du post-digesteur

Question 27 : Commenter les courbes obtenues (Figure 15 et 16) et proposer une méthode permettant d'obtenir le volume de biogaz autoconsommé annuellement par le site de méthanisation à partir de ces courbes et des données du sujet.

En appliquant la méthode adéquate, le modèle indique une part actuelle d'autoconsommation de 7,5 %.

Une solution permettant de limiter la part de biogaz autoconsommé consiste à réduire le flux de chaleur perdu par la bâche double enveloppe en plaçant une épaisseur d'isolant ajouré en partie supérieure des deux digesteurs.

Le post-digesteur n'est pas isolé.

Question 28 : À partir du tableau fourni des différents blocs Simscape et de la description de la couche supérieure du digesteur (voir **DT 12**), compléter le **DR 5** en y ajoutant les liens caractérisant les grandeurs échangées ainsi que les blocs conduction et convection représentant l'isolant ajouté en partie supérieure.

Le modèle multiphysique permet alors d'estimer le volume total de biogaz autoconsommé sur l'installation selon l'épaisseur d'isolant mise en œuvre (Figure 17).

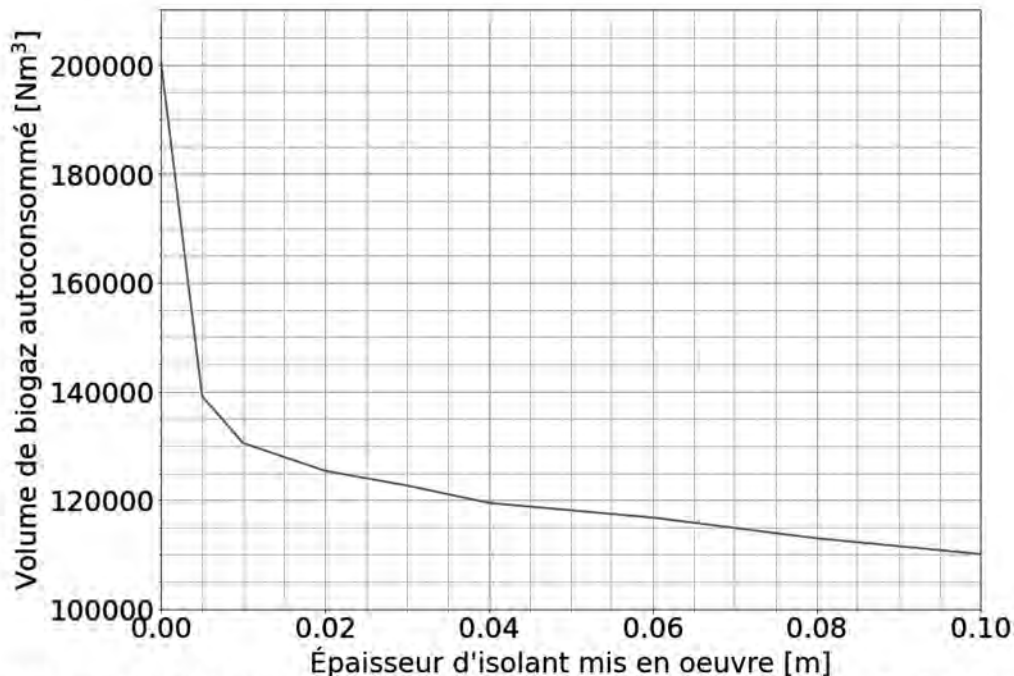


Figure 17 : volume de biogaz autoconsommé par l'installation selon l'épaisseur d'isolant ajouté aux digesteurs

Question 29 : Déterminer la nouvelle proportion de biogaz autoconsommé annuellement par le site si l'on place une épaisseur de 3 cm d'isolant ajouré en partie haute des digesteurs. **Conclure** sur l'objectif annoncé dans le diagramme des exigences.

Question 30 : À l'aide du **DR 3** et en tenant compte du rajout de 3 cm d'isolant sur la partie haute des digesteurs, **proposer** une méthode permettant de déterminer la valeur de l'efficacité énergétique du site de méthanisation. **Conclure**.

Partie 4. Concevoir une séquence pédagogique à partir d'une problématique industrielle de production biogaz

Dans l'objectif d'élaborer une fiche « connaissances » définie dans la fiche descriptive de séquence du **DP 1**, une intelligence artificielle a été utilisée avec le prompt suivant : *rédige une fiche « connaissances » d'une page format A4 de niveau première en enseignement de spécialité sciences de l'ingénieur sur les grandeurs d'effort, grandeur de flux, énergie, puissance, rendement.* Le document **DP 2** présente la réponse proposée par l'intelligence artificielle.

Question 31 : **Proposer** un ou deux prompts permettant d'ajouter à la fiche, la notion d'analogie des grandeurs et de détailler les équations liées aux différents transferts thermiques.

Question 32 : **Rédiger** la fiche « connaissances », au format d'une page A4, à destination des élèves lors de la phase « 6 – structuration des connaissances ».

Question 33 : **Compléter** le **DR 6** pour définir un protocole expérimental permettant de valider l'hypothèse que l'ajout d'un isolant en partie supérieure des digesteurs permet d'améliorer l'efficacité énergétique.

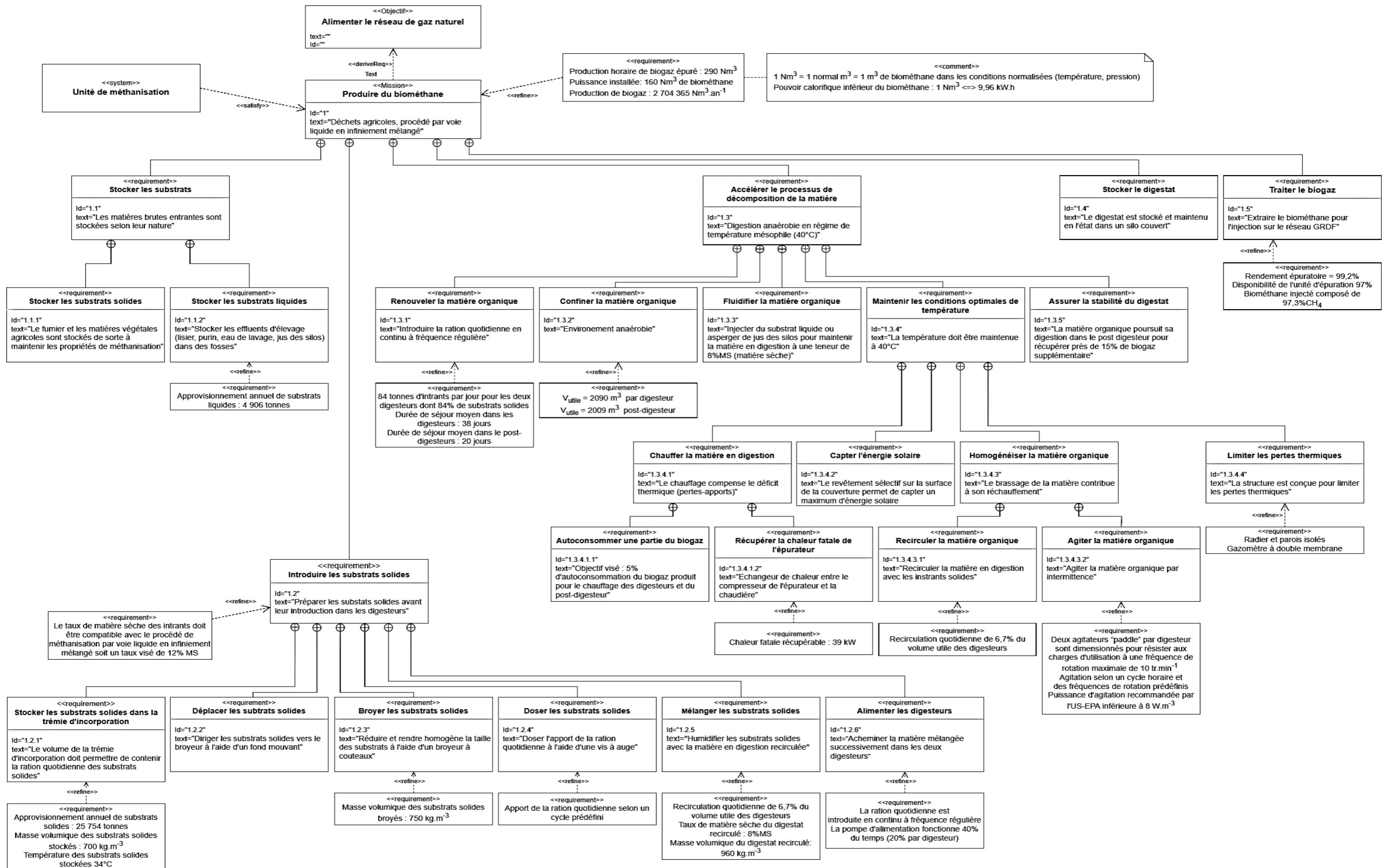
Cette activité à caractère expérimental permet aux élèves de développer les compétences ci-dessous :

Compétences	Compétences développées	Connaissances associées
EXPÉRIMENTER/SIMULER	Conduire des essais en toute sécurité à partir d'un protocole expérimental fourni	Règle de raccordement des appareils de mesure et des capteurs
	Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure	Gamme d'appareils de mesure et capteurs
	Identifier les erreurs de mesure	
COMMUNIQUER	Rendre compte de résultats	Tableau, graphique, diaporama, carte mentale

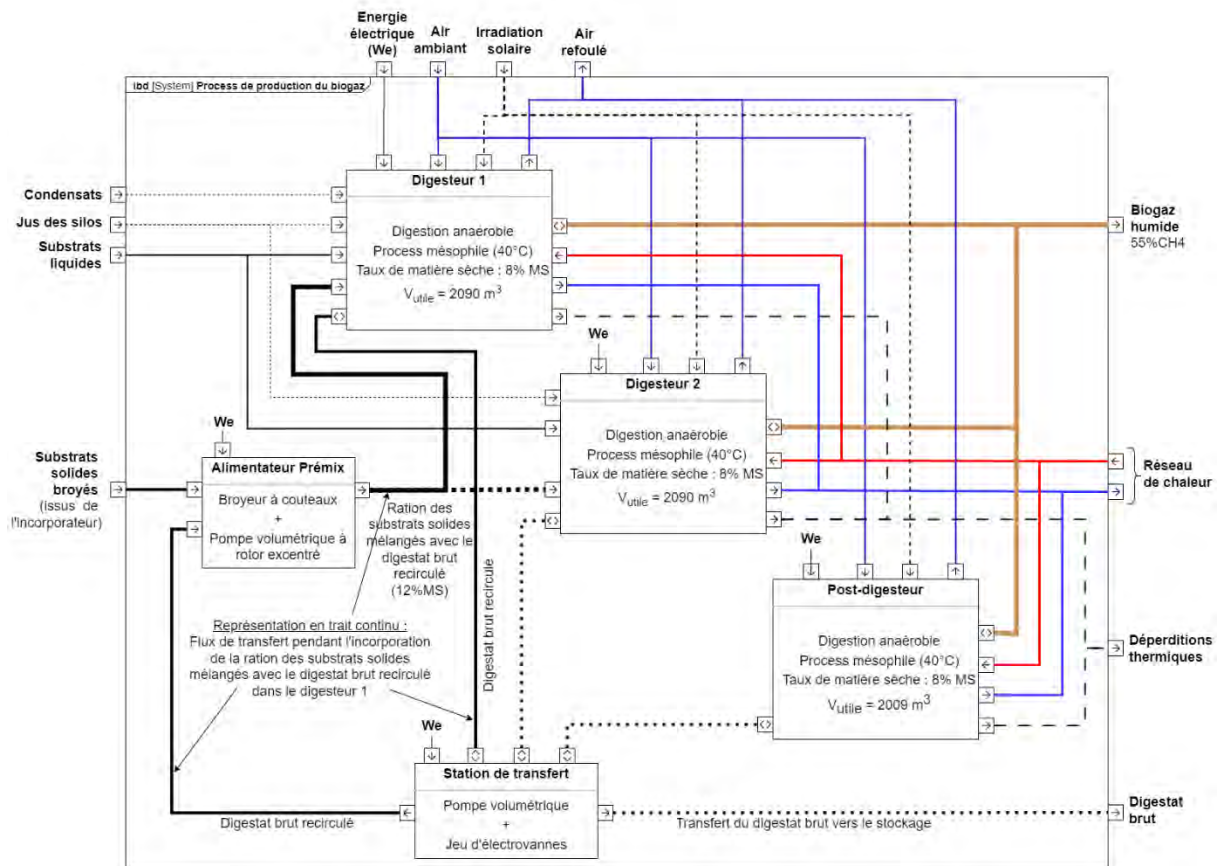
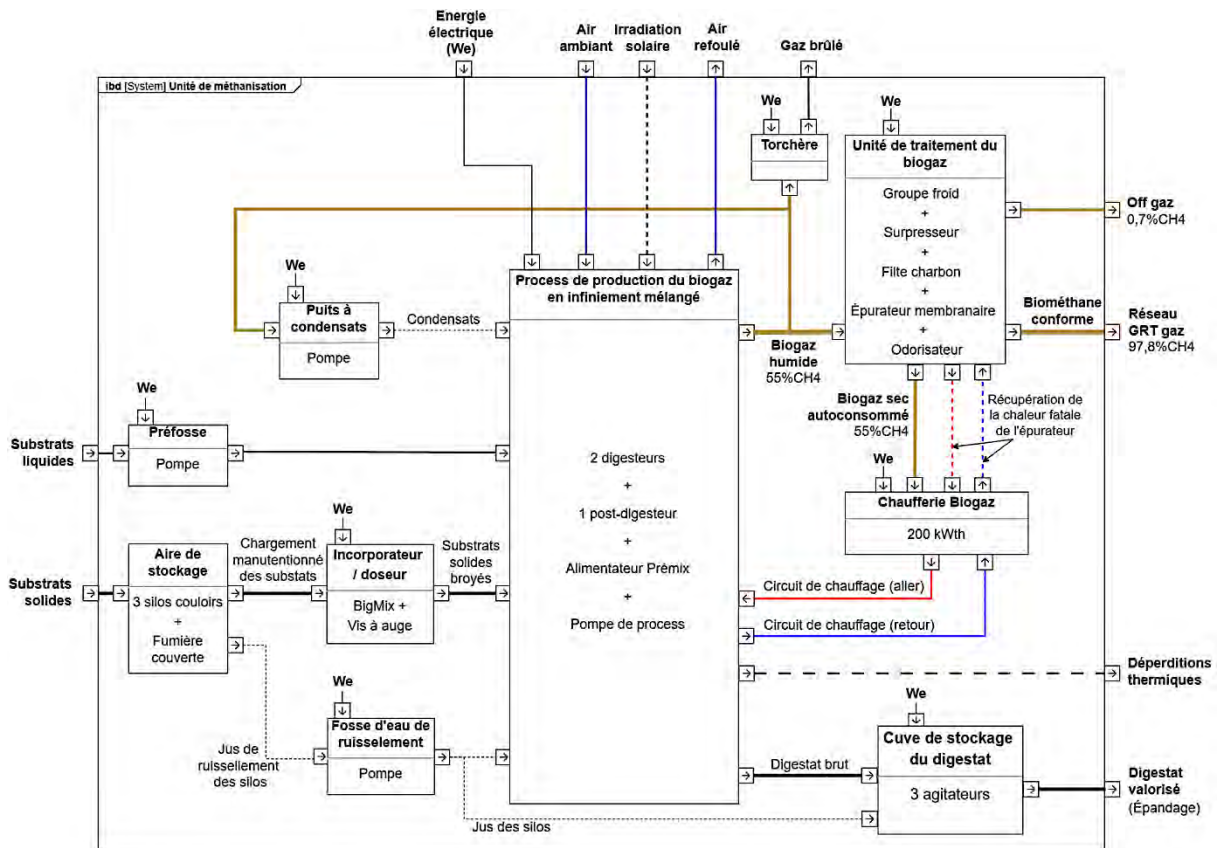
Question 34 : **Lister** des indicateurs d'évaluation permettant de mesurer le degré d'acquisition des compétences développées par ce protocole expérimental.

Question 35 : En listant les différents paramètres, **proposer** un modèle multiphysique correspondant à l'expérimentation, et une méthodologie permettant de valider et d'extrapoler le modèle à l'échelle du système réel.

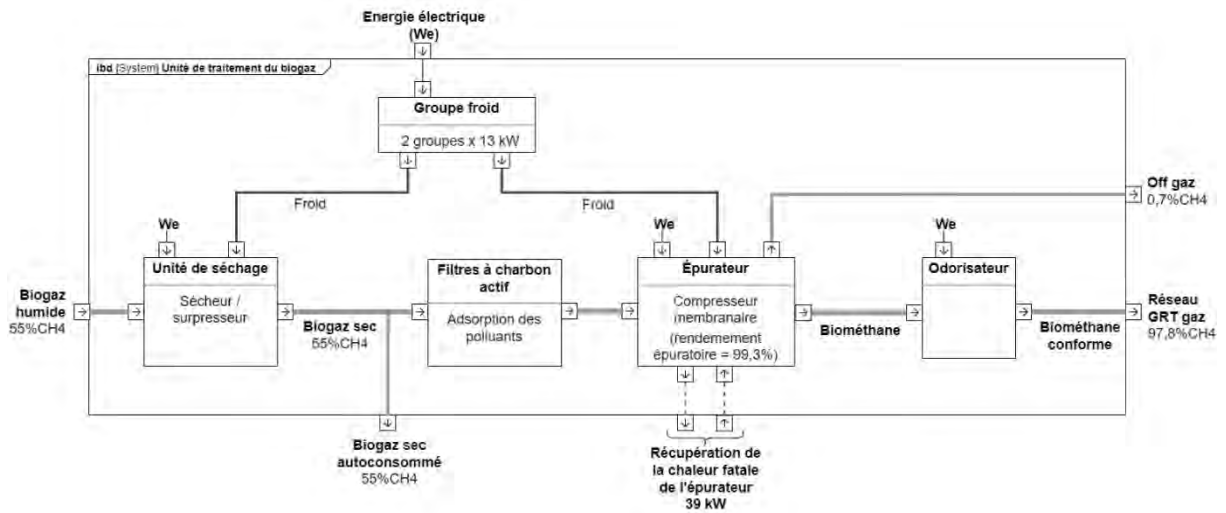
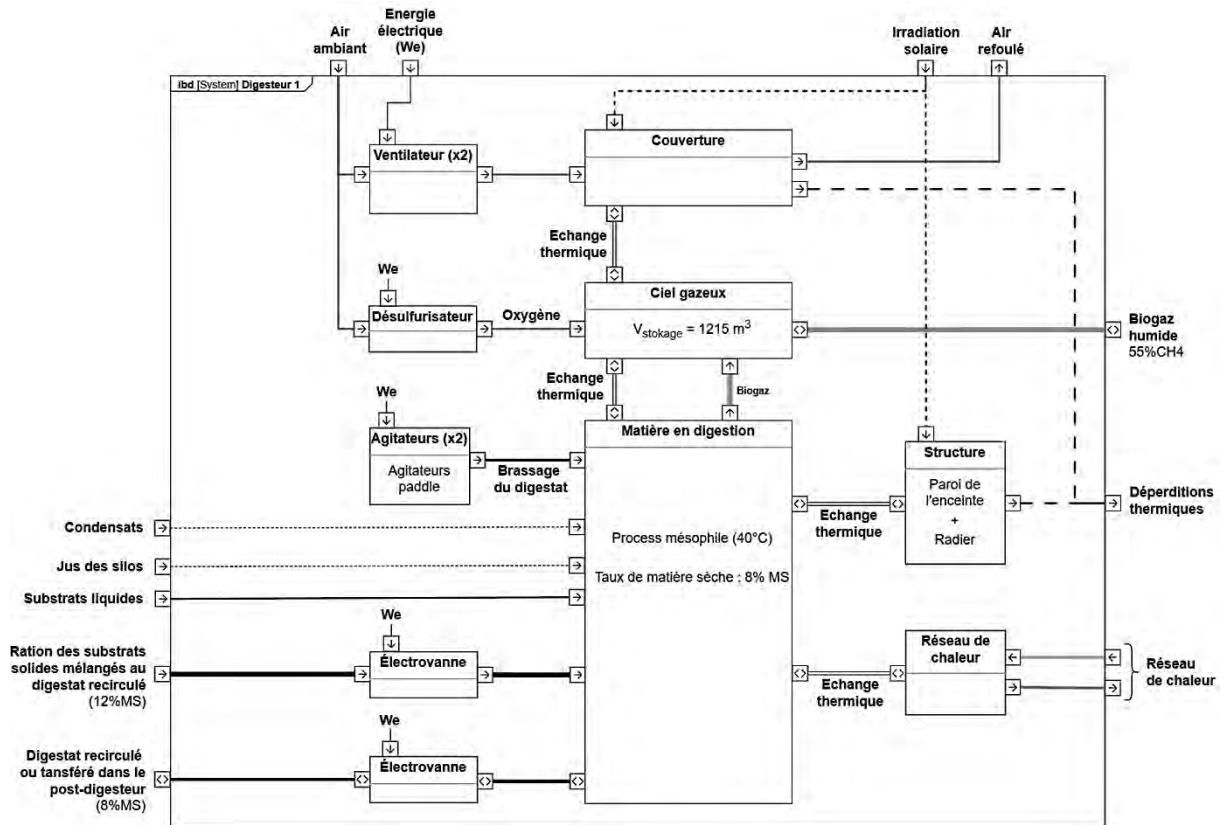
DT 1A : Diagramme des exigences SysML



DT 1B : Diagrammes de blocs internes SysML



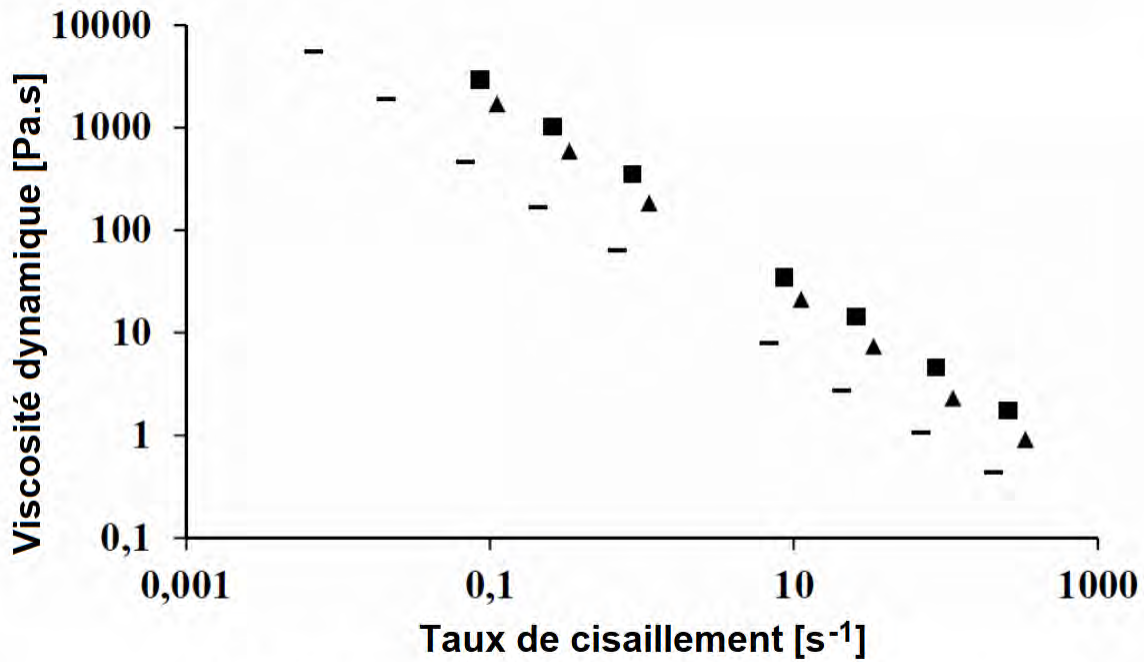
DT 1C : Diagramme de blocs internes SysML



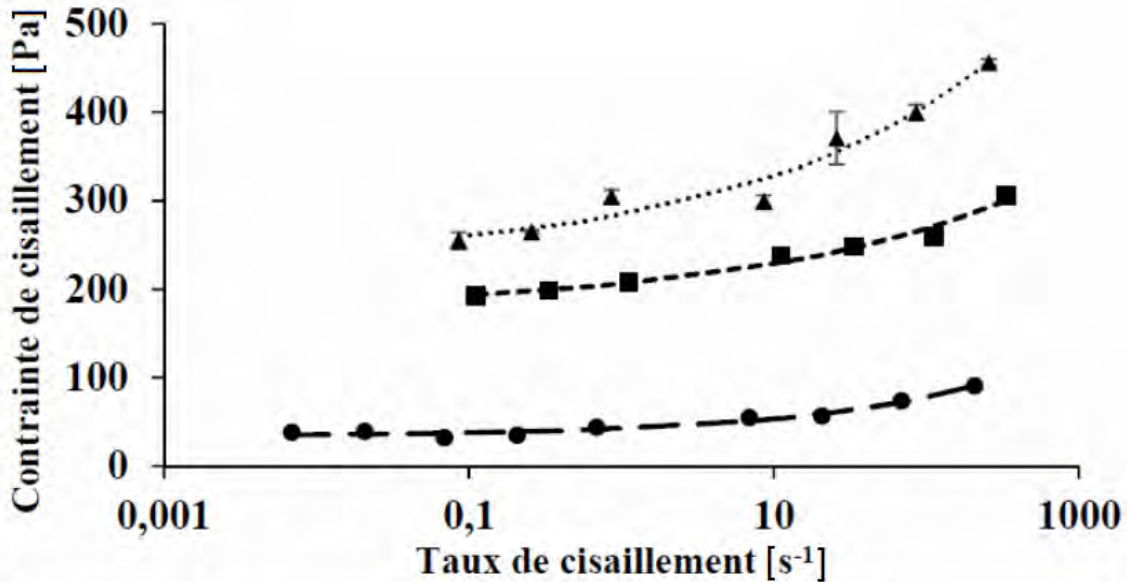
DT 2 : Modèles d'incorporateur Big-Mix

Type de modèle	Volume de chargement	A - Longueur totale	B - Largeur du récipient	C- Hauteur du seuil de chargement	D- Hauteur totale	Puissance d'entraînement des barres de poussée	Puissance d'entraînement de la vis de mélange
V45/300	44 m ³	7 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V50/300	52 m ³	8 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V60/300	60 m ³	9 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V65/300	68 m ³	10 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V75/300	76 m ³	11 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V80/300	84 m ³	12 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V90/300	92 m ³	13 m	3,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V100/400	103 m ³	10 m	4,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V100/300	105 m ³	13 m	3,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW
V110/300	114 m ³	14 m	3,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW
V120/300	123 m ³	15 m	3,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW
V120/400	125 m ³	12 m	4,0 m	3,3 m	3,9 m	7,5 kW	22 kW
V130/300	132 m ³	16 m	3,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW
V150/400	155 m ³	14 m	4,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW
V170/400	167 m ³	15 m	4,0 m	3,7 m	4,3 m	7,5 kW	22 kW

DT 3 : Caractéristiques de la matière organique à l'entrée du système de pompage Prémix



Taille moyenne des fibres : - 3 mm ▲ 5 mm ■ 8 mm



Taille moyenne des fibres :

—●— 3 mm HB	- - - 5 mm HB 8 mm HB
● 3 mm expér	■ 5 mm expér	▲ 8 mm expér

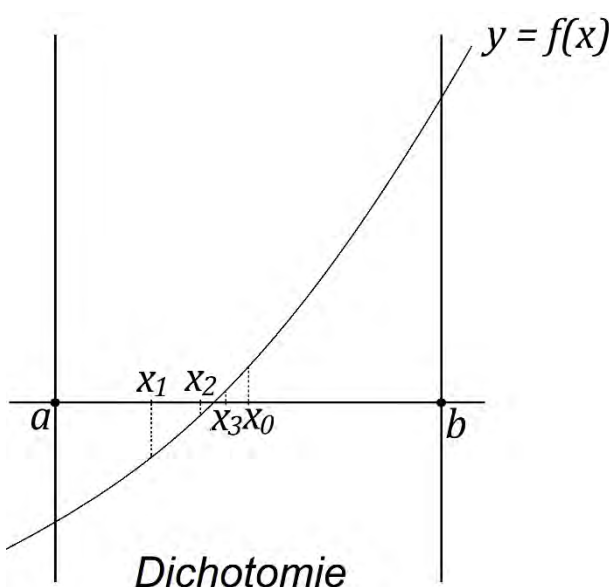
HB : courbe des valeurs approchées
expér : valeurs expérimentales

DT 4 : Algorithme de Dichotomie

Considérer un intervalle $[a, b]$ et une fonction f continue et monotone de $[a, b]$ dans \mathbb{R} . Supposer que $f(a) * f(b) < 0$ et que l'équation $f(x) = 0$ admet une unique solution α sur l'intervalle $]a, b[$.

La méthode de dichotomie consiste à construire une suite (x_n) qui converge vers α de la manière suivante :

Initialisation : considérer x_0 le milieu de $[a, b]$. La racine se trouve alors dans l'un des deux intervalles $]a, x_0]$ ou $]x_0, b]$ ou bien elle est égale à x_0 .



- Si $f(a) * f(x_0) < 0$, alors $\alpha \in]a, x_0]$.
On pose $a_1 = a$ et $b_1 = x_0$.
- Si $f(a) * f(x_0) = 0$, alors $\alpha = x_0$.
- Si $f(a) * f(x_0) > 0$, alors $\alpha \in]x_0, b]$.
On pose $a_1 = x_0$ et $b_1 = b$.

alors x_1 le milieu de $[a_1, b_1]$.

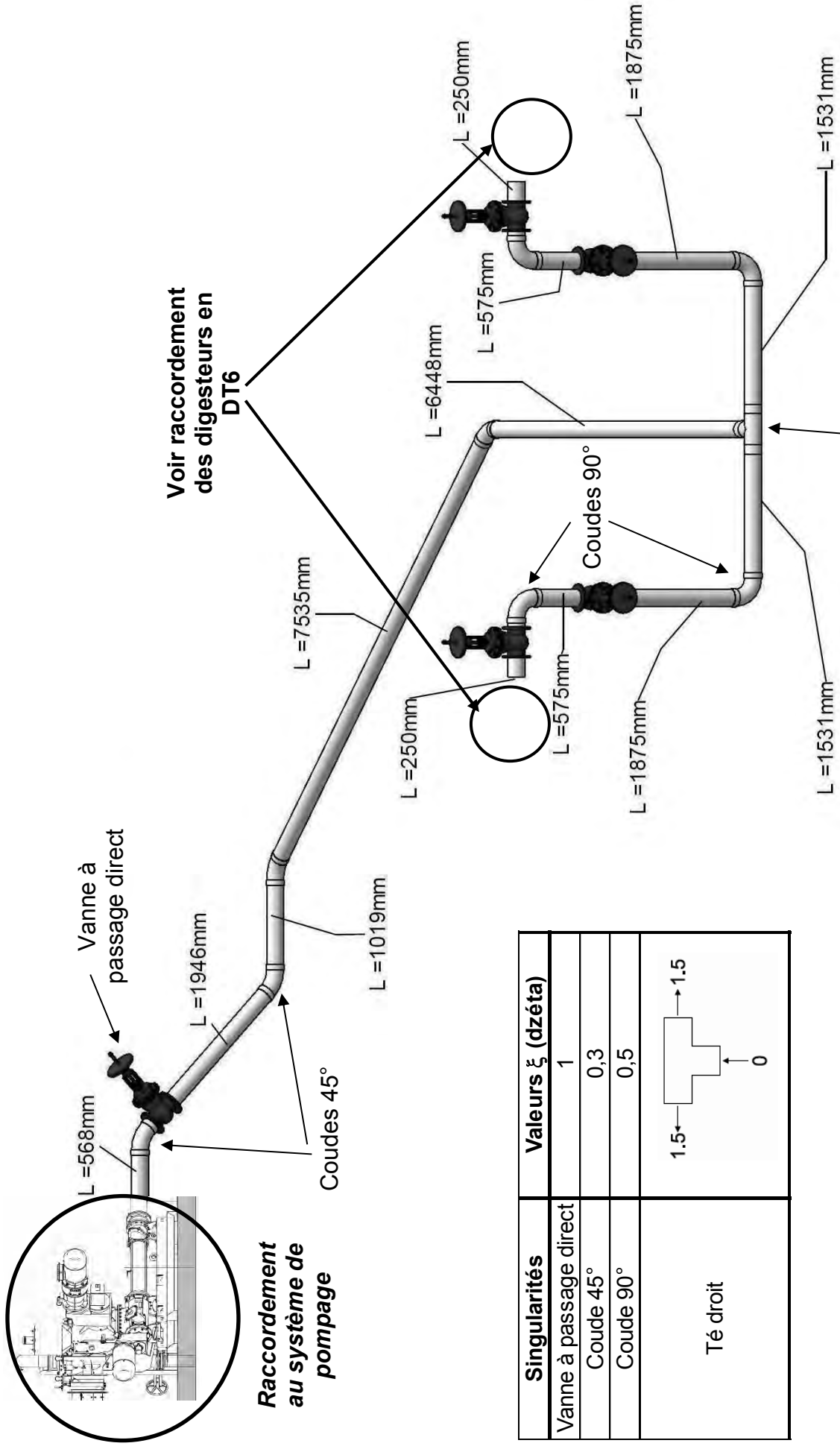
d'où la suite

$$x_0 = \frac{(a+b)}{2}, \quad x_1 = \frac{(a_1+b_1)}{2}, \quad x_2 = \frac{(a_2+b_2)}{2}$$

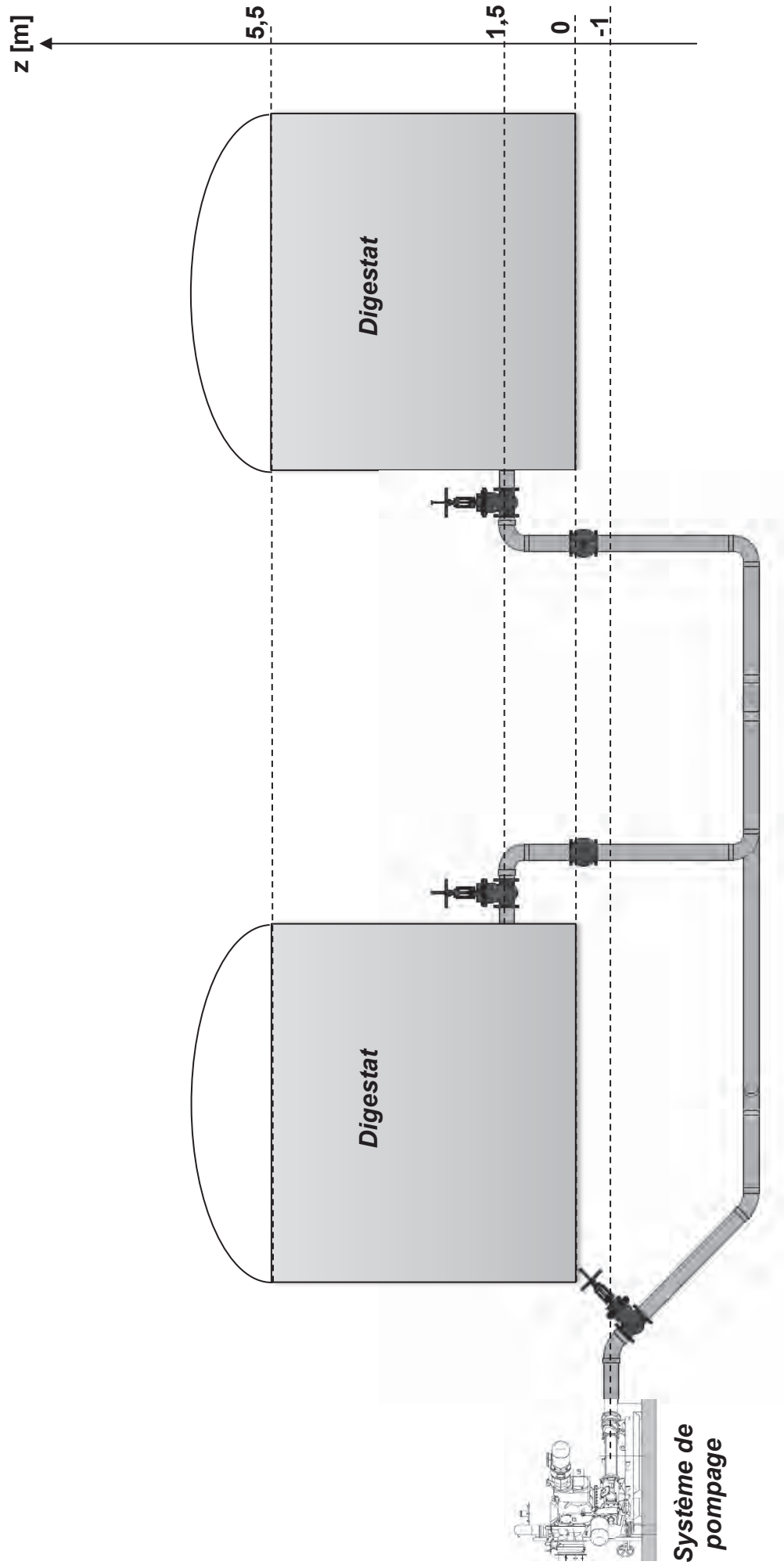
$$\text{telle que } |\alpha - x_n| \leq \frac{(b-a)}{2^{n+1}}.$$

Étant donné une précision ε , cette méthode permet d'approcher α en un nombre prévisible d'itérations.

DT 5 : Réseau hydraulique d'alimentation en matière organique des deux digesteurs



DT 6 : Coupe sur principe de raccordement hydraulique des digesteurs



Tournez la page S.V.P.

DT 7 : Courbes caractéristiques du système de pompage de l'alimentateur Prémix

Courbes caractéristiques

série de modèles: CC55-M1

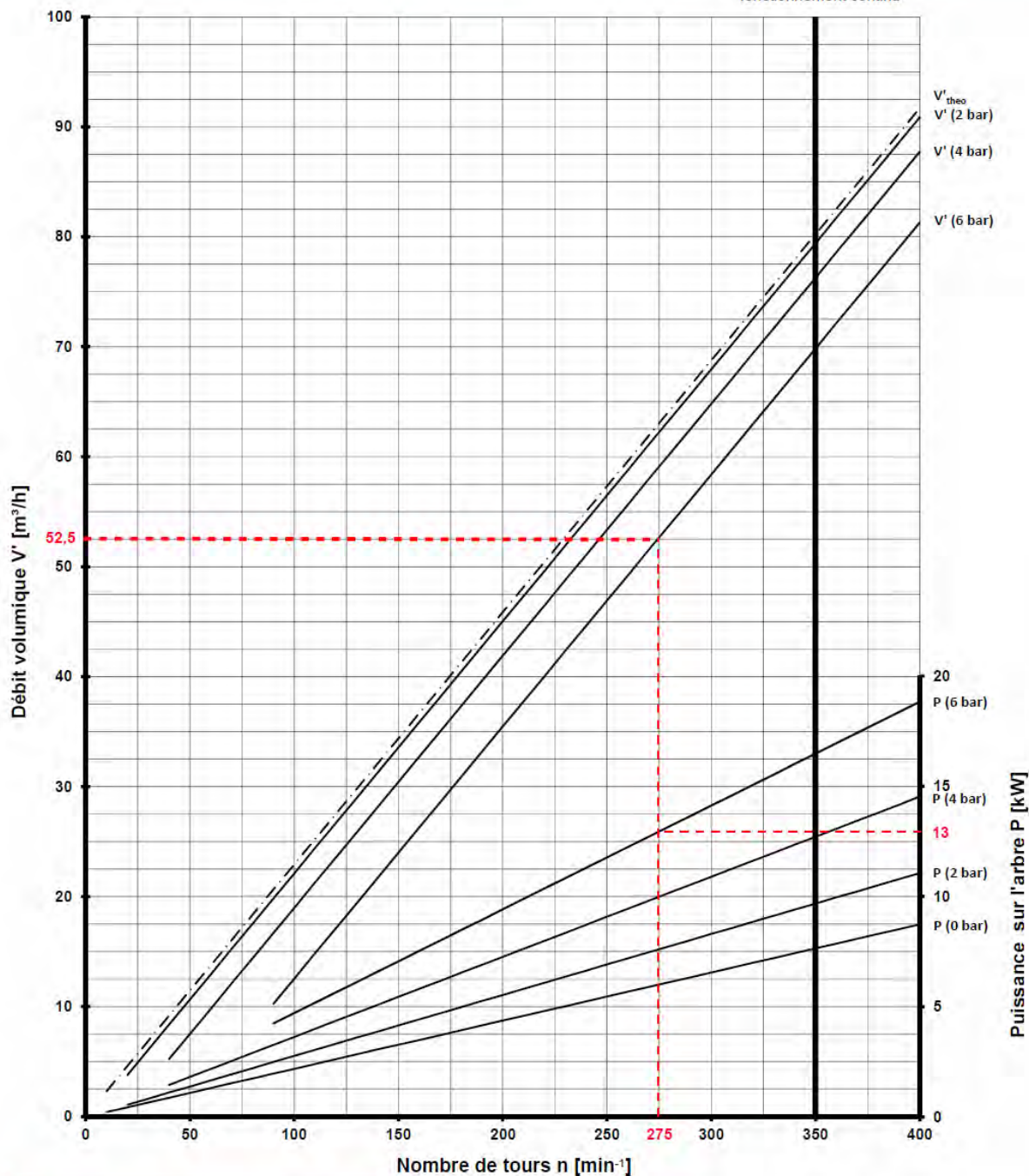


VOGELSANG

ENGINEERED TO WORK

Couple de démarrage requis T_A : 532 Nm

Vitesse maximale en fonctionnement continu



Exemple d'utilisation :
 Pour un débit de **52,5 [m³/h]** et une pression de **6 [bar]**,
 on obtient :
 - un nombre de tours de **275 [min⁻¹]**
 - une puissance sur l'arbre de **13 [kW]**

¹⁾ Puissance de fonctionnement requise sur l'arbre de la pompe
²⁾ Valeurs basées sur un fluide à 20°C

Stand: 26. April 2016; CAPSpro Version 4.01.08 veröffentlicht am 24. März 2016

Vogelsang GmbH & Co. KG, Holthöge 10-14, DE-49632 Essen (Oldenburg)

DT 8 : Caractéristiques du moto-réducteur de la pompe de l'alimentateur Prémix

Caractéristiques du moteur 160 LP/4



IE3

1500 1/min
50 Hz

230/400 V & 400/690 V
4 - pôles

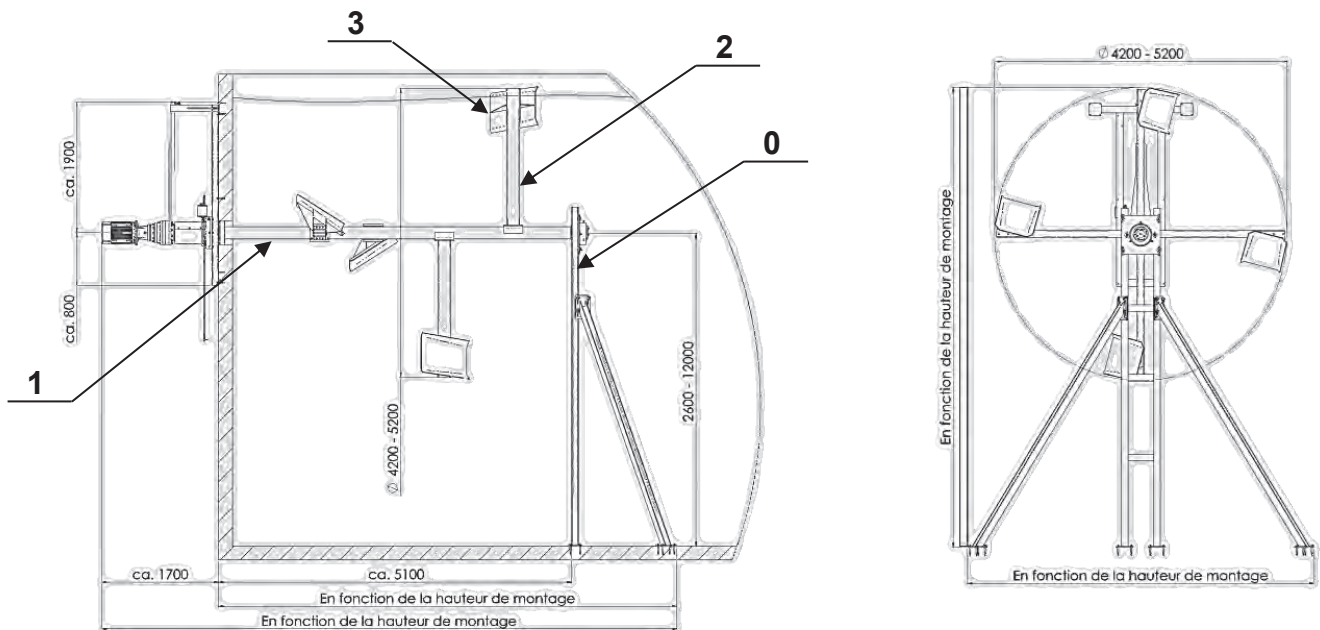
Type	IE3		M_N	I_N			$\cos \varphi$	η			M_A/M_N	M_K/M_N	I_A/I_N	J	kg
	P_N	n_N		230V	400 V	690 V		1/2x P_N	3/4x P_N	4/4x P_N					
	[kW]	[1/min]		[A]	[A]	[A]		[%]	[%]	[%]					
160 LP/4	15,0	1465	97,8	48,3	27,9	16,1	0,85	92,3	92,8	92,3	3,8	4,3	9,1	0,092	122

Caractéristiques du moto-réducteur NORD SK 4282A - 160 LP/4 TF

Moto-réducteur SK 4282A - 160LP/4 TF

Désignation du produit	Arbres Parallèles MONOBLOC
Vitesse d'entrée	1465 tr/min
Type d'alimentation	Alimentation directe réseau - Compatible alimentation par variateur
Rapport de réduction	5.43
Vitesse de sortie	269 tr/min
Facteur de service	1.9
Couple de sortie	532 Nm
Charge radiale FR max (si FA=0)	5.8 kN
Charge axiale FA max (si FR=0)	10.2 kN
Puissance	15 kW
Tension	400/690 V
Fréquence	50 Hz
Classe de rendement énergétique	IE3
Courant nominal 1	27.9 A
Courant nominal 2	16.1 A
Cos phi	0.85
Service	Service S1
Protection	Protection IP55 (IP55)
Classe d'isolation	F
Position de montage	M1

DT 9 : Dessin technique et représentation cinématique de l'arbre de brassage



Dessin technique du fabricant de l'arbre de brassage

Les longueurs sont données dans un intervalle et dépendent des sites d'utilisation

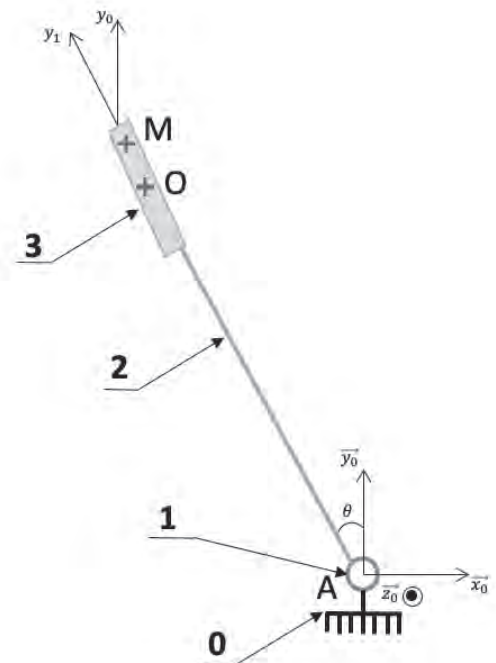
L'arbre de brassage **1** est en liaison pivot avec le bâti **0** autour de l'axe (A, \vec{z}_0) .

On note $\theta = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$ l'angle de rotation de l'arbre.

L'ensemble $\Sigma = \{1 + 2 + 3\}$ est une classe d'équivalence, chaque solide étant encasté avec les autres.

Notations :

- $\vec{AO} = a \cdot \vec{y}_1$ avec $a = 1,8 \text{ m}$
- $\vec{OM} = y \cdot \vec{y}_1$ avec y la composante sur \vec{y}_1 du point M fictif
- Hauteur de la plaque : $h = 0,6 \text{ m}$



DT 10 : Caractéristiques du moto-réducteur d'un agitateur

Caractéristiques du moteur WEG 3 AL 180M/L-06

FICHE TECHNIQUE

Moteurs Electriques Triphasés - Rotor à cage



Client : _____

Gamme de moteur : 00121 IE2 Three-Phase

Code produit : 12655767

<p>Carcasse : 180M/L Puissance nominale : 15 kW (20 HP) Pôles : 6 Fréquence : 50 Hz Tension à pleine charge : 200/400/690/400 V Courant à pleine charge : 59.6/29.8/17.3/29.8 A Courant de démarrage : 501/250/145/250 A Intensité de démarrage : 8.4 Courant à vide : 32.0/16.0/9.28/16.0 A Vitesse à pleine charge : 980 rpm Glissement : 2.00 % Couple à pleine charge : 146 Nm Couple de démarrage : 250 % Couple maximum : 370 % Classe d'isolation : F Facteur de service : 1.00 Moment d'inertie (J) : 0.2705 kgm² Type : N</p>	<p>Temps de blocage du rotor : 10s (à froid) 6s (à chaud) Echauffement : 80 K Service : S1 Température ambiante : -20°C à +40°C Altitude : 1000 m Degré de protection : IP55 Type de refroidissement : IC411 - TEFC Forme : B5T Sens de rotation¹ : Les deux sens de rotation Bruit² : 56.0 dB(A) Méthode de démarrage : Démarrage direct Poids approximatif³ : 156 kg</p>
--	--

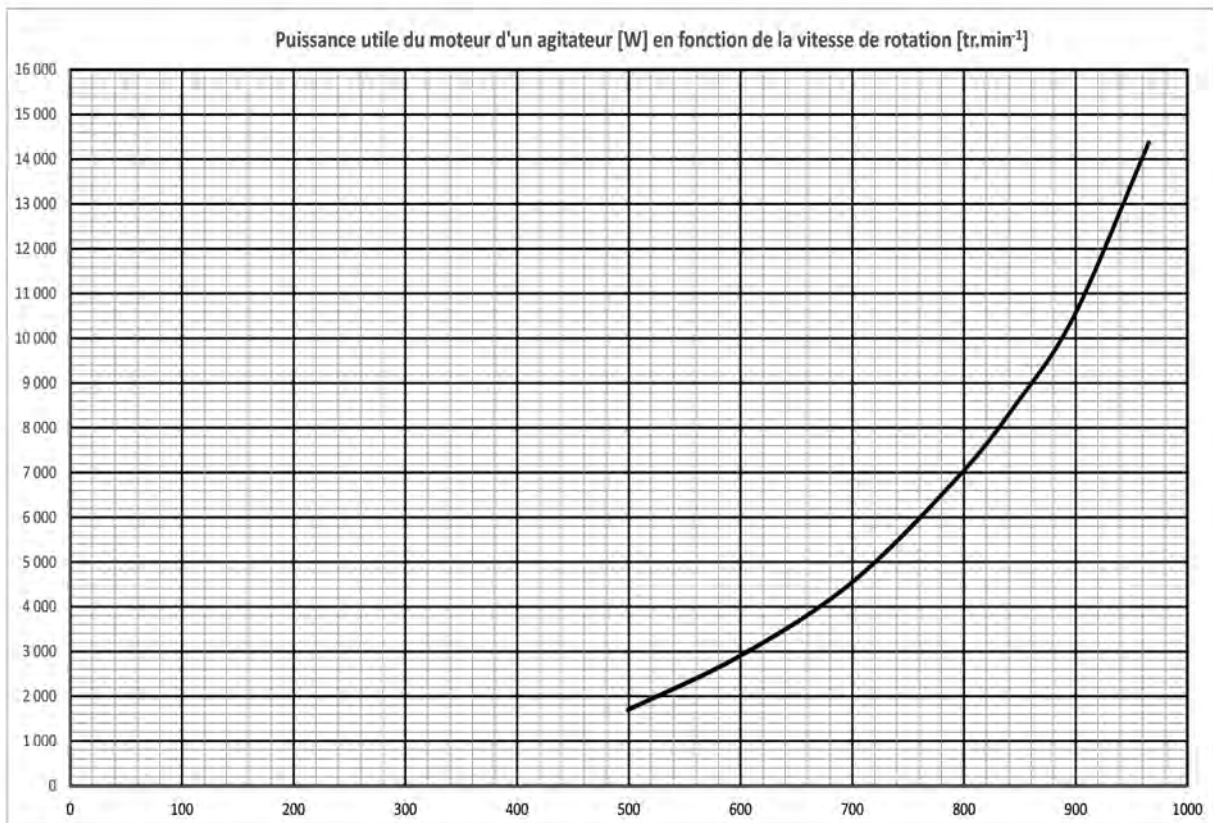
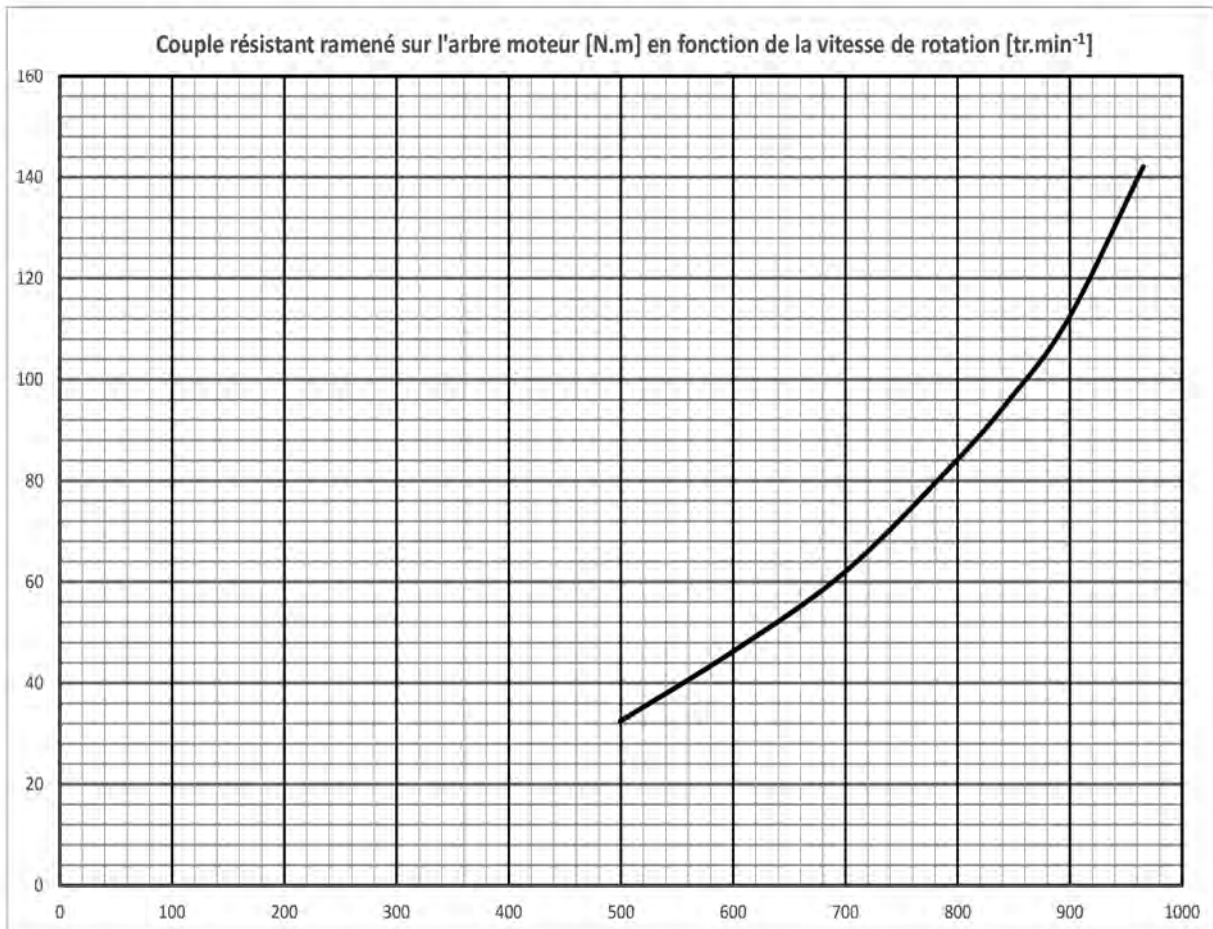
	50%	75%	100%	Efforts sur l'embase
Puissance nominale				Traction maximum : 7038 N
Rendement (%)	87.0	89.0	89.7	Compression maximum : 8567 N
Cos Φ	0.61	0.73	0.81	

Caractéristiques du réducteur BREVINI ET3155

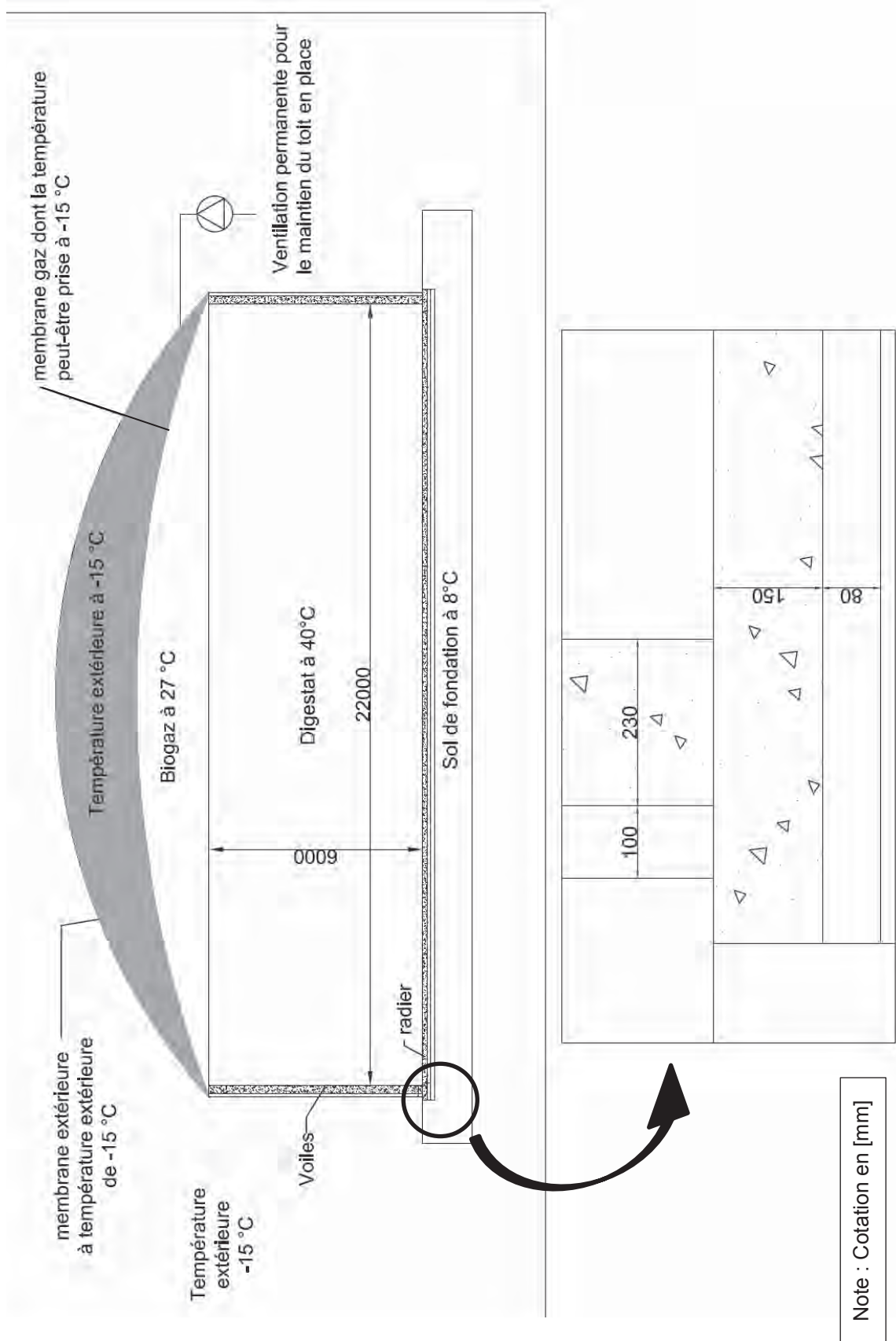


i_{eff}	1500			1000			500			T_{2max} [Nm]	P_T [kW]
	n_2 [rpm]	T_2 [Nm]	P_2 [kW]	n_2 [rpm]	T_2 [Nm]	P_2 [kW]	n_2 [rpm]	T_2 [Nm]	P_2 [kW]		
ET 3155											
100.8	14.9	12624	19.7	9.9	13471	14.0	5.0	15388	8.0	20000	15

DT 11 : Profils du couple résistant ramené sur l'arbre moteur et de la puissance utile du moteur d'un agitateur



DT 12 : Coupe sur digesteur



DP 1A : Contexte pédagogique

FICHE DESCRIPTIVE - SÉQUENCE SI

THÈME DE LA SÉQUENCE <i>(Choisir un thème porteur de sens)</i>				TRANSITION ÉNERGÉTIQUE								
TITRE DE LA SÉQUENCE <i>(une problématique liée à un enjeu de société)</i>				Comment récupérer l'énergie « perdue » d'un système ?								
BLOC DE COMPÉTENCES				Analyser et modéliser les transferts d'énergie								
SUPPORTS				Unité de méthanisation / Véhicule hybride / Chaudière cogénération								
Situation dans la progression	1ère	Rentrée	x2xxxx	Toussaint	xxxxxx	Noël	xxxxxx	Hiver	xxxxxx	Printemps	xxxxxx	Été
	Tale		xxxxxx		xxxxxx		xxxxxx		xxxxxx			

Effectif classe	20	Effectif réduit	20	Durée	12 h	3 semaines
------------------------	----	------------------------	----	--------------	------	-------------------

Compétences	Compétences développées	Connaissances associées
ANALYSER	Caractériser la puissance et l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un produit ou d'un système Repérer les échanges d'énergie sur un diagramme structurel	Grandeurs physiques (mécanique, électrique, thermique ...) mobilisées par le fonctionnement d'un produit Grandeurs d'effort et de flux liées à la nature des procédés Rendements et pertes
MODÉLISER / RÉSOUDRE	Caractériser les grandeurs physiques en entrées/sorties d'un modèle multi-physique traduisant la transmission de puissance	Grandeur effort, grandeur flux Énergie Puissance instantanée, moyenne Réversibilité de la chaîne de puissance
MODÉLISER / RÉSOUDRE	Associer un modèle aux composants d'une chaîne de puissance	Sources parfaites de flux et d'effort Interrupteur parfait Modèle associé aux composants élémentaires de transformation, de modulation, de conversion ou de stockage de l'énergie

DP 1B : Contexte pédagogique

Les compétences EXPÉRIMENTER/SIMULER/COMMUNIQUER sont mobilisées de manière transversale sur l'ensemble des séquences.

Organisation de la séquence				
Type d'activité	Durée	Nbre élèves	Descriptif	Lieu
1 - Activation	30 min	20	Vidéo « transition énergétique » Brainstorming « idée pour réussir la transition énergétique » => récupération de l'énergie perdue	Salle TP
2 - Pratique	1,5h	20	TP1 : unité de méthanisation Ou TP2 : véhicule hybride	Salle TP
3 - Pratique	1,5h	20	TP3 : Chaudière cogénération Ou TP4 :	Salle TP
4 - Structuration des connaissances	30 min	20	Rendre compte de résultats, organiser et synthétiser les résultats	Salle TP
5 - Structuration des connaissances	1,5h	20	Synthèse des TP – présentation des travaux par les élèves	Salle TP
6 - Structuration des connaissances	30 min	20	Fiche connaissance sur les grandeurs d'effort, grandeur de flux, énergie, puissance, rendement.	Salle TP
7 - Travaux dirigés	2h	20	Étude chaîne de puissance avec récupération d'énergie (véhicule électrique, tram, etc.)	Salle cours
8 - Évaluation sommative	2h	20	Écrit : à partir de modèles multi-physiques <ul style="list-style-type: none"> - identifier les grandeurs de flux et d'effort ; - déterminer le rendement d'une chaîne de puissance. 	Salle cours
9 - Correction	1h	20		Salle cours
10 - Remédiation	1h	20	En fonction des résultats	Salle cours

DP 2 : Réponse d'une intelligence artificielle

Fiche de connaissances - Niveau Première

Grandeurs d'effort, grandeurs de flux, énergie, puissance, rendement

Grandeurs d'effort et de flux

Les grandeurs d'effort sont des grandeurs qui caractérisent l'intensité d'une action mécanique, électrique ou thermique. Elles s'expriment en unités de force (N), de tension (V), de pression (Pa), etc.

Les grandeurs de flux caractérisent le débit ou le taux de transfert d'une grandeur physique. Elles s'expriment en unités de vitesse (m/s), d'intensité électrique (A), de débit thermique (W), etc.

Énergie

L'énergie est la capacité à produire un travail ou un changement. Elle s'exprime en joules (J) et peut prendre différentes formes : mécanique, électrique, thermique, etc. L'énergie se conserve lors des transformations.

Puissance

La puissance est le taux de transfert d'énergie. Elle s'exprime en watts (W) et correspond à la quantité d'énergie transférée par unité de temps. La puissance est le produit d'une grandeur d'effort et d'une grandeur de flux.

Rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie utile en sortie d'un système et l'énergie totale fournie en entrée. Il s'exprime en pourcentage (%) et permet d'évaluer l'efficacité d'un système. Un rendement élevé indique une bonne conversion de l'énergie.

En résumé, les grandeurs d'effort et de flux permettent de caractériser les interactions physiques. L'énergie représente la capacité à produire un travail, tandis que la puissance en est le taux de transfert. Le rendement évalue l'efficacité de la conversion énergétique d'un système.

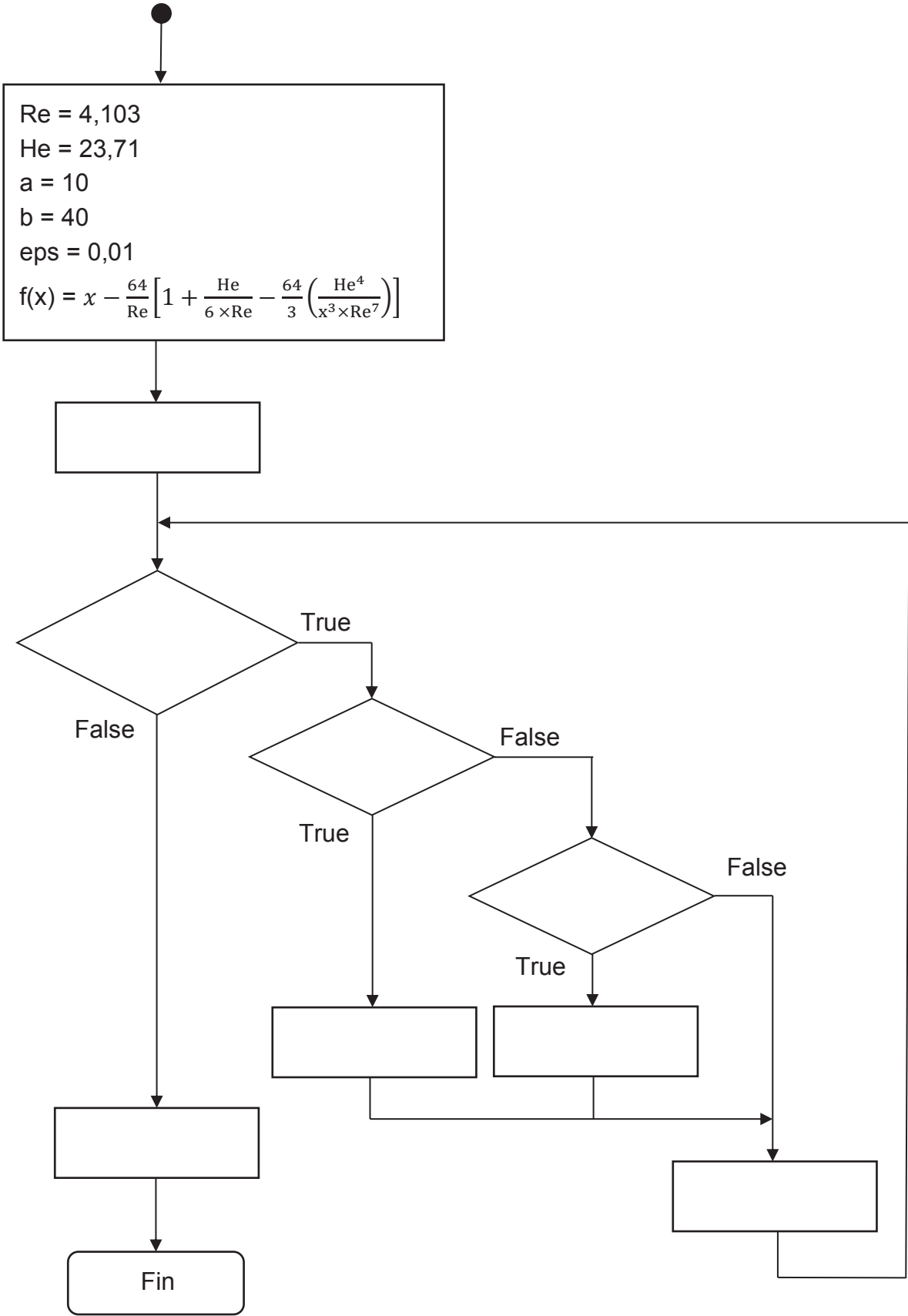
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR 1 (Question 1)

Approvisionnement annuel de l'unité de méthanisation

Approvisionnement annuel de l'unité de méthanisation de Val de Briey									
Substrats	Répartition des substrats %	Quantité de matière brute [tMB/an]	Teneur en matière Sèche [%MS]	Taux de matière Volatile [%MV]	Taux de biogaz [Nm ³ Biogaz / tMB]	Production de biogaz [Nm ³ Biogaz]	Potentiel méthanogène (PBM) [Nm ³ CH ₄ / tMV]	Production de biométhane (sans autoconsommation) [Nm ³ CH ₄]	Répartition de la production du CH ₄ par substrat %
Effluents d'élevage	Effluents d'élevage solides (fumier de bovin et équin)	17 476	24%	81%	78,0	1 363 144	219	744 016	50%
	Effluents d'élevage liquides (lisier, purin, eau de lavage et jus de silos)	4 906	4%	49%	12,5	61 320	293		
Matières végétales agricoles	Ensilage de céréales, maïs et paille	3 679	36%	94%	193,5	711 925	302		
	Cultures intermédiaires à vocation énergétique (ensilage de seigle, intercultures)	4 599	27%	87%	123,5	567 977	314		
Bilan	Substrats solides	25 754		83,9%	102,6	2 643 045	247,8		
	Substrats liquides	4 906		49,0%	12,5	61 320	293,0		
	Substrats	30 660		78,3%	88,2	2 704 365	255,1	1 487 388	100%

DR 2A (Question 9)
Organigramme de l'algorithme de recherche de zéro



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

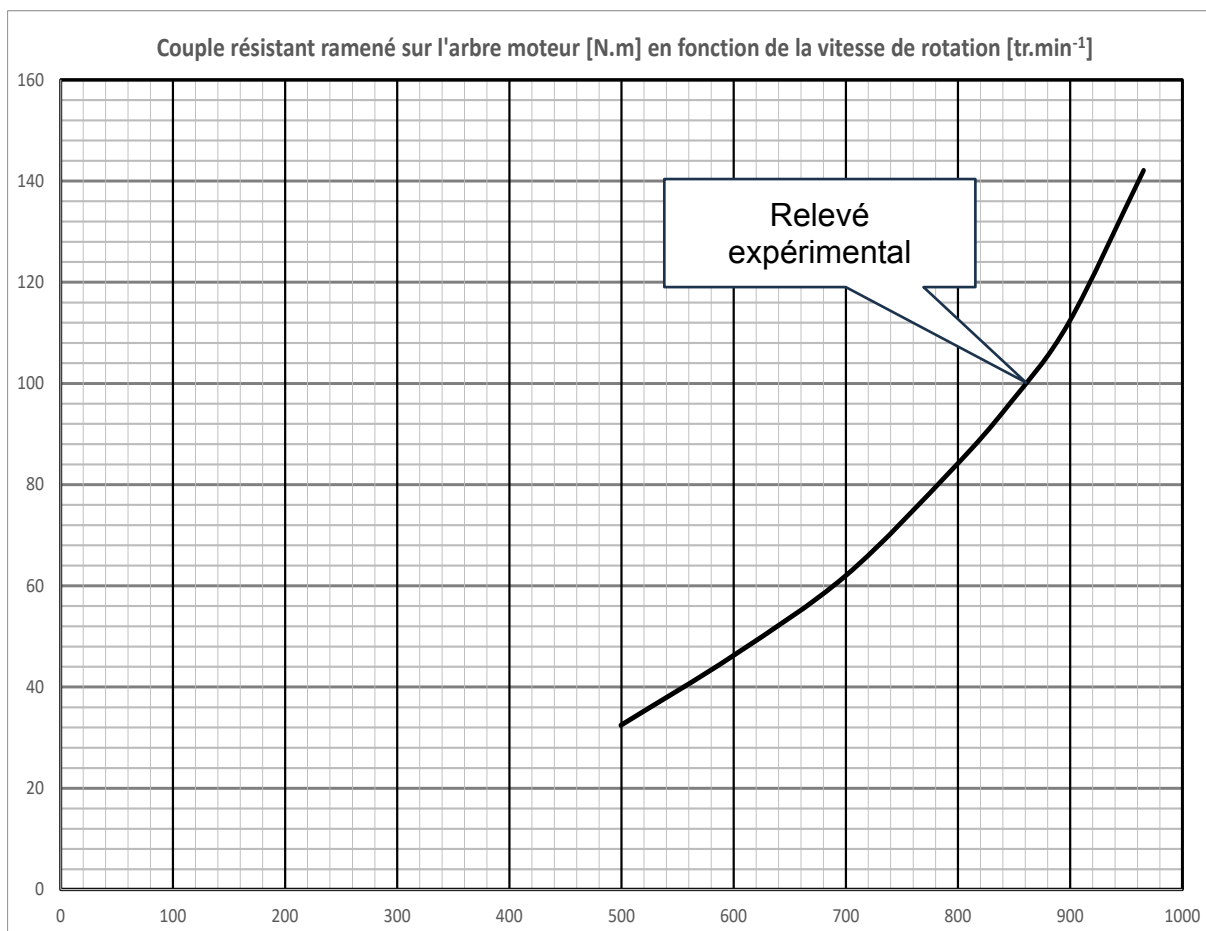
DR 2B (Question 9)
Programmation python de l'algorithme de recherche de zéro

```
1. Re= 2.955
2. He= 23.35
3.
4. def f(Lambda):
5.     return Lambda-64/Re*(1+He/(6*Re)-64/3*(He**4/(Re**7*Lambda**3)))
6.
7. def Dichotomie(f,a,b,eps):
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
21.
22.
23. #résolution par dichotomie
24. CoeffPerteCharge = Dichotomie(f,20,100,0.01)
```

DR 3 (Question 14 et 23)
Tableau des consommations annuelles de l'énergie électrique
(site de Briey)

Point de l'installation	Système entraîné	Énergie électrique consommée annuellement [kWh]
Préfosse (substrat liquide)	Pompe à boue	3 066
Doseur	Incorporateur BigMix	111 340
Doseur	Vis à auge	27 331
Doseur	Broyeur Premix	57 203
Doseur	Pompe de l'alimentateur Premix	
Digesteur 1	Ventilateur	964
Digesteur 1	Ventilateur	964
Digesteur 1	Agitateur 1	
Digesteur 1	Agitateur 2	
Digesteur 2	Ventilateur	964
Digesteur 2	Ventilateur	964
Digesteur 2	Agitateur 1	
Digesteur 2	Agitateur 2	
Post-digesteur	Ventilateur	964
Post-digesteur	Ventilateur	964
Post-digesteur	Agitateur	22 776
Post-digesteur	Agitateur	22 776
Cuve de stockage	Agitateur	13 490
Cuve de stockage	Agitateur	13 490
Cuve de stockage	Agitateur	13 490
Puits à condensats	Pompe	876
Fosse eau d'infiltration	Pompe	964
Bâtiment technique	Pompe de transfert	68 503
Bâtiment technique	Compresseur	1 664
Bâtiment technique	Aérotherme	9 286
Bâtiment technique	Ventilateur	1 051
Bâtiment technique	Ventilateur	1 051
Bâtiment technique	Ventilateur	3 241
Bâtiment technique	Ventilateur	3 241
Bâtiment technique	Analyseur de gaz	4 380
Container à chaleur	Circulateur électronique	8 410
Circuit chauffage du Digesteur 1	Pompe	3 154
Circuit chauffage du Digesteur 2	Pompe	3 154
Bâtiment technique	Générateur d'oxygène	3 241
Bâtiment technique	Générateur d'oxygène	3 241
Bâtiment technique	Générateur d'oxygène	3 241
Torchère	Torchère	2 803
Container Valogaz (sécheur)	Groupe froid	78 928
Container Valogaz	Surpresseur	62 021
Épurateur	Groupe froid	78 928
Épurateur	Compresseur	565 896
Consommation totale du site [kWh]		1 376 109

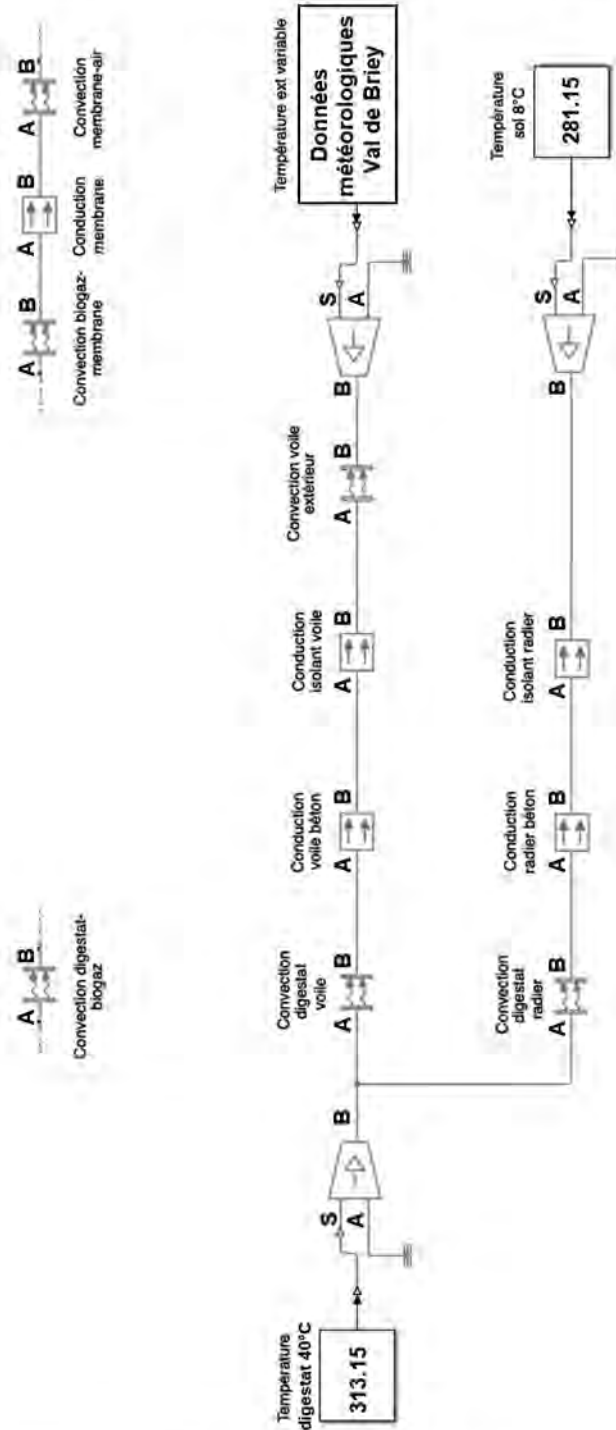
DR 4 (Question 20)
Profils du couple résistant ramené sur l'arbre moteur



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR 5 (Question 28)

Modèle Matlab Simulink de comportement d'un digesteur



Symbole bloc Simscape	Nom du bloc	Symbole bloc Simscape	Nom du bloc
	Controlled Temperature Source		Thermal Reference
	Conductive Heat Transfer		Convective Heat Transfer

DR 6 (Question 33)
Définition du protocole d'essais

Identification du protocole	Schéma du dispositif expérimental	Protocole expérimental
Problématique, Question scientifique		
Hypothèse		
Paramètres variables		
Paramètres contrôlés		
Paramètres observés		
Matériels	Traitement des résultats	